



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

자기-기계-마찰전기 에너지 하베스터의 제작과  
이를 활용한 사물인터넷 구현

Fabrication of magneto-mechano-triboelectric energy harvest system  
and application to the internet of things

指導教授 李三寧

2020年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電子素材工學科  
林京元

본 논문을 임경원의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 김 홍 승 (인)

위 원 이 삼 녕 (인)

위 원 황 건 태 (인)

2019년 12월 18일

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Abstract .....	ix

## 1. 서 론

1.1 에너지 하베스터의 필요성 .....	1
1.2 자기-기계-전기 복합체 하베스터 .....	3
1.3 마찰전기 하베스터 .....	5
1.4 마찰전기 하베스터의 성능 향상을 위한 표면적 크기 증가 .....	5
1.5 본 연구의 목적 .....	6

## 2. 이 론

2.1 Perfluoroalkoxy의 특성 .....	8
2.2 Aluminum 의 특성 .....	8
2.3 마찰전기 하베스터의 작동 원리 .....	10
2.4 실험 장비	
2.4.1 Planetary milling .....	12
2.4.2 Aerosol deposition (AD) .....	14
2.5 측정 장비	
2.5.1 SEM .....	16
2.5.2 XPS .....	20
2.5.3 Oscilloscope .....	22
2.5.4 Sourcemeter .....	23

### 3. 실험 방법

3.1 저진공 환경에서 친환경적인 공정을 이용한 나노구조체 제작 방법 .....	25
3.2 유한요소해석을 이용한 소자구조 설계 및 특성 예측 .....	28
3.3 MME 마찰전기 하베스터 제작 및 출력특성 평가 .....	30

### 4. 실험 결과

4.1 MMTEG의 나노구조체 .....	31
4.1.1 MMTEG의 작동 원리 .....	31
4.1.2 MMTEG 시스템 .....	33
4.1.3 FE-SEM .....	35
4.1.4 XPS .....	39
4.2 MMTEG의 전기적 출력 측정 .....	43
4.2.1 전압, 전류, 전력 특성 .....	43
4.2.2 내구성 평가 .....	53
4.3 유한요소해석을 이용한 소자 구조 설계 및 특성 .....	55
4.3.1 소자 구조 설계 .....	55
4.3.2 전기적 특성 예측 .....	60
4.4 IoT 디바이스 구동 데모 .....	62
4.5 60 Hz에서 MMTEG의 구동 .....	66

5. 결론 .....	74
-------------	----

참고문헌 .....	75
------------	----

## List of Tables

Table 2.1 PFA 필름의 물리적 특성 .....	9
Table 3.1 시뮬레이션에 필요한 물질들의 파라미터 .....	29



## List of Figures

<b>Fig. 1.1</b> 지속적인 에너지 공급을 필요로 하는 차세대 정보통신기술 .....	2
<b>Fig. 1.2</b> 자왜재료 및 압전재료를 활용한 MME 하베스팅의 개념도 .....	4
<b>Fig. 1.3</b> 마찰전기 하베스터의 표면적을 넓히기 위한 다양한 나노 패터닝 방법들. 왼쪽 위에서 시계 방향으로 폴리머의 건식 에칭, 화학적 반응으로 만든 나노와이어, 자가 조립된 폴리머 블록, 화학적 방법을 이용한 폴리머의 용해 .....	7
<b>Fig. 2.1</b> 마찰전기 기반 에너지 하베스팅의 동작원리 모식도 .....	11
<b>Fig. 2.2</b> 다양한 물질의 마찰전기 양/음 대전경향 .....	11
<b>Fig. 2.3</b> Planetary milling의 작동 모식도 .....	13
<b>Fig. 2.4</b> Grinding ball과 분말 혼합물의 작동 도식도 .....	13
<b>Fig. 2.5</b> AD를 위한 장치의 개략도. 운송 가스 (carrier gas)가 세라믹 분말이 담긴 챔버로 유입되고, 에어로졸 챔버 내에서 부유하는 미세한 세라믹 분말들을 실어서 진공상태의 증착실 내에 있는 기관으로 노즐을 통하여 분사됨. 기관은 X축과 Y축, Z축으로 움직일 수 있다 .....	15
<b>Fig. 2.6</b> AD의 코팅 과정. (a) 분사된 입자가 기관에 충돌함. (b) 입자가 분쇄되면서 일부 조각들이 기관에 박히거나 강력한 결합을 함. (c) 다음 입자가 그 위에 충돌하여 분쇄되어 강한 결합을 이루는 층을 형성함. 지속적인 충돌을 통하여 코팅층이 완성됨 .....	15
<b>Fig. 2.7</b> 전자현미경의 모식도 .....	17
<b>Fig. 2.8</b> 시료에서 방출되는 신호들과 그 신호를 분석하는 검출기 .....	19
<b>Fig. 2.9</b> XPS의 측정원리 .....	21
<b>Fig. 3.1</b> AD 공정과 소금 나노 입자를 활용한 나노구조체 형성 과정 .....	26
<b>Fig. 3.2</b> NaCl 나노 입자의 SEM 사진 .....	27
<b>Fig. 4.1</b> 교류 자기장에서 MMTEG의 작동 메커니즘 .....	32
<b>Fig. 4.2</b> MMTEG 시스템 사진. 삽입된 사진은 캔틸레버 구조의 클램프 파트 .....	34

<b>Fig. 4.3</b> 나노구조체를 가진 PFA 필름의 상부 SEM 사진 .....	36
<b>Fig. 4.4</b> (a) PFA 필름의 전체영역에서 나노구조체가 형성된 것을 보여주는 SEM 사진. (b) 나노 구조체를 형성한 표면의 Fluorine 원소를 검증하기 위한 에너지 분산 분광법의 매핑 (mapping) 결과 .....	37
<b>Fig. 4.5</b> 나노구조체가 형성되기 전의 평평한 PFA 필름의 SEM 사진 .....	38
<b>Fig. 4.6</b> 나노구조체를 가진 PFA 필름 표면의 XPS 결과 .....	40
<b>Fig. 4.7</b> XPS를 이용하여 잔류 Na (a) 와 Cl (b)의 성분을 확인하기 위한 나노구조체가 형성된 PFA 필름의 표면 분석 결과. 이 그래프는 노이즈로써 Na와 Cl 원소는 NaCl의 용해 과정 후 관찰되지 않음을 확인할 수 있다 .....	41
<b>Fig. 4.8</b> 표면을 에칭 하면서 측정한 XPS 분석 결과 .....	42
<b>Fig. 4.9</b> 나노 구조체가 있는 MMTEG와 없는 MMTEG 소자의 개방 회로 전압 .....	44
<b>Fig. 4.10</b> 나노 구조체가 있는 MMTEG와 없는 MMTEG 소자의 단락 회로 전류 .....	44
<b>Fig. 4.11</b> (a) Ti 기관으로 만든 MMTEG의 교류 자기장의 세기에 따른 개방 회로 전압 출력, (b) ~ (f) 자기장의 변화에 따른 캔틸레버의 변위의 변화를 보여 줌 .....	46
<b>Fig. 4.12</b> 기관이 SUS 304로 만들어진 MMTEG의 자기장 변화에 따른 개방 회로 전압 출력 .....	48
<b>Fig. 4.13</b> 나노구조체가 있는 MMTEG와 없는 MMTEG의 다양한 부하 저항 (1 k $\Omega$ ~ 1 G $\Omega$ ) 에서 측정된 절대값 피크 전압 .....	50
<b>Fig. 4.14</b> 나노구조체가 있는 MMTEG와 나노구조체가 없는 MMTEG의 피크 전력 .....	50
<b>Fig. 4.15</b> (a) 143.2 Hz에서 7 Oe의 교류 자기장 하에서 MMTEG와 2 M $\Omega$ 의 부하 저항, 오실로스코프를 사용하여 연속 교류 출력 전력을 측정하기 위한 회로도. (b) 2 M $\Omega$ 의 저항으로 MMTEG에서 생성된 출력 전압. (c) MMTEG에서 1초동안 생성된 전기 에너지. 마찰전기 하베스터는 4.8 mW (1 초동안	



4.8 mJ)의 교류 전력을 연속적으로 발전할 수 있다. ....	52
<b>Fig. 4.16</b> 나노 탄환으로 만들어진 MMTEG의 3300만 번의 진동 주기 (68시간)동안의 작동 안정성 테스트 결과 .....	54
<b>Fig. 4.17</b> 시뮬레이션 상, 캔틸레버 구조의 주파수에 따른 다양한 공진 모드 (a) 11.775 Hz, (b) 78.304 Hz, (c) 180.29 Hz, (d) 519.54 Hz, (e) 766.75 Hz, (f) 847.28 Hz .....	56
<b>Fig. 4.18</b> (a) 시뮬레이션을 사용하여 캔틸레버형 MMTEG 대한 첫 번째 공진 주파수에서 휨 모드의 고유 주파수 분석. (b) 실제 실험 측정에 의해 7 Oe의 교류 자기장을 갖는 15.1 Hz에서의 제 1 고유 진동 휨 모드의 개방 회로 출력 전압 .....	58
<b>Fig. 4.19</b> 두 번째 휨 공진 모드에서 캔틸레버형 MMTEG 구조에 대한 시뮬레이션 형상 .....	59
<b>Fig. 4.20</b> 상부의 Al부분과 평면 및 나노 구조를 가진 PFA 표면에 대해 계산된 정전기의 전위 .....	61
<b>Fig. 4.21</b> 무선 실내 위치 측정 시스템의 개념도 .....	63
<b>Fig. 4.22</b> MMTEG 기반의 자가발전 IoT 비콘 시스템의 회로도. 삽입된 그림은 블루투스 비콘 장치의 사진 .....	63
<b>Fig. 4.23</b> MMTEG와 정류/변환 회로에 의해 에너지 저장용 1 mF 커패시터의 충·방전 그래프. 삽입된 그래프는 위치 비콘의 연속적인 동작을 보여준다 .....	63
<b>Fig. 4.24</b> 사용자와 IoT 비콘 간의 물리적 거리 ( ‘No Signal’ 과 ‘Far’ , ‘Near’ )에 해당하는 스마트폰의 모니터링 프로그램의 캡처 이미지 .....	65
<b>Fig. 4.25</b> 자체 전원이 공급되는 IoT 비콘 시스템에 밀접하게 접근한 사용자의 정확한 실내 위치를 포함하는 메시지. 이는 스마트폰에서 무선 인터넷 서비스를 통해 주 모니터링 컴퓨터로 전송된 것이다 .....	65
<b>Fig. 4.26</b> 두 대의 헤드라이어에 연결된 전원 케이블 근처의 MMTEG 하베스터 실험 구성 사진 .....	67
<b>Fig. 4.27</b> 두 대의 헤드라이어를 사용하였을 때, 전원 케이블에서 측정된 교류 전류 .....	67

**Fig. 4.28** MME 캔틸레버 구조에 걸리는 교류 자기장 ( $B$ )의 개략도 ..... 69

**Fig. 4.29** 잡음 교류 자기장 하에서 MMTEG로부터 생성된 개방 회로 전압  
..... 70

**Fig. 4.30** 잡음 교류 자기장 하에서 MMTEG로부터 생성된 단락 전류 ..... 70

**Fig. 4.31** (a) 하나의 헤어드라이어를 사용하였을 때의 전원 케이블의 교류 전류. (b), (c) 전원 케이블에서 발생하는 교류 자기장의 잡음에 의한 MMTEG의 개방 회로 전압 및 단락 전류 ..... 72

**Fig. 4.32** MMTEG에 의해 구동되는 108 개의 청색 LED의 사진 ..... 73



## <국문초록>

# 자기-기계-마찰전기 에너지 하베스터의 제작과 이를 활용한 사물인터넷 구현

임경원

한국해양대학교 대학원 전자소재공학과

## 초록

실내 무선 위치 시스템에 전력을 공급하기 위해, 수용성 나노 탄환을 사용하여 만든 나노구조체를 기반으로 하는 고성능의 자기-기계-마찰전기 변환 에너지 하베스터 (MMTEG)에 대한 연구를 하였다. NaCl 나노 입자를 Aerosol deposition (AD) 공정에 사용하여 Perfluoroalkoxy (PFA) 필름 표면에 나노구조체를 형성할 수 있었다. 7 Oe 교류 자기장 내에서, MMTEG는 708 V의 개방회로 피크투피크 전압 (Vpp)과 277  $\mu$ A의 단락 회로 전류를 생성했다. 또한 MMTEG는 21.8 mW의 최대 피크 출력과 4.8 mW의 연속 교류 출력을 달성했다. 자가발전 무선 실내 위치 시스템은 MMTEG와 전력 관리회로, 전력 저장 커패시터, IoT 블루투스 비콘을 통합하여 구현하였다. MMTEG의 전기 에너지는 블루투스 비콘의 지속적인 작동을 가능하게 하였고, 설치된 무선 위치 확인시스템의 정확한 위치를 성공적으로 확인한 후 실내 위치를 주 모니터링 컴퓨터로 전송했다. 마지막으로 MMTEG는 가전 제품에 연결된 60 Hz 전원케이블 근처에서 330 V의 개방회로 피크투피크 전압 (Vpp)과 23  $\mu$ A의 단락 회로 전류를 생성하였고, 이는 108 개의 청색 발광 다이오드 (LED)를 켤 수 있었다.

**KEY WORDS:** 마찰전기 하베스터; 자기-기계-전기; 사물인터넷; Aerosol deposition; 나노

## <영문초록>

# Fabrication of magneto-mechano-triboelectric energy harvest system and the application to the internet of things

Lim, Kyung-won

Department of Electronic Materials Engineering  
Graduate School, Korea Maritime and Ocean University

### Abstract

Introducing accelerated water-soluble nano-bullet modified nanostructures showed a high output magneto-mechano-triboelectric nanogenerator (MMTEG) to convert an alternating current (AC) magnetic field into electric energy for self-powered Internet of Things (IoT) system. The Aerosol deposition (AD) process accelerated the crash of NaCl salt nanoparticles with high kinetic energy on perfluoroalkoxy (PFA) films to fabricate complex nanomorphology on the triboelectric active surface. The MMTEG generated an open-circuit peak-to-peak voltage ( $V_{pp}$ ) and a short-circuit current of 708 V and 277  $\mu$ A, respectively under an alternating current (AC) magnetic field of 7 Oe. Also, the harvester produced a maximum peak power of 21.8 mW and continuous AC output power of 4.8 mW. A self-powered indoor IoT positioning system was combined with the MMTEG, a power managing circuit, a storage component, and an IoT Bluetooth beacon. MMTEG's electrical energy enabled Bluetooth beacons to continue operation, and after successfully verifying the exact location of the installed wireless positioning system, the indoor location was transferred to the main monitoring computer. Near a 60 Hz power cable connected to the consumer electronics, the MMTEG generated an open-circuit  $V_{pp}$  and a short-circuit current of 330 V and 23  $\mu$ A, respectively, which were enough to turn on 108 blue light emitting diodes (LEDs).

**KEY WORDS:** Triboelectric generator; Magneto-mechano-electric; IoT; Aerosol deposition; nano

# 제 1 장 서 론

## 1.1 에너지 하베스터의 필요성

제 4차 산업혁명 시대를 맞이하여 편리하고 풍요로운 생활, 사용자의 편의, 개인의 건강, 작업장에서 작업자의 안전 등이 가장 중요한 이슈가 되고 있다. 따라서 인력 투입이 힘든 환경에 무선센서노드를 설치하여 균열 및 파손을 예측하거나 교통 안내를 담당하는 스마트 도로, 웨어러블 디바이스 등 언제 어디서든 모든 사물이 네트워크에 연결되어 사람과 소통하는 사물 인터넷 (IoT) 기술이 각광받고 있다[1, 2]. 이 때, 수십  $\mu$ W부터 수백 mW급의 에너지를 필요로 하는 사물인터넷 (IoT)으로 구성된 스마트 팩토리, 스마트 도로, 스마트 하우스 등 (Fig. 1.1)의 차세대 정보통신기술 (ICT)의 상용화를 위해서는 지속적인 에너지 공급 문제를 해결하는 것이 가장 중요하다[3]. 네트워크에 연결된 수많은 사물의 배터리를 일일이 교체하는 것은 시간적으로나 비용적으로나 매우 비효율적인 일이다. 예를 들어 수십억 개의 센서 노드에 외부 전력선이나 수명의 제한이 있는 배터리를 연결하는 것은 시스템 구축 및 유지 보수에 대한 비용 및 노동력이 엄청나게 증가하기에 사실상 불가능하다[4-6]. 따라서 주변 환경에서 에너지를 수확하여, 무선센서노드의 배터리를 지속적으로 충전하거나 단독적으로 무선센서노드에 일정한 전원을 공급하여 배터리를 완전히 대체할 수 있는 에너지 하베스팅 소자의 중요성이 증가하고 있다[7].



Fig. 1.1 지속적인 에너지 공급을 필요로 하는 차세대 정보통신기술

## 1.2 자기-기계-전기 복합체 하베스터

에너지 하베스팅 기술들에는 여러 가지가 있는데 그 중에서 미세 자기장 에너지 하베스팅이라는 기술이 있다. 이는 우리 주변에 흔히 존재하는 다양한 전자기기 및 구조물에 연결된 전선 주변에서 버려지는 상시 60 Hz의 수~수십 가우스 (G)의 미세한 교류 자기장을 전기에너지로 변환하여 배터리를 충전하여 IoT 디바이스에 전원을 공급함으로써 반영구적 자가발전형 디바이스를 구현을 목표로 하는 기술이다. 일반적으로 코일과 자성체를 사용하는 전자기 유도방식의 전력발생장치는 충분한 전력을 발전하기 위해서는 수천~수만 회로 감은 코일을 사용해야하기에 공간, 부피, 효율적인 부분에서 부정적인 점이 있으며, 송배전 선로에 설치를 하였을 경우 자기장 간섭에 의한 선로의 송배전 품질에 영향을 미치기에 실제 적용에는 제한적이다. 지난 몇 년간, 공장 및 건물들, 전력 전송 시스템 등의 모든 곳에 설치 되어있는 전력케이블에서 발생하는 1 mT (= 10 Oe) 미만의 교류 자기장 (일반적으로 50/60 Hz의 고정 주파수)을 이용하는 자기-기계-전기 (magneto-mechano-electric, MME) 복합체 하베스터는 자가 발전 IoT 시스템을 개발하는데 많은 관심을 모으고 있다[8-10]. 이는 Fig. 1.2와 같은 압전소재, 자왜소재, 영구자석소재를 활용하여 교류 자기장에서 자왜효과 및 자기력을 활용한 기계적인 변형 (움직임)을 유발하고 이를 압전효과를 이용하여 전기에너지로 생성하는 2단계의 에너지 변환을 이용한다[11-14]. 지금까지의 자왜/압전 복합체 기반의 MME 하베스터는 주로 고성능의 압전 단결정을 사용하여 성능을 높여왔다. 최근 발표된 논문에서는 자왜재료인 Fe-Ga 합금과 압전 PMN-PZT 단결정 ( $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ , 압전상수  $d_{32}\sim 1800\text{pC/N}$ )을 활용하여 캔틸레버 구조의 MME 하베스터를 제작하였고, 7G의 교류자기장에서 4.6 mW의 높은 교류 제곱평균제곱근 (RMS)를 달성하였다[8, 9]. 하지만 기존의 MME 복합체 하베스터에 사용되는 압전 단결정은 제작하는데 많은 시간과 에너지가 소모되기에 매우 고가이기에 상용화에 큰 걸림돌이 되고 있다[7].



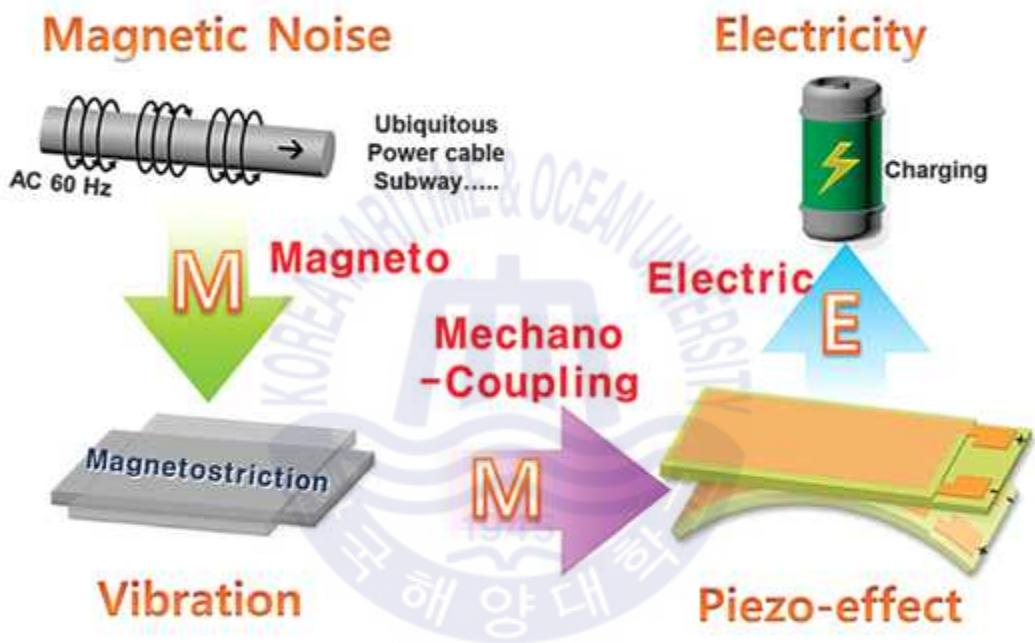


Fig. 1.2 자왜재료 및 압전재료를 활용한 MME 하베스팅의 개념도



### 1.3 마찰전기 하베스터

마찰전기 효과인 triboelectrification effect를 이용한 에너지 하베스터는 새로운 IoT 응용품을 위해 저렴하고 효율적이며 간단하고, 기계/진동 에너지로부터 전력을 얻을 수 있기에 MME 하베스터의 압전 단결정을 대체하기 위한 유망한 후보이다[5, 15-22]. 마찰전기 현상은 서로 반대되는 마찰 극성을 지닌 두 물질의 접촉을 통해 전하 이동이 되는 과정으로 설명할 수 있다[23-25]. 마찰전기 하베스터와 여러 종류의 하베스터를 결합하려는 다양한 시도가 있었다[26-30]. Yang et al.은 마찰 전기 나노 발전기와 전자기 발생기를 성공적으로 통합하여 새로운 하이브리드 유형의 고성능 기계 에너지 하베스터를 제안했다[28, 31]. 회전식 디스크 기반의 하이브리드 구조의 경우, 전자기 발전기는 8.4 mW를 생성하고 마찰 전기 나노 발전기는 8.6 mW를 생성했다[32]. 자기-기계-마찰전기 나노발전기 (Magneto-mechano-triboelectric nanogenerator, MMTEG)를 증명하기 위해 Huang et al.은 마찰전기 하베스팅과 자계 응답 진동 재료의 역할을 수행하기 위해 PDMS와 Fe-Co-Ni 분말의 복합체를 제조했다[33]. 이 장치는 외부 교류 자기장 내에서 325 V의 개방회로 전압과 9.2 mA의 단락 회로 전류를 생성할 수 있지만, 1000 Oe를 초과하는 인가 자기장은 약한 주변 자기장을 포함하는 실용적인 응용 분야에서 사용하기에 과도하게 높을 수 있다.

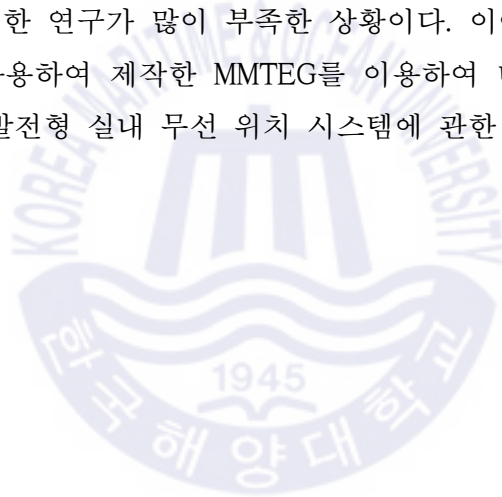
### 1.4 마찰전기 하베스터의 성능 향상을 위한 표면적 크기 증가

마찰전기 나노발전기 (triboelectric nanogenerator, TENG)의 성능을 향상시키기 위해 많은 연구팀들이 접촉 표면적을 증가시키기 위한 다양한 소재 패턴 공정에 관한 연구가 많이 진행되어 왔다[16, 34, 35]. 접촉 영역의 형상적 성질은 마찰 대전과, 마찰전기 하베스터에 대한 접촉 유도 전하에 상당한 영향을 줄 수 있다[36, 37]. 현재까지 대전체의 표면적을 넓히기 위해 Fig. 1.3과 같이 여러 가지 나노 패터닝 공정이 마찰전기 하베스터에 적용되어 전기에너지의 출력 특성을 비약적으로 발전시켜 왔다[38-45]. 예를 들어 폴리머의 건식 에칭이나 표

면에 나노 입자 부착, 화학적으로 변형된 나노 와이어, 자가 조립된 폴리머 블록, 양극 산화 알루미늄 등이 있다. 하지만 기존의 나노 패터닝 공정은 고가의 고진공 건식 식각 장비 또는 UV 리소그래피, 유독한 화학물질을 이용하여 진행되기 때문에 실용화를 하기에 힘든 점이 많았다.

## 1.5 본 연구의 목적

현재까지 MME 마찰전기 하베스터에 관한 연구가 거의 진행되지 않았고, 대부분의 마찰전기 하베스터에 관한 연구들이 소자 구조의 개발 중심이라 소재 및 전체 시스템에 대한 연구가 많이 부족한 상황이다. 이에 친환경적이고 수용성의 나노 탄환을 사용하여 제작한 MMTEG를 이용하여 미세한 자기장에서 작동할 수 있는 자가 발전형 실내 무선 위치 시스템에 관한 연구를 수행하였다.



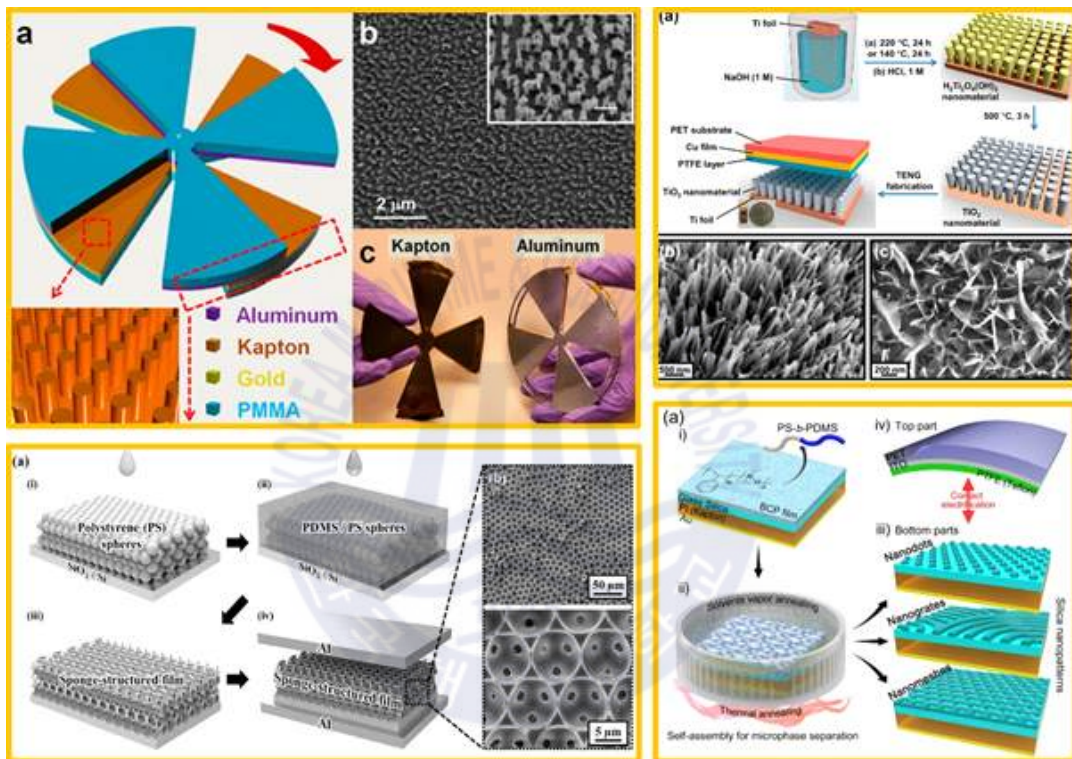


Fig. 1.3 마찰전기 하베스터의 표면적을 넓히기 위한 다양한 나노 패터닝 방법들. 왼쪽 위에서 시계 방향으로 폴리머의 건식 에칭, 화학적 반응으로 만든 나노와이어, 자가 조립된 폴리머 블록, 화학적 방법을 이용한 폴리머의 용해

## 제 2 장 이 론

### 2.1 Perfluoroalkoxy의 특성

Perfluoroalkoxy (PFA)는 Tetrafluoroethylene과 perfluoroethers의 공중합에 의해 형성된 화합물이다. 이는 대표적인 불소수지 (fluoropolymer)로 특성면에서 테프론 (PTFE)과 유사하다. 분자 수준에서 PFA는 다른 불소수지보다 작은 사슬 길이와 높은 사슬 결합력을 가지고 있고, 결합에 산소 원자를 포함하고 있기에, PTFE보다 더 반투명하고 뛰어난 유동, 열안정성을 갖는다. 다른 특성으로는 비점착성, 내약품성, 내후성, 내부식성 등이 있다. 주로 수송용 부품, 산업용 기계, 반도체 제조 등에서 사용된다. 아래의 Table 2.1은 이 실험에 사용된 PFA 필름의 특성에 관한 것이다[46].

### 2.2 Aluminum 의 특성

Aluminum (Al)은 대표적인 +극의 물질로 주기율표 상에서 13족에 3주기에 속하는 금속 원소이다[47]. 원자량은 26.987 g/mol, 녹는점은 660.32 °C, 끓는점은 2519 °C, 밀도는 2.7 g/cm<sup>3</sup>이다. 은백색의 가볍고 무른 금속으로 지구의 지각을 이루는 주 구성 원소 중 하나이다. 가볍고 내구성이 큰 특성을 이용해 원자재 및 재료로 많이 사용된다. 전자부품 중 정전기에 약한 CMOS형 IC, 램, CPU 등을 알루미늄 호일로 감싸면 정전기는 호일을 통해 표면을 흘러가 내부에 싸인 부품을 정전기로 인한 피해를 막을 수 있다[48]. 전자파를 방지하는 효과가 있어 실험장비로부터 외부 잡음을 방지할 때 쓰이거나, 외부 잡음을 차단하는 목적으로 만든 동축 케이블 등에서 전선 피복 바로 전에 내부의 전선을 감싸게 된다.

**Table 2.1** PFA 필름의 물리적 특성

Properties	ASTM Method	Metric Value	Metric Units
비중	D-792	2.12-2.18	
Yield (1 mil film)		18	m <sup>2</sup> /kg
Water Absorption		< 0.01	%
Tensile Strength @ Break	D-882	21	MPa
Elongation @ Break	D-882	300	%
Young's Modulus	D-882	400	MPa
Initial Tear Strength 2 mil	D-1004	4.9-5.3	N
Propagating Tear Strength 2 mil	D-1922	2.4-2.7	N
Fold Endurance (M.I.T.)	D-2176	>600000	cycles
Dielectric Strength 1 mil	D-149	185	kV/mm
Dielectric Constant 1 kHz	D-150	2.1	
Dissipation Factor 1 kHz	D-150	0.0005	
Melt Point	D-3418	302-310	°C
Continuous Service Temperature		260	°C
Specific Heat		1172	J/(kg·°K)
Coefficient of Thermal Conductivity	D-2863	0.195	W/(m·°K)
Coefficient of Linear Thermal Expansion	D-696	9.9×10 <sup>-5</sup>	mm/(mm·°C)
Flammability	UL-94	V-0	
Limiting Oxygen Index	D-2863	95	%
Refractive Index	D-542	1.35	
Solar Transmission	E-424	96	%

### 2.3 마찰전기 하베스터의 작동 원리

마찰전기는 일반적으로 서로 다른 두 물질의 접촉면에서 발생하게 되며, 고대 그리스 철학자 탈레스가 호박을 양피에 마찰하여 정전기를 발생시킨 것이 시초이다. 이러한 마찰전기는 고분자 물질을 많이 취급하는 우리 생활 주변에서 빈번하게 발생 될 뿐만 아니라 자연현상에서도 많이 볼 수 있는데, 그 대표적인 현상이 낙뢰현상이다. 구름 속 물방울과 얼음알갱이들이 서로 마찰을 일으켜 구름 아래쪽은 음전하, 위쪽은 양전하가 된다. 이렇게 대전된 구름이 땅위를 지나가면 정전기 유도 현상에 의해 땅 위가 양전하를 띠게 되어 거대한 정전기인 번개가 일어난다. 마찰전기 하베스터 소자는 서로 다른 두 물질을 마찰이 용이하도록 제작하여 마찰 시 발생하는 정전기 효과를 극대화한 것으로 전기에너지 생성 원리는 Fig. 2.1과 같다. 서로 다른 두 물질을 접촉하면 마찰에 의해 두 물질의 표면이 대전되는 현상이 나타난다. 두 물질의 분리가 시작되면 정전기 유도 현상에 의해 위, 아래 전극에 보상 전하가 축적되기 시작하고, 전하 균형이 맞을 때까지 외부 회로를 통해 전류가 흐르게 된다. 그 후 두 물질이 다시 가까워지기 시작하면 축적되었던 보상 전하가 점점 사라져 처음과는 반대 방향의 전류가 외부 전극을 통해 흐르게 되며, 반복되는 접촉 및 분리 과정을 통해 양 전극 간에 지속적으로 교류전류가 흐르게 된다. 또한 마찰전기는 Fig. 2.2에 나와 있듯이 양과 음의 대전 경향이 서로 멀리 떨어져 있을수록 마찰 전기가 발생하기 수월해져서 출력도 높아지게 된다.



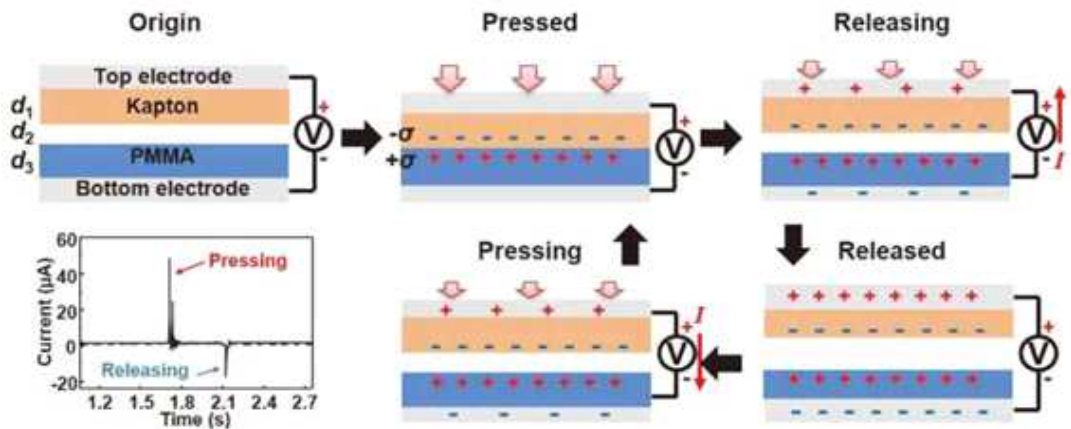


Fig. 2.1 마찰전기 기반 에너지 하베스팅의 동작원리 모식도

	Polyformaldehyde 1.3-1.4	(continued)	
	Etylcellulose	Polyester (Dacron)	
	Polyamide 11	Polyisobutylene	
	Polyamide 6-6	Polyurethane flexible sponge	
	Melanime formol	Polyethylene Terephthalate	
	Wool, knitted	Polyvinyl butyral	
	Silk, woven	Polychlorobutadiene	
	Aluminum	Natural rubber	
	paper	Polyacrylonitrile	
	Cotton, woven	Acrylonitrile-vinyl chloride	
	Steel	Polybisphenol carbonate	
	Wood	Polychloroether	
	Hard rubber	Polyvinylidene chloride (Saran)	
	Nickel, copper	Polystyrene	
	Sulfur	Polyethylene	
	Brass, silver	Polypropylene	
	Acetate, Rayon	Polyimide (Kapton)	
	Polymethyl methacrylate (Lucite)	Polyvinyl Chloride (PVC)	
	Polyvinyl alcohol	Polydimethylsiloxane (PDMS)	
	(continued)	Polytetrafluoroethylene (Teflon)	

Fig. 2.2 다양한 물질의 마찰전기 양/음 대전경향

## 2.4 실험 장비

### 2.4.1 Planetary milling

Planetary milling은 샘플의 강력한 분쇄를 위한 milling의 방법 중 하나이다. Planetary milling은 Fig. 2.3과 같이 grinding ball로 채워진 여러 개의 원통형 grinding jar로 구성된다[49]. 두 개의 회전 운동은 grinding jar를 움직인다. 첫째의 회전으로는, 행성계의 운동같이 grinding jar는 sun wheel의 중심으로 하여 궤도에 따라 공전 (revolution) 한다. 다른 하나의 회전 운동은 grinding jar 자체의 자전 (rotation) 이다. 이 두 회전 운동은 서로 반대방향으로 회전을 하게 되고, 이로 인해 생긴 원심력 및 작용 가속력은 강력한 분쇄 효과를 초래한다. 이러한 힘은 코리올리 가속에 따라 작용한다. 이는 Fig. 2.4에 grinding ball과 분말 혼합물의 작동 도식도를 나타내었다. Planetary milling은 여러 장점들이 있는데, 크게 두 가지를 꼽을 수 있다. 첫째로 최종 미세 정도가 1  $\mu\text{m}$ 미만인 고효율 미세 분쇄가 가능하다는 것이다. 둘째는 ball milling에 비해 빠른 속도로 grinding이 가능하다는 것이다.



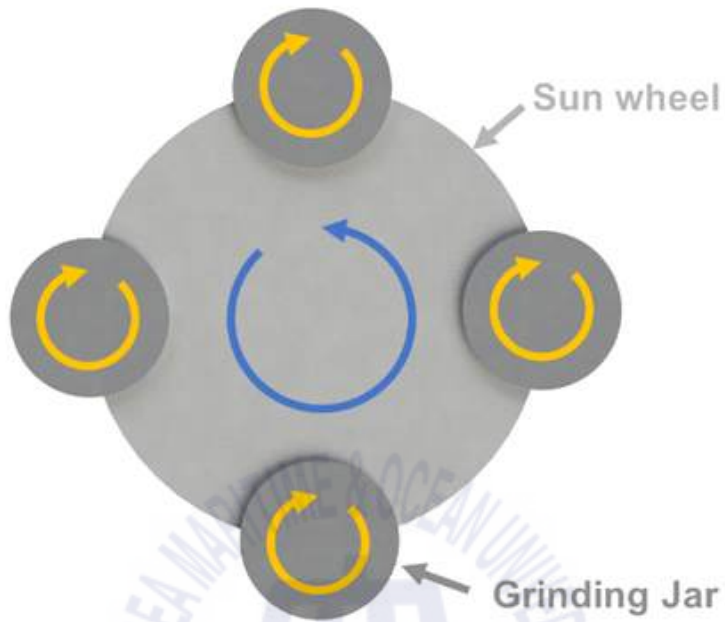


Fig. 2.3 Planetary milling의 작동 모식도

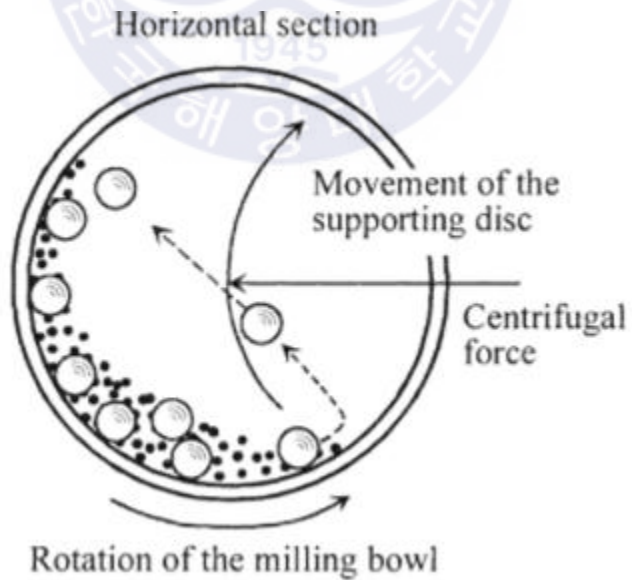


Fig. 2.4 Grinding ball과 분말 혼합물의 작동 도식도

## 2.4.2 Aerosol deposition (AD)

Aerosol deposition 공정은 미세한 분말을 운송 가스에 실어서 기관으로 분사함으로써 기관 표면에 세라믹 코팅층을 형성하는 것이다[50]. 여기서의 에어로졸은 수 nm이하의 직경을 갖는 극미세 입자들이 부유하고 있는 상태의 에어로졸과는 다소 차이가 있으며, 직경 수십 마이크로미터까지의 입자들이 가스에 실려서 운반되는 상태를 나타낸다고 보는 것이 옳다. 이 공정은 여러 장점들이 있는데 그 예시로 고속 코팅 가능, 상온에서 치밀하고 균열이 없는 코팅층의 형성, 코팅층의 조성 및 화학양론비의 제어용이, 수십 나노미터 이내의 결정립들을 갖는 투명한 세라믹 코팅층 제작, 금속, 세라믹, 경질 고분자 등 다양한 기관 사용, 다양한 세라믹스 코팅이 가능하다는 것들이 있다. 특히, 상온에서 치밀한 세라믹 코팅이 이루어지는 것은 공학적 관점에서 매우 흥미로운 것으로 이는 곧 플라스틱과 금속 등을 기관으로 하여 연화나 산화의 걱정 없이 코팅할 수 있다는 것을 의미한다.

AD의 장치는 Fig. 2.5의 모식도로 설명이 된다. 코팅의 원리에 대한 명쾌한 설명은 아직 이루어 지지 못하고 있으나, 지금까지의 여러 연구결과들을 종합하여 보면, Fig. 2.6과 같은 과정으로 이루어지는 것으로 추정할 수 있다. 본 연구에서는 코팅의 목적이 아니라 폴리머에 NaCl이 박히는 현상을 이용하였다.

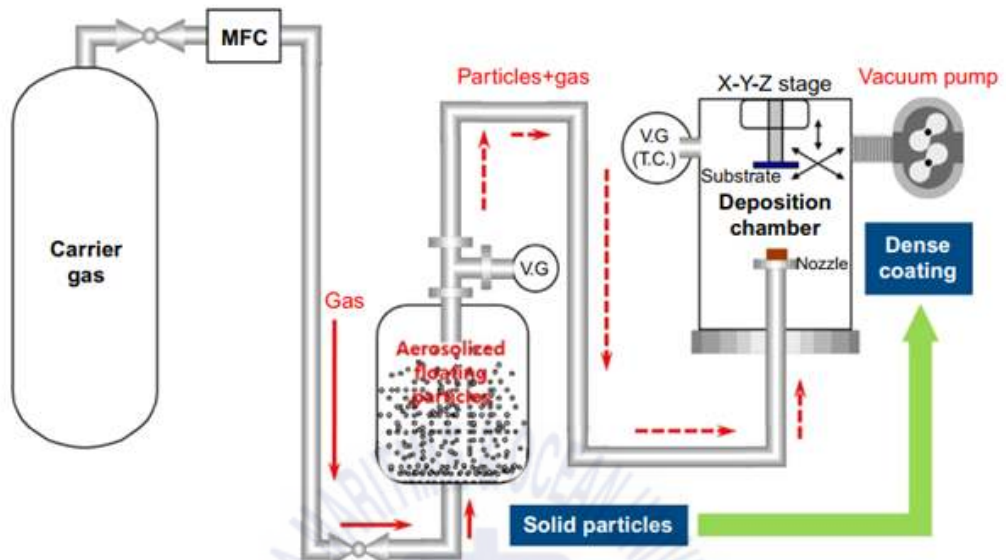


Fig. 2.5 AD를 위한 장치의 개략도. 운송 가스 (carrier gas)가 세라믹 분말이 담긴 챔버로 유입되고, 에어로졸 챔버 내에서 부유하는 미세한 세라믹 분말들을 실어서 진공상태의 증착실 내에 있는 기관으로 노즐을 통하여 분사됨. 기관은 X축과 Y축, Z축으로 움직일 수 있다

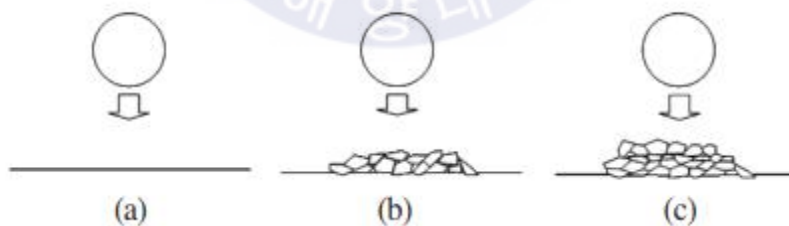


Fig. 2.6 AD의 코팅 과정. (a) 분사된 입자가 기관에 충돌함. (b) 입자가 분쇄되면서 일부 조각들이 기관에 박히거나 강력한 결합을 함. (c) 다음 입자가 그 위에 충돌하여 분쇄되어 강한 결합을 이루는 층을 형성함. 계속적인 충돌을 통하여 코팅층이 완성됨

## 2.5 측정 장비

### 2.5.1 SEM

SEM (Scanning Electron Microscopy)은 샘플의 표면을 전자빔을 주사하여 이미지화 하는 전자현미경의 일종이다[51]. 고속의 전자를 발사하면 이 전자가 시료의 표면에 충돌하게 되면서 상호작용하여 시료에서 2차 전자와 X-ray 등의 물질이 튀어나오게 되는데, 그중 전자를 분석하는 방법이다. SEM은 기본적으로 컬럼부와 컬럼 아래쪽의 진공 경통부로 나눌 수 있으며, 전자총에서 발생된 전자빔이 집속코일과 대물코일을 거쳐 과장이 일정한 전자빔으로 조정되어 시편에 도달하게 된다. 먼저 전자총 (electron gun)은 광학현미경에서 광원의 역할을 하는 전자를 만들고 가속시켜 전자를 공급하는 역할을 한다. 여기서, 두 가지의 전자방출방법이 있다. 필라멘트를 가열하여 전자를 방출하는 열전자방출과 전계를 가하여 전자를 방출하는 전계방출법이 있다. 일반적으로 열전자방출법으로 만들었을 때를 SEM이라 하고 전계방출법에 의해 만들어진 SEM을 FE-SEM (Field Emission-Scanning Electron Microscopy)이라고 한다. 시료에서 반사되거나 반응하여 방출되는 secondary electron (2차 전자)를 검출하고 모으기 위한 detector도 필수적이다. Detector의 구성요소로는 scintillator와 photo-multiplier tube로 구성되어 있다. Scintillator는 시료의 표면에서 나온 secondary electron과 부딪혀 발광하게 되고, 이 빛은 photo-multiplier tube를 통과하여 전기적 신호로 변환하여 이미지를 만들게 된다. 이러한 개요를 나타낸 SEM의 모식도는 Fig. 2.7와 같다.

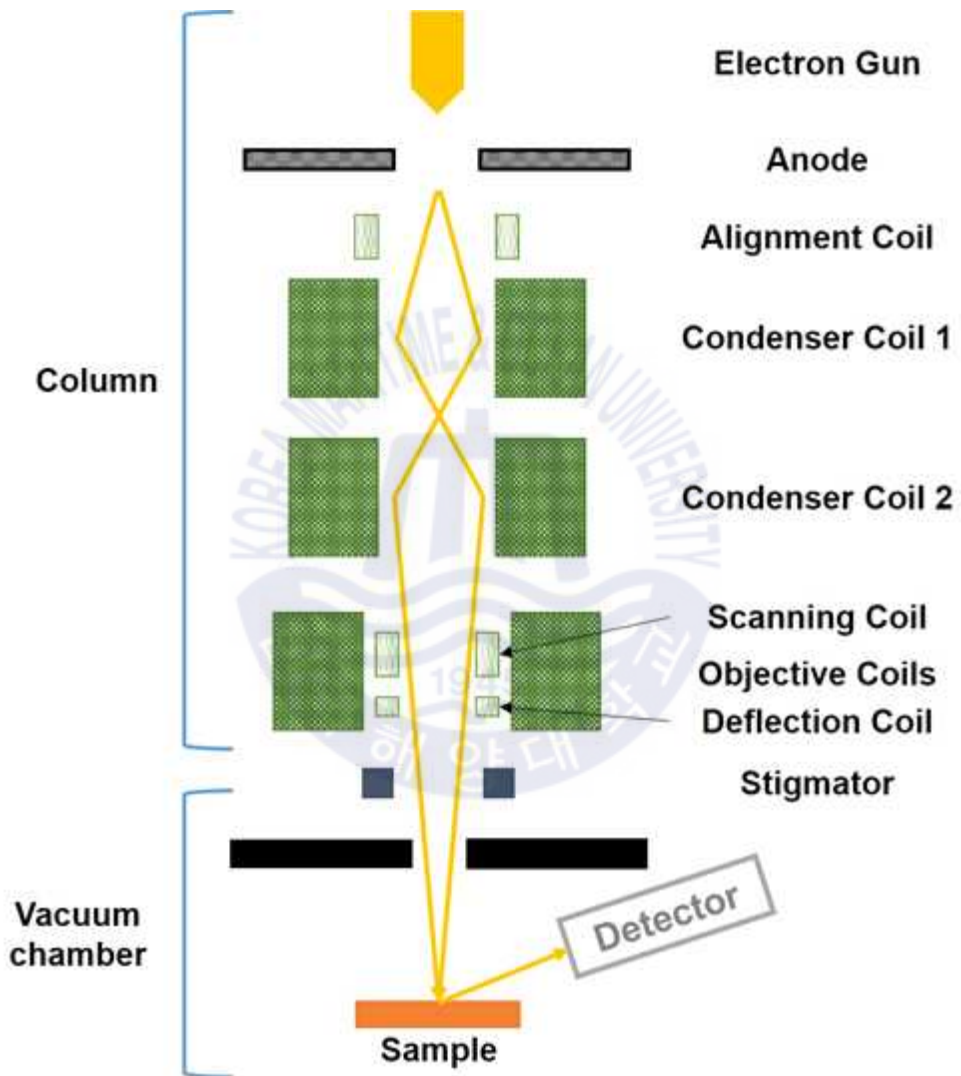


Fig. 2.7 전자현미경의 모식도

SEM은 광학현미경과 달리 높은 에너지의 전자빔에 의해 발생하는 secondary electron을 검출하기 때문에 분해능이 보다 높고 심도가 깊어 요철이 심한 단면이나 표면 조도가 큰 시편을 관찰하는데 유리하다. 또한 추가적인 검출기 장착이 가능하고 이를 이용하여 여러가지의 측정이 가능하다. 대표적인 검출기로는 특성 X선을 검출 할 수 있는 EDS (Energy Dispersive x-ray Spectroscopy)와 WDS (Wavelength Dispersive x-ray Spectroscopy), 후방산란전자를 측정할 수 있는 BSE (Back Scattered Electrons) 등 이 있다. Fig. 2.8에서 전자빔이 시료에 입사할 경우에 발생하는 신호와 그 신호를 분석하는 검출기에 대해 나타내었다 [52].



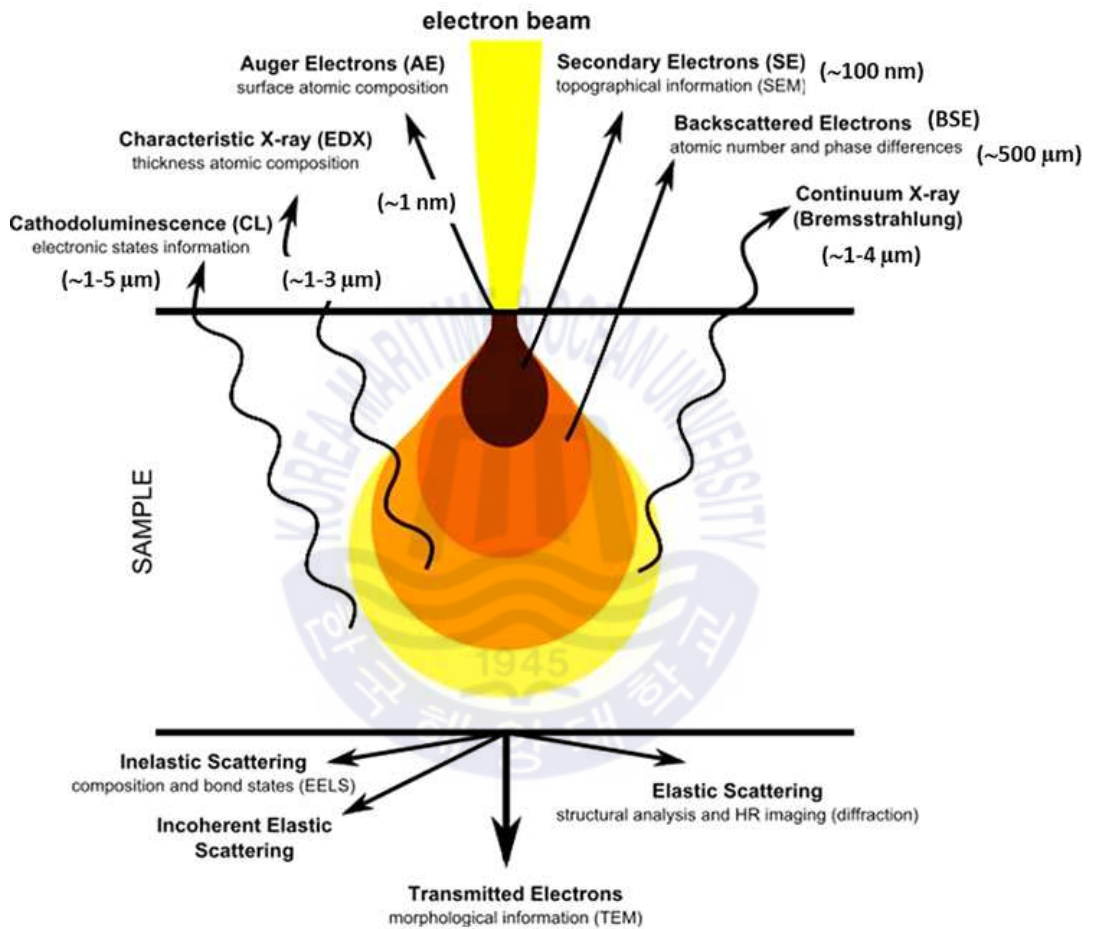


Fig. 2.8 시료에서 방출되는 신호들과 그 신호를 분석하는 검출기



## 2.5.2 XPS

X-선 광전자 분광기 (X-ray photoelectron Spectroscopy, XPS)는 재료의 최외곽층 (수 nm)을 분석할 수 있는 가장 널리 사용되는 표면 선택성 분석 장비로 재료 표면의 구성 원소와 조성비, 화학적 결합 상태나 물질간의 상호 결합에 의해 형성되는 계면의 특성 등을 분석하는데 주로 사용된다[53]. XPS는 X-선을 에너지원으로 시료 표면에 주사, 시료의 표면에서 방출되는 전자를 분석함으로써 표면의 물리화학적 정보를 유추해 내는 분석 장비이다. XPS의 중요한 분석 특징은 수소를 제외한 모든 원소로부터 비슷한 세기를 갖는 피크가 분리되어 얻어지고, 탄소나 질소와 같이 질량이 유사한 인근 원자로부터 방출되는 피크의 구분이 용이하며, 산화 상태나 원자의 하전 상태 혹은 주위의 결합 상태 등에 기인하는 화학적 천이 (chemical shift) 현상이 관찰되어진다는 것이다. 따라서 이러한 특징으로부터 XPS가 재료 표면의 구성 원소, 조성비 및 화학적 결합 상태나 물질간의 상호 결합에 의해 형성되는 계면의 특성 등을 분석하는데 용이하게 이용될 수 있다. Fig. 2.9는 XPS의 측정 원리에 대해 설명해 둔 것이다 [54].



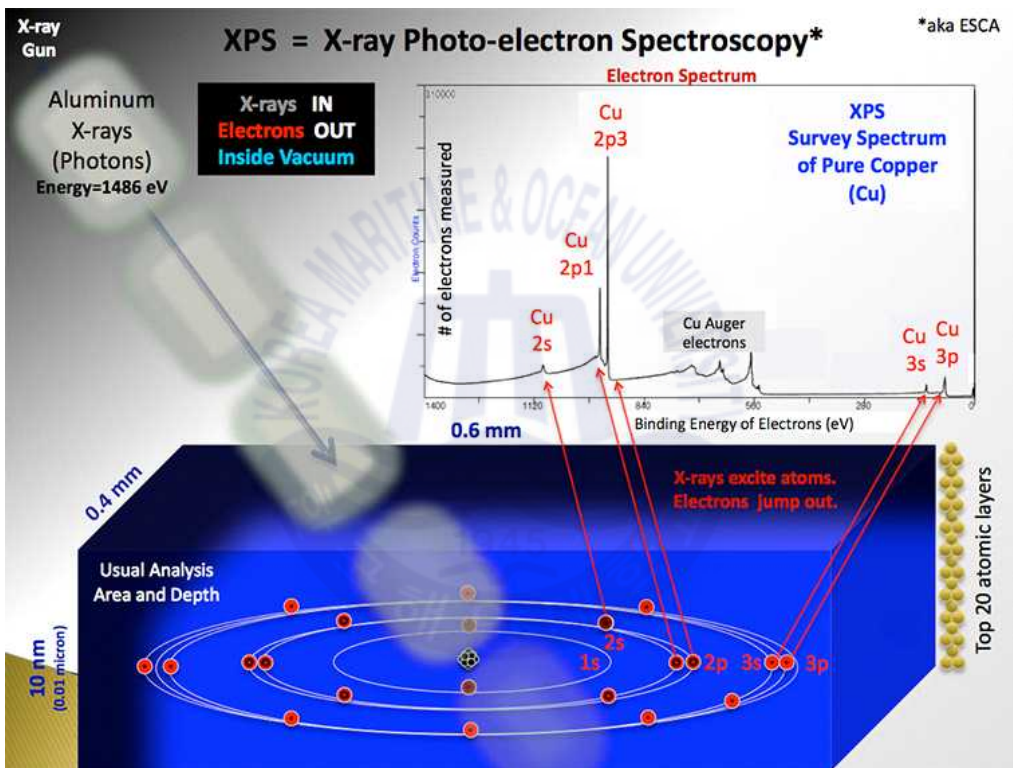


Fig. 2.9 XPS의 측정원리

### 2.5.3 Oscilloscope

Oscilloscope는 관측하는 신호가 시간에 대하여 어떻게 변화하는가를 조사하는 것이 주목적으로, 보통 수직축에 신호의 크기를, 수평축에 시간을 나타낸다. 이를 위해 oscilloscope는 6개의 기본회로로 이루어져있다[55]. 수직감쇠회로와 증폭회로는 관측하는 파형 신호를 모니터의 수직편향전압에 맞추는 역할을 하고, 스위프 회로는 수평축이 시간 축이 되도록 동작시킨다. 그리고 동기회로(트리거 회로)는 synchroscope로서 파형을 입력 신호와 쉽게 동기화 한다. 주로 주기적으로 반복되는 전자 신호를 표시하는데 사용한다. 이 기기를 활용하면 시간에 따라 변화하는 신호를 주기적이고 반복적인 하나의 전압 형태로 파악할 수 있다. 대부분의 오실로스코프에는 사용자가 눈으로 신호를 파악할 수 있도록 시간과 전압에 따른 눈금도 표시되어있다. 이는 파형의 전압 최소/최대치, 주기적 신호의 빈도, 펄스 간의 시간, 관련 신호 간의 시차 등을 분석할 수 있게 한다. 신호처리방식에서 초기에는 아날로그 방식으로 처리하여 음극선관에 표시하는 방식이었다. 전자공학의 전반적 디지털 방식의 발전에 따라 신호를 Analog-to-Digital Converter를 사용하여 디지털로 변환하여 메모리에 저장하고, CPU를 통해 신호처리를 하여 연결하는 방식의 디지털 오실로스코프를 주로 사용한다. 표시 방식은 TFT-LCD를 주로 사용한다. 예전의 아날로그 방식은 수집된 신호를 저장하기 어렵고, 단발성 신호 포착이 어려웠다. 그러나 디지털화 하면서 비교적 긴 시간의 신호를 저장하기가 쉬워졌다. 멀티미터가 전압, 전류, 저항 등의 특징적 신호의 크기만을 표시 한다면, 오실로스코프는 신호의 시간적 변화에 따른 신호모양 까지를 표시하므로 회로 설계자에게 신호처리 시 많은 정보를 제공 할 수 있다. 신호의 입력은 주로 2 또는 4개의 신호를 동시에 표시한다. 스크프, CRO(cathode-ray oscilloscope), DSO(digital storage oscilloscope) 등으로 알려진 오실로스코프는 다양한 전압신호를 지속적으로 관측할 수 있는 전자식 측정 기기의 한 종류다. 여러 개의 디지털 신호를 측정하기 위한 포트를 지원하여 아날로그 신호와 동시에 디지털 신호를 동 시간에 비교 표시한다. 로직 분석기를 대체하기도 한다.

## 2.5.4 Sourcemeater

Sourcemeater는 주로 Source Measure Unit (SMU)라고 정의를 하고, 이는 전압 및 전류를 정확하게 포착하고 동시에 측정을 하는 것을 말한다[56]. 또한 개별 전원 공급기, 디지털 멀티미터 (DMM), 전류 소스, 전자 부하기의 기능을 하나의 정밀한 장비로 작업할 수 있게 해준다. 가장 기본적인 레벨에서 SMU 계측기는 전류-전압(I/V) 특성화를 위해 완벽하게 통합된 일체형 솔루션이다. 즉, 파워플라이와 디지털 멀티미터, 파형발생기를 하나의 계측기에 결합시킨 것이다. SMU 계측기는 전류를 측정하면서 전압을 소싱하거나 싱크하고, 전압을 측정하면서도 전류를 소싱하거나 싱크할 수 있다. 이러한 일체형 계측기 솔루션은 정밀 파워 공급 장치 기능, 실 전류 소스, 6½ 자릿수 디지털 멀티미터 (DMM) 임의 파형 발생기, V 또는 I 펄스 발생기와 측정, 전자 부하 및 트리거 컨트롤러를 결합했다. 하지만 SMU의 실질적인 강점은 동시에 소싱하고 측정하는 기능으로, 개별 측정 장치에 비해 더 빨라진 테스트 시간, 간소해진 연결, 향상된 정확도, 더 쉬워진 프로그래밍을 포함한 여러대의 장비를 하나의 장비로 대체 할 수 있는 비용 효과적인 점이 가장 큰 장점이다. 이러한 면밀한 통합으로 인해 SMU 계측기는 돌발적인 과부하, 열 손실 및 기타 문제로 인한 손상으로부터 테스트 중인 장치를 보호한다. 이러한 장점으로 인해 SMU 계측기는 반도체와 기타 비선형 장치 및 소재의 특성화 테스트에 적합하게 설계되어 있다.

SMU 계측기는 파워 공급 장치보다 훨씬 더 많은 애플리케이션에 사용할 수 있다. SMU 계측기는 속도와 정밀성을 고려하여 설계되었으므로 상승 시간은 파워 공급 장치보다 훨씬 빠르며 SMU 장치의 측정 불확실성은 훨씬 낮아진다. 그리고 SMU 계측기는 파워 공급 장치보다 훨씬 더 폭 넓은 작동 범위 및 분해능을 제공 하고 있다. 일반적인 파워 공급 장치는 2분원 작동으로 알려진 전압 및/또는 전류의 소스 역할만을 할 수 있다. 하지만 SMU 계측기는 소스 및 싱크 역할을 할 수 있으므로 전체 4분원 작동이 가능하고, 파워 공급 장치와 전자 부하로서 작동이 가능하다. 이 기능은 배터리, 태양 전지 또는 기타 에너지 생

성 장치를 특성화 할 때 특히 유용하다. 소스나 싱크가 작동하는 동안 SMU 계측기는 전압, 전류 및 저항을 동시에 측정할 수 있다.

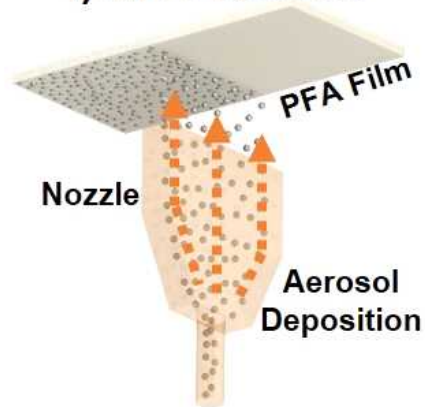
SMU는 내부 소싱 기능으로 많은 어플리케이션에서 측정 불확실성을 감소 시킬 수 있다. SMU가 기본적으로 전압을 측정할 경우 전압 측정 어플리케이션에서 원하지 않는 오류를 일으킬 수 있는 모든 시스템 레벨 누설 전류(예: 케이블 노이즈)를 상쇄시키거나 억압할 수 있어 좀 더 정밀하게 전압을 측정 할 수 있다. 전류 측정의 경우 SMU 계측기의 내장 소스 및 “피드백 암미터“ 설계로 전압 부담을 낮게 유지하고 sub-pA 레벨까지 저전류를 측정할 수 있다. 정밀 디지털 멀티미터 (DMM)는 내장 소스를 가지고 있지 않으며, 일반적으로 저전류 기능을 nA 레벨로 제한하는 “선트 암미터“ 설계방식이다. 저항 측정의 경우 SMU 계측기 아키텍처는 테스트 중인 장치로 소싱되는 전류 또는 전압량에 완벽한 유연성을 제공한다. DMM은 저항을 측정하기 위해 사용되는 범위에 따라 달라지는 고정 전류 소스 값만 가진다. SMU 계측기는 저항을 측정하는 완벽한 프로그래밍 가능 소스 값을 제공한다. 이는 테스트 중인 민감한 장치를 보호하고 매우 높은 또는 낮은 저항을 측정하는 데 매우 유용할 수 있다. 높은 저항 측정의 경우, 소스 전압 방법을 주로 사용한다. 그리고 낮은 저항 측정의 경우에는 소스 전류 방법을 가장 많이 사용한다. 일부 SMU 계측기에는 회로의 원하지 않는 병렬 저항 경로의 효과를 차단하는 6개 와이어 저항 기능이 있다.

## 제 3 장 실험 방법

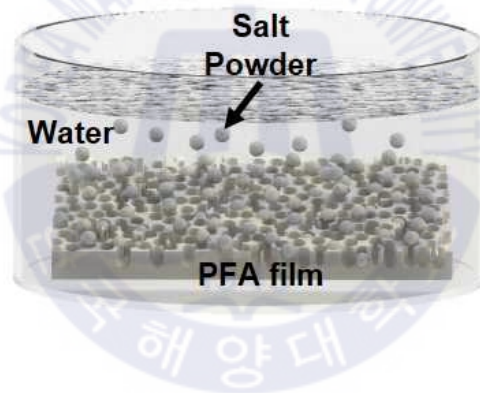
### 3.1 저진공 환경에서 친환경적인 공정을 이용한 나노구조체 제작 방법

식용의 소금을 에탄올과 섞어 planetary milling을 이용하여 3 시간 동안 150 rpm으로 분쇄를 하였다. Planetary milling을 끝낸 후, 소금 용액을 80 °C에서 1 시간 건조를 하여 에탄올을 증발시켰다. 응집된 소금 분말 덩어리들은 알루미늄 나 유발로 분쇄하여 미세 입자를 형성하였다. Fig. 3.1는 마찰 대전의 향상을 위한 접촉 영역을 증가시키기 위해 AD 공정에 의해 가속된 NaCl 나노 입자를 사용하는 나노구조체 제작 공정을 보여준다. 다음은 그 과정에 대한 상세한 설명이다. i) 수습에서 수백 나노미터의 크기를 가진 소금 분말은 음속 근처 (~300 m/s)까지 가속되어 높은 운동에너지를 가진 나노 총알을 형성하고, 이어서 실온에서 진공 (~0.5 Torr) 챔버에서 AD 공정에 의해 마찰 전기 계열에서 높은 전기 음성도를 갖는 PFA 필름 (두께 : 50  $\mu\text{m}$ )의 표면에 박혀졌다[57, 58]. AD 공정의 경우, 나노 소금 입자와 운송 가스의 혼합물이 튜브를 통하여 노즐로 이송하고 (유속 : 28 L/min) 직사각형 형상의 노즐 (슬릿 사이즈 : 35 x 0.5mm<sup>2</sup>)로부터 분사하여, 실온에서 0.5 Torr의 기저 진공 압력을 갖는 진공 챔버 내의 PFA 필름에 충돌한다. 시료 홀더의 수평 이동 속도는 3.1 mm/s이고 증착에 사용한 PFA 필름의 길이는 50 mm이므로 나노 구조화 된 PFA 필름의 제작 시 증착 시간은 16 초이다. 이 실험에 사용되는 소금 분말의 크기는 Fig. 3.2를 참고하면 된다. 우리는 이 분말과 운송 가스의 혼합물을 aerosol 상태라고 한다[59].

### i) AD Process



### ii) Water Dissolution



### iii) Nanostructured PFA

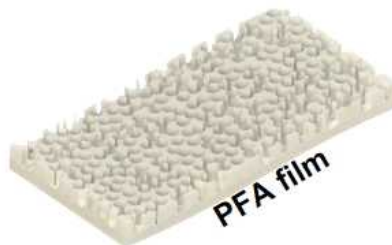


Fig. 3.1 AD 공정과 소금 나노 입자를 활용한 나노구조체 형성 과정



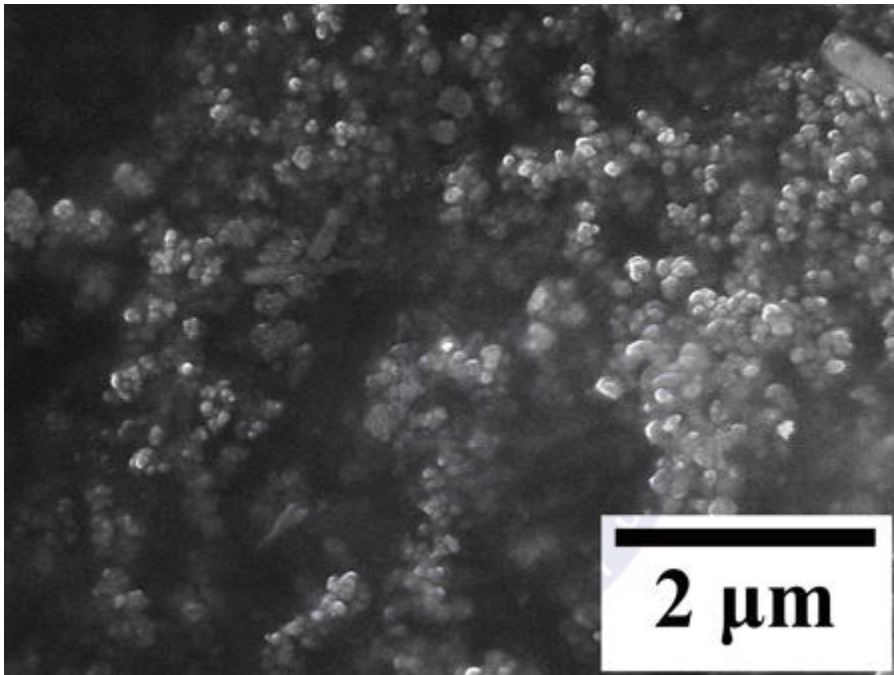


Fig. 3.2 NaCl 나노 입자의 SEM 사진



소금 입자는 이 실험에서 환경 친화적이고 수용성이라는 이점을 제공한다 [60]. ii) 박혀 있는 소금 나노 입자를 용해하기 위해 PFA 필름을 60 °C에서 초음파 세척기에 넣고 1시간 동안 세척을 하여, 복잡한 나노구조체를 가진 표면을 만들었다. Triboelectric series 에서 NaCl은 강한 양극 물질로 마찰전기 하베스터의 발전 성능에 심각한 저하를 일으킬 수 있기 때문에 소금 입자는 음극 소재인 PFA 필름에서 제거되어야 한다[61]. iii) PFA 필름의 나노구조체 형성 공정은 물을 건조함으로써 완성된다. 캔틸레버 구조의 MMTEG를 제작하기 위하여 후면에 Au 전극을 코팅을 한 후, 접착층을 이용하여 Ti 기판 (두께: 300  $\mu\text{m}$ )에 부착하였고, 7 개의 NdFeB 자석을 질량체로 사용하여 교류 자기장 내에서 반복적인 위아래 운동을 할 수 있도록 하였다[8]. Al 호일은 15  $\mu\text{m}$ 의 두께를 가지고 있고, 마찰전기 하베스터의 양극 소재로 PFA 표면의 상부에 위치한다. Al 호일과 PFA 필름의 조합은 각각 양과 음의 전하친화도로 인해 고성능의 마찰전기 하베스팅을 유도할 수 있다.

### 3.2 유한요소해석을 이용한 소자구조 설계 및 특성 예측

이론 시뮬레이션은 COMSOL Multiphysics 프로그램을 이용하여 수행되었다. 시뮬레이션 계산을 위해 Table 3.1과 같이 Ti과 NdFeB 자석, PFA 필름의 기계적 파라미터 (Young's modulus와 밀도, Poisson's ratio)를 입력했다.

Table 3.1 시뮬레이션에 필요한 물질들의 파라미터

Materials	Young's modulus (GPa)	Density(kg/m <sup>3</sup> )	Poisson's ratio
Ti	78	4506	0.32
NdFeB	160	7500	0.24
PFA	0.48	2200	0.46

### 3.3 MME 마찰전기 하베스터 제작 및 출력특성 평가

헬름홀츠 코일은 구리선 (직경 : 1.4 mm)과 베이클라이트 프레임으로 구성된 단일 축 유형이다. 헬름홀츠 코일의 내부 직경과 코일 쌍 사이의 거리는 125와 62.5 mm이며 헬름홀츠 코일의 축을 따라 중심점에서 22.5 mm의 범위에서 균일한 자기장이 생성된다. 코일의 저항과 인덕턴스는 각각  $1.07 \Omega$ 과 1.5 mH이다. 헬름홀츠 코일은 1 A의 입력 교류 전류를 통해 6 Oe의 자기장을 발생시킬 수 있도록 설계되었으며, 우리는 헬름홀츠 코일에 1.2 A의 교류 전류를 인가하여 코일의 중앙 영역에 7 Oe의 자기장을 발생시켰다. 교류 자기장 내에서 MMTEG의 출력 전압과 전류를 측정하기 위하여 디지털 오실로스코프 (WaveSurfer 44MXs-A, Teledyne Lecroy) 와 Sourcemeter(2611A, Keithley)를 각각 사용하였다.



## 제 4 장 실험 결과

### 4.1 MMTEG의 나노구조체

#### 4.1.1 MMTEG의 작동 원리

Fig. 4.1의 그림은 마찰전기 효과를 이용한 MMTEG 하베스터의 작동 원리와 교류 자기장 내에서 캔틸레버의 진동에 의한 정전기 유도를 보여준다[15, 62]. 전하의 이동은 2개의 마찰전기 층의 초기 접촉 이전의 원래 상태에서는 발생하지 않는다 (Fig. 4.1-i). PFA 필름과 Al 호일의 표면이 외부 자기장에 반응하는 캔틸레버 구조물의 움직임에 의해 접촉 될 때, PFA 필름의 상부 표면에 음전하가, Al 호일의 하부 표면에는 양전하가 생성된다 (Fig. 4.1-ii). 음이온은 triboelectric series에서 양의 방향에서 음의 방향으로 제공된다. 이 두 표면이 순간적으로 분리되면 PFA 필름과 Al 호일의 표면에 양과 음의 마찰 전하가 남아 PFA 필름의 Au 전극에는 반대 전하가 유도된다 (Fig. 4.1-iii). Fig. 4.1-iv에 제시된 것과 같이, 생성된 전하들이 완전히 방출된 상태가 달성 될 때까지 전체 전기 중립성을 만족시키기 위해 두 마찰전기 층 사이의 전위차에 의해 전자 흐름이 생성된다. 그 후, 상향 방향으로의 진동은 두 개의 마찰전기 층 사이의 거리를 다시 감소시켜 두 개의 마찰전기 층의 거리를 감소시켜 갭 내의 쌍극자 모멘트 감소를 초래하고, 전위차의 변화는 축적된 전하를 제거하기 위해 상부 Al 호일에서 하부 Au 전극으로 전자 흐름을 생성한다.

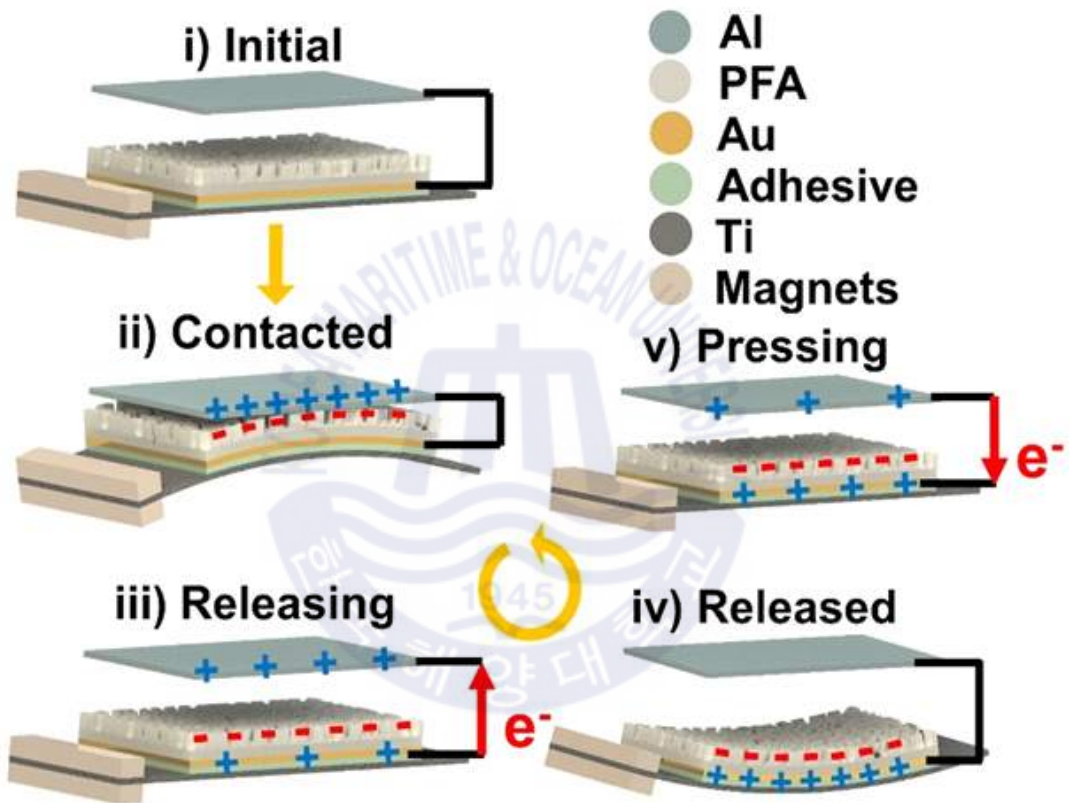


Fig. 4.1 교류 자기장에서 MMTEG의 작동 메커니즘

#### 4.1.2 MMTEG 시스템

Fig. 4.2는 헬름홀츠 코일에 의해 유도된 교류 자기장 내에서 MMTEG의 출력 성능을 측정하기 위한 실험 장치를 보여준다. 나노구조체를 가진 PFA 필름과 Ti 기판, 영구 자석으로 구성된 캔틸레버 구조체의 한 쪽 끝을 베이클라이트와 비자성 금속 (inset of Fig. 4.2)으로 고정시키고 헬름홀츠 코일 내부에 설치하였다. Al 호일은 최대 출력을 얻기 위하여 약 1 mm의 최적화 된 간격을 두고 캔틸레버 구조체 위에 위치 시켰다. 마찰전기 하베스터에서 두 층의 간격 거리가 증가할수록 특정 지점에 도달하기 전까지 출력 성능이 증가하기에 PFA 필름과 Al 호일 간의 간격은 중요한 요인이다[36]. 헬름홀츠 코일은 MMTEG 샘플 주변에 균일한 교류 자기장을 만들 수 있으며 자기장은 입력 교류 전류를 제어하여 간단히 조절할 수 있다[63]. 검증 질량체 (proof mass)인 자석은 주변 교류 자기장과 상호 작용하는 인력과 척력에 의한 캔틸레버 구조체의 지속적인 진동을 유도하였다. 또한 캔틸레버 운동의 진폭은 공진 상태에서 비공진 조건보다 훨씬 클 수 있기 때문에 자석의 개수 또는 위치를 조정하여 하베스터의 공진 주파수를 조정할 수 있다[64].

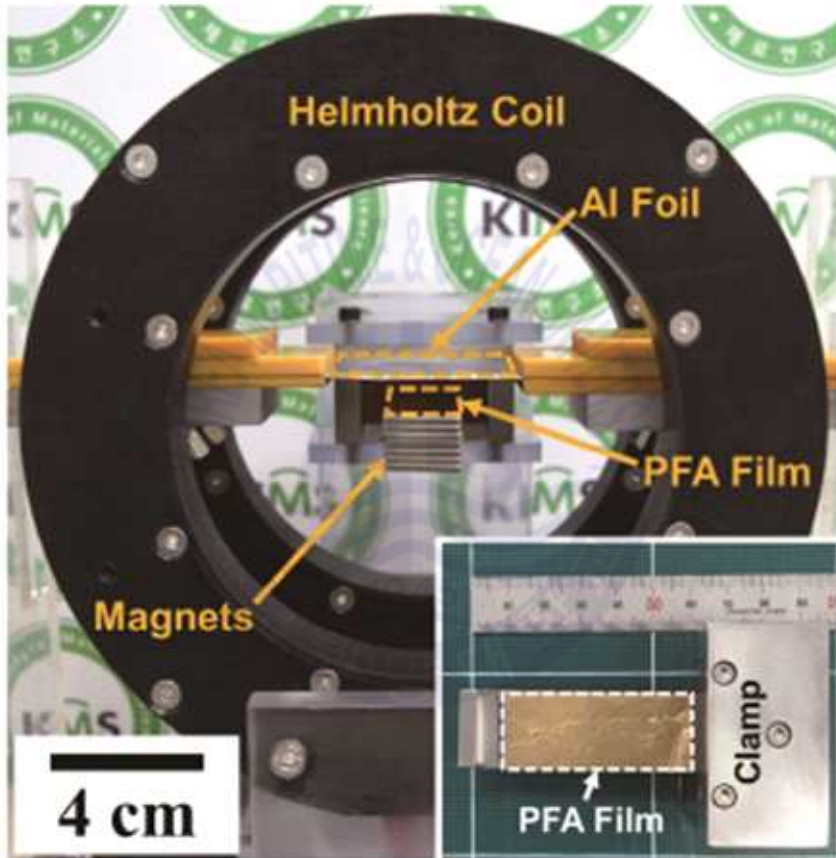


Fig. 4.2 MMTEG 시스템 사진. 삽입된 사진은 캔틸레버 구조의 클램프 파트



### 4.1.3 FE-SEM

Fig. 4.3 은 소금이 씻겨 나간 후의 PFA 필름 표면의 SEM 사진을 보여준다. Fig. 4.4(a)에 제시된 것처럼 나노구조체는 PFA 필름의 표면의 전체 영역에 균일하게 형성되었으며, Fig. 4.4(b)에서는 소금 나노 입자는 수용성을 가지고 있어서 물에 의해 필름 표면에서 완전히 사라졌음을 확인할 수 있다. 초기 상태의 사진인 Fig. 4.5와 비교하여 보았을 때, NaCl 분말이 가속되고 이후 물에서 용해되는 공정이 간단하고 빠르며 환경 친화적인 방법으로 목표 물질의 표면에 나노구조체를 성공적으로 만들 수 있다는 것을 확인했다.



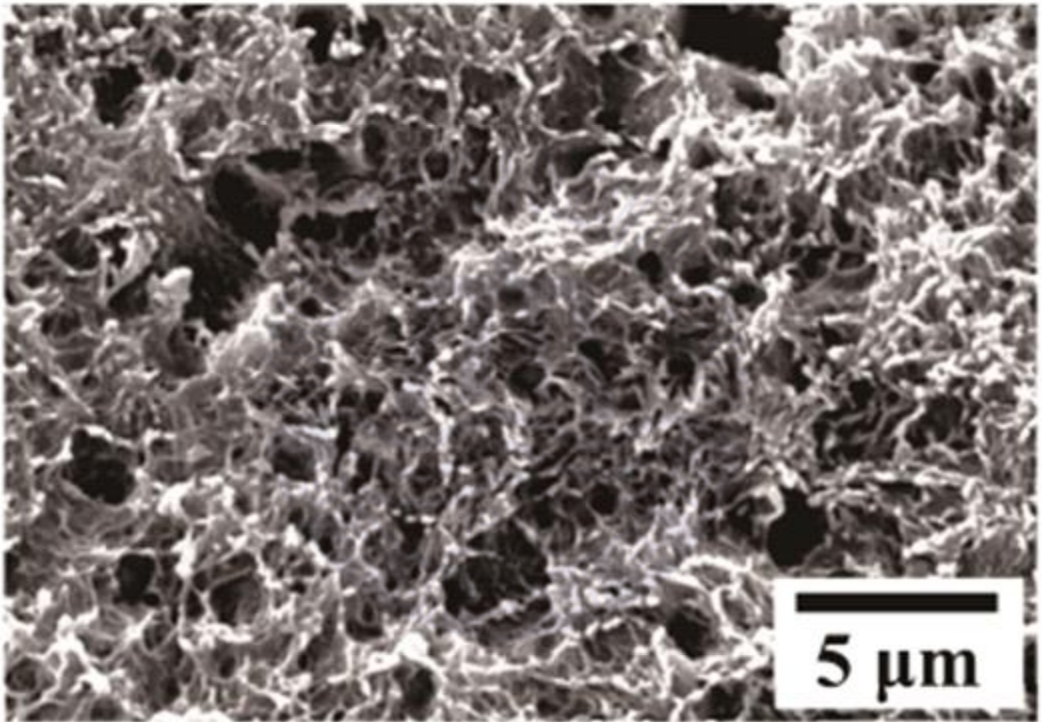


Fig. 4.3 나노구조체를 가진 PFA 필름의 상부 SEM 사진

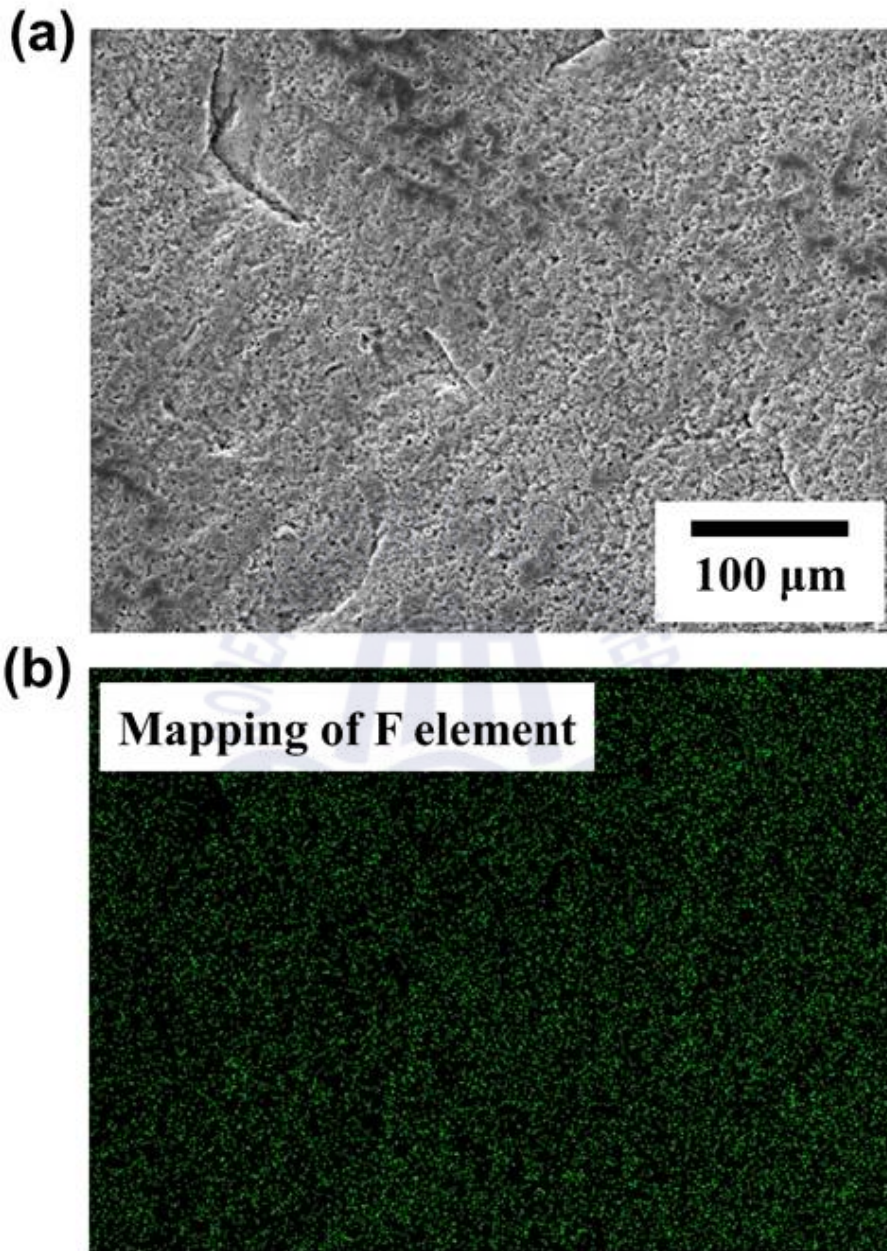


Fig. 4.4 (a) PFA 필름의 전체영역에서 나노구조체가 형성된 것을 보여주는 SEM 사진. (b) 나노 구조체를 형성한 표면의 Fluorine 원소를 검증하기 위한 에너지 분산 분광법의 매핑 (mapping) 결과

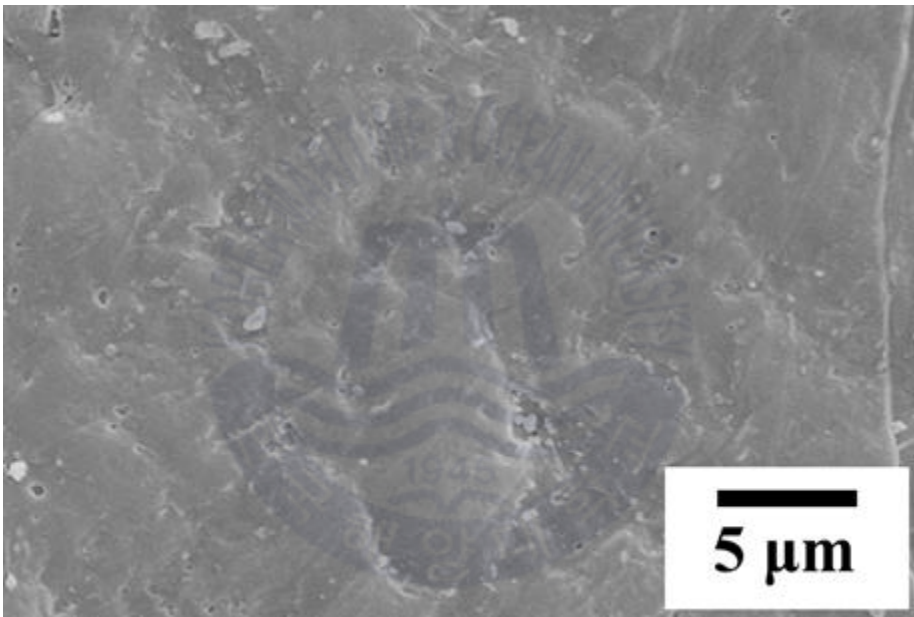


Fig. 4.5 나노구조체가 형성되기 전의 평평한 PFA 필름의 SEM 사진

#### 4.2.1 XPS

나노 구조체가 형성된 표면의 원소 조성은 X-선 광전자 분광법 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)을 사용하여 분석하였고 그 결과는 Fig. 4.6과 같다. PFA 필름의 원래 성분으로 표면에 수많은 Fluorine 원자가 존재하는 한편, Fig. 4.7에 표시된 것처럼 Na과 Cl 성분의 영역을 확대하여 측정한 XPS 검사에서 노이즈만 관찰되는 것을 확인 할 수 있다. 또한, Fig. 4.8에 나와 있듯이 표면을 플라즈마로 깎아가면서 측정한 결과에도 Na와 Cl 의 원소는 관찰되지 않고 Fluorine과 Carbon, Oxygen 성분만 관찰되었는데, 이는 마찰전기 표면으로부터 소금 분말이 완벽히 제거되었음을 보여준다. 여기서 Fluorine 원소는 전기적으로 음성인 것으로 널리 알려져 있어, 고성능의 마찰전기 하베스터의 작동을 가능하게 도와준다[65].



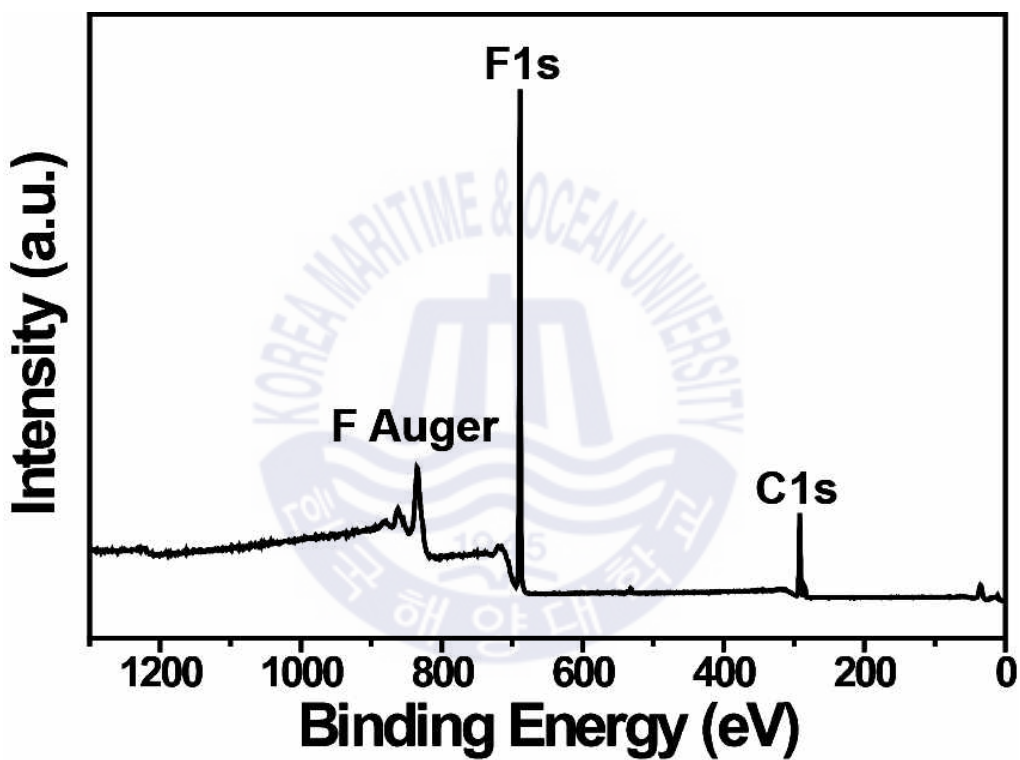


Fig. 4.6 나노구조체를 가진 PFA 필름 표면의 XPS 결과



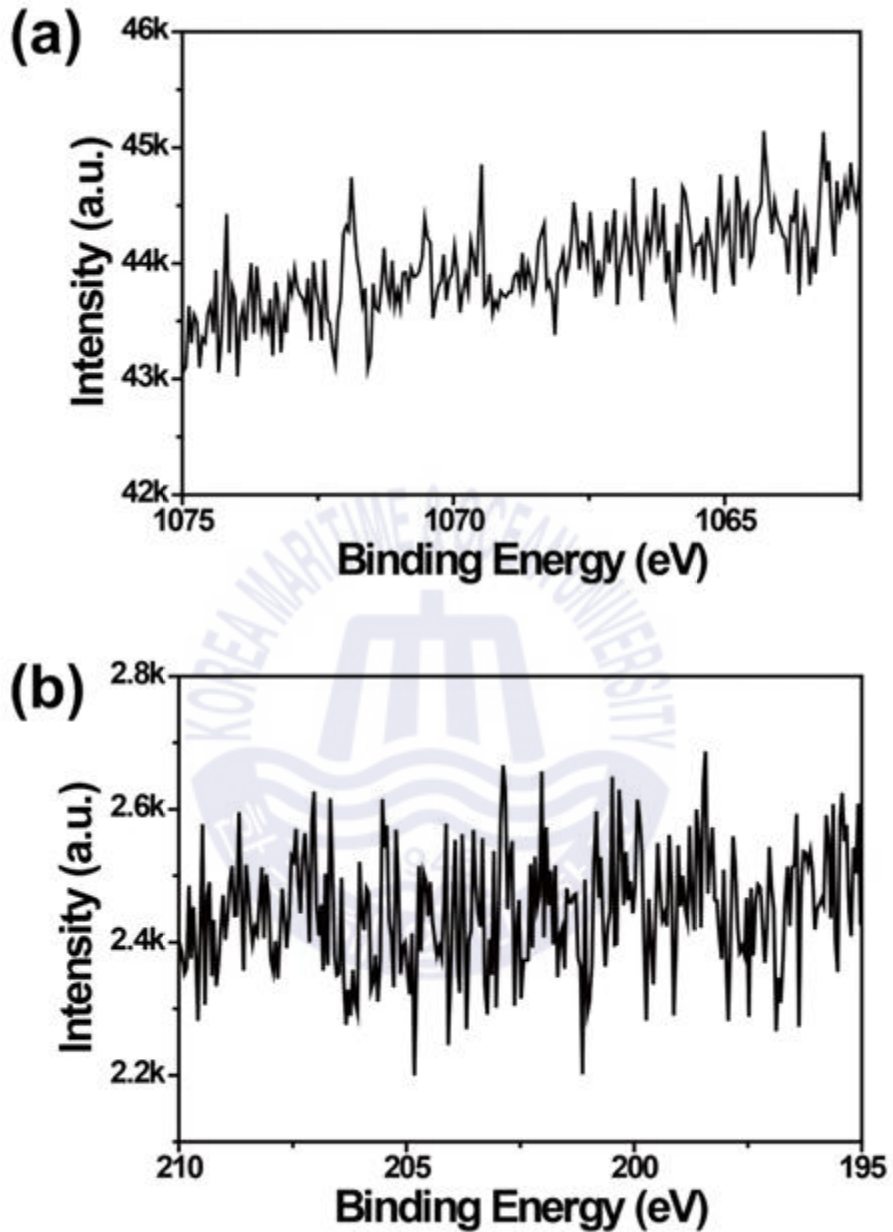


Fig. 4.7 XPS를 이용하여 잔류 Na (a) 와 Cl (b)의 성분을 확인하기 위한 나노구조체가 형성된 PFA 필름의 표면 분석 결과. 이 그래프는 노이즈로써 Na와 Cl 원소는 NaCl의 용해 과정 후 관찰되지 않음을 확인할 수 있다



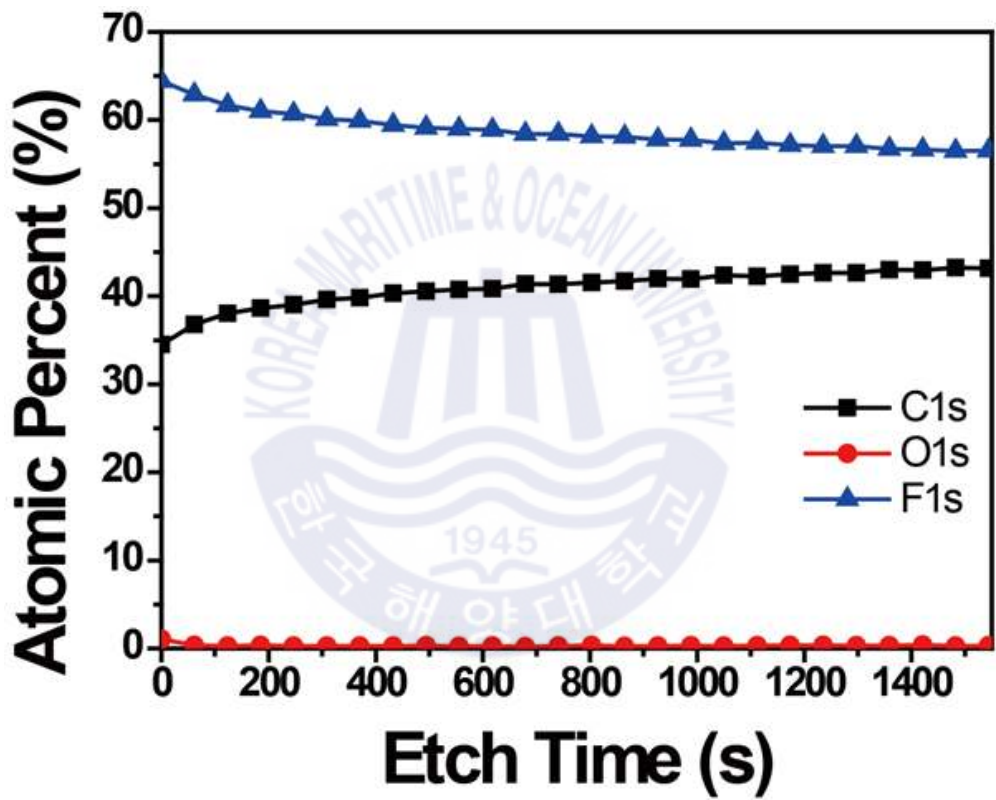


Fig. 4.8 표면을 에칭 하면서 측정한 XPS 분석 결과

## 4.2 MMTEG의 전기적 출력 측정

### 4.2.1 전압, 전류, 전력 특성

본 실험에서는 균일한 교류 자기장을 발생시키는 헬름홀츠 코일을 사용하여 MMTEG의 출력 성능을 알아보았다. 캔틸레버 구조의 전체 면적은  $60 \times 20 \text{ mm}^2$ 이고, 마찰전기 PFA 필름의 활성 영역은  $50 \times 20 \text{ mm}^2$ 이다. MMTEG의 공진 주파수는 캔틸레버 끝에 7 개의 자석 질량체 (총 10.5 g)를 고정된 상태에서 143.2 Hz 이었다. 마찰전기 하베스터의 성능에 대한 나노 구조의 효과를 검증하기 위해, MMTEG를 작동 시 표면처리가 된 PFA 필름과 아무런 처리를 하지 않는 대조 시료들 간의 출력을 비교하였다. Fig. 4.9와 Fig. 4.10을 보았을 때, 143.2 Hz에서 7 Oe인 교류 자기장 내에서 나노구조체가 있는 시료는 open-circuit peak-to-peak voltage ( $V_{pp}$ )와 단락 전류의 값은 708 V, 277  $\mu\text{A}$ 이고 나노구조체가 없는 시료는 448 V, 118  $\mu\text{A}$ 를 보여주었다. 나노 탄환 AD 공정은 에너지 하베스팅을 위해 각각 158 % 및 235 %의 출력 전압과 전류를 획기적으로 향상시킬 수 있다.

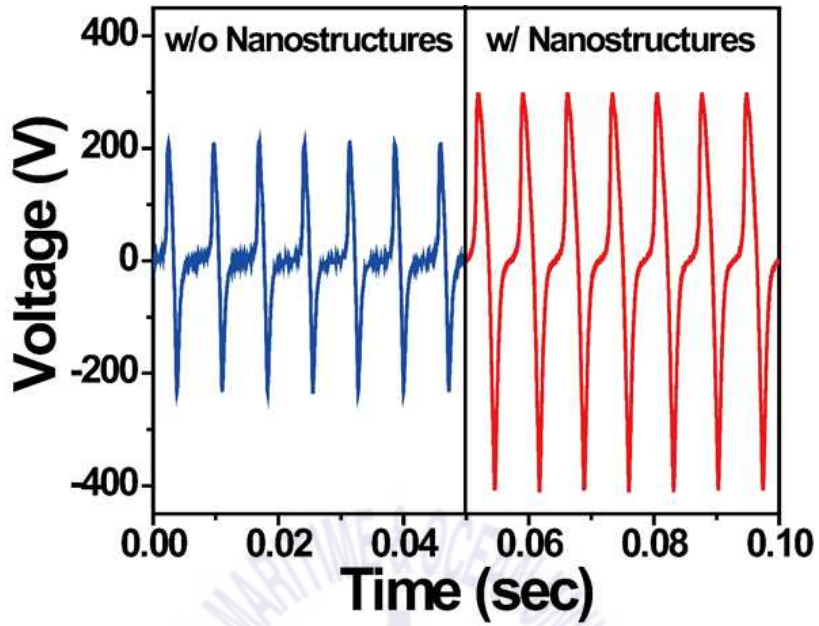


Fig. 4.9 나노 구조체가 있는 MMTEG와 없는 MMTEG 소자의 개방 회로 전압

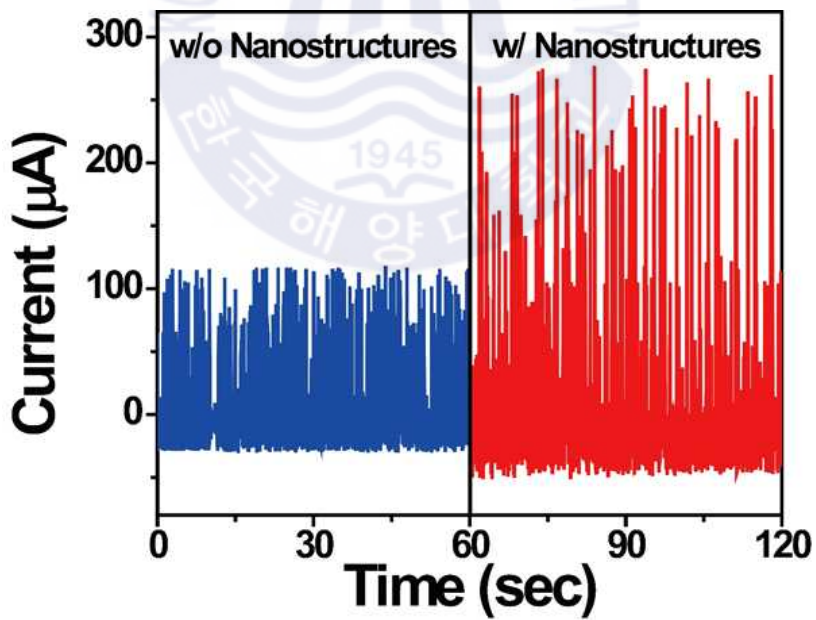


Fig. 4.10 나노 구조체가 있는 MMTEG와 없는 MMTEG 소자의 단락 회로 전류

Fig. 4.11(a) 에서 보듯이 3 Oe에서 11 Oe까지의 서로 다른 자기장에 반응하여 나노구조체를 가지는 MMTEG의 전기 출력을 측정하였다. 전압 출력은 자기장의 증가에 따라 증가하였고 9 Oe 지점에서 거의 포화 되었다라고 할 수 있는데, 이는 9 Oe에서 11 Oe 사이의 출력 향상이 3 Oe 에서 9 Oe의 영역에 비해 현저하게 감소되었기 때문이다.



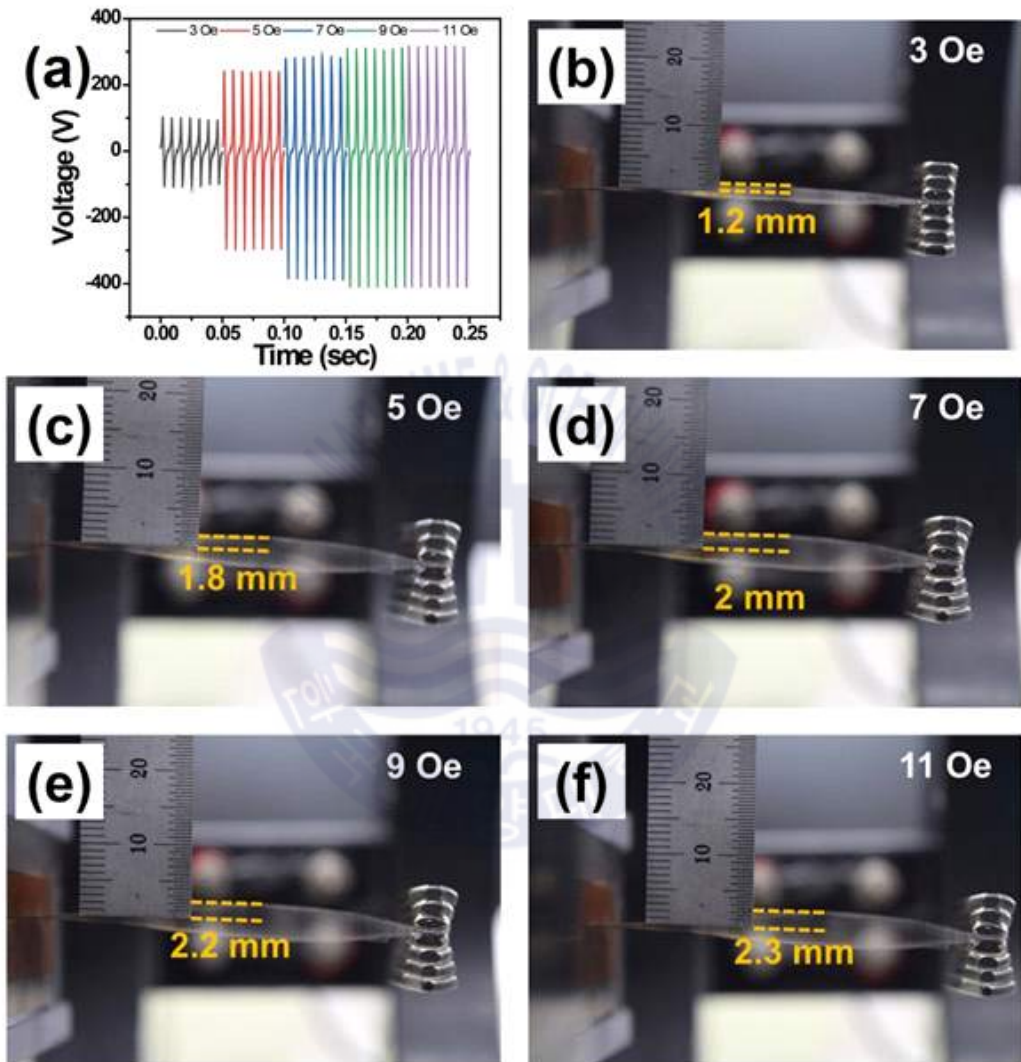


Fig. 4.11 (a) Ti 기판으로 만든 MMTEG의 교류 자기장의 세기에 따른 개방 회로 전압 출력, (b) ~ (f) 자기장의 변화에 따른 캔틸레버의 변위의 변화를 보여 줌

또한 Fig. 4.12를 보면, 똑 같은 두께와 넓이를 가지는 SUS 304 스테인리스 기관으로 변경하여 전압을 평가했다. 일반적으로 출력 전압은 자기장의 크기가 증가함에 따라 증가한다. 그러나 SUS 304 스테인리스 철 기관과 Ti 기관을 비교할 때, 유연한 Ti 기관의 출력 전압은 두 번째 공진 주파수에서 현저히 높다. 이는 각각의 기관 탄성 계수가 SUS 304는 193 GPa이고 Ti는 77.4 GPa 이기에, 똑 같은 힘이 가해졌을 때, 얼마나 쉽게 변위가 생길 수 있는 정도의 차이 때문이다.



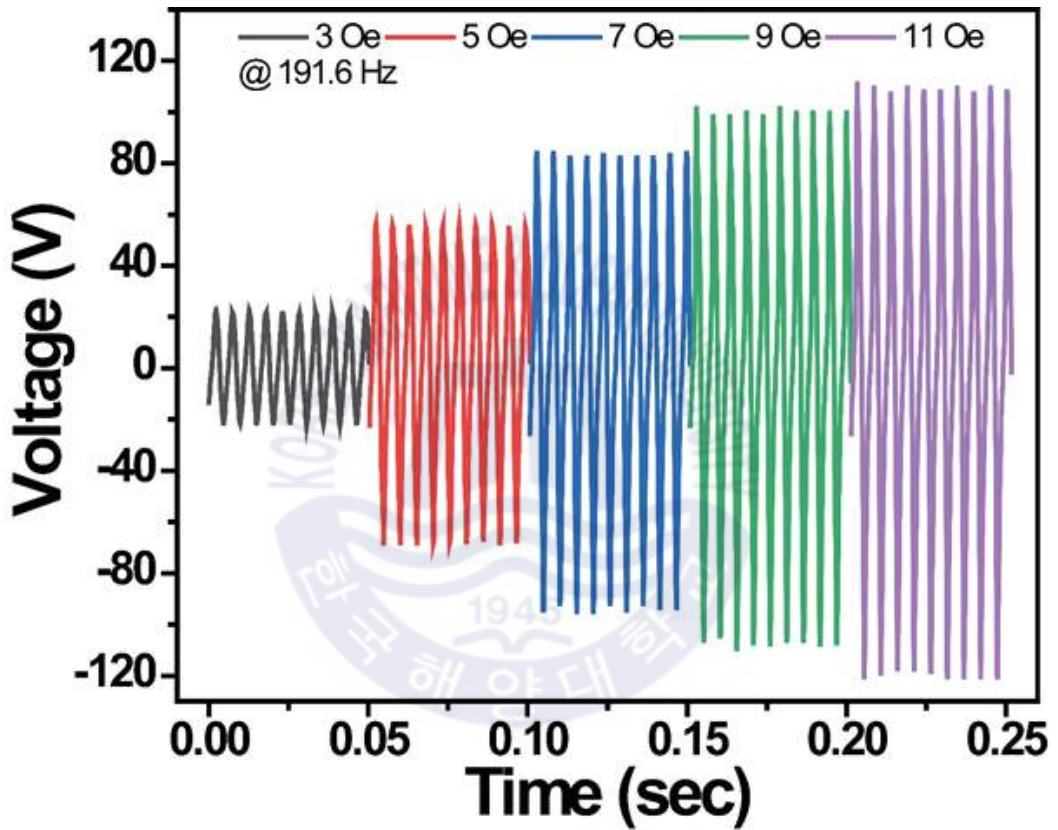


Fig. 4.12 기판이 SUS 304로 만들어진 MMTEG의 자기장 변화에 따른 개방 회로 전압 출력



나노구조체의 유무에 따른 MMTEG의 출력 피크 전력을 비교하기 위해, Fig. 4.13 과 Fig. 4.14에서 볼 수 있듯이 143.2 Hz에서 7 Oe인 교류 자기장 내에서 1 k $\Omega$ 부터 1 G $\Omega$ 까지의 외부 저항으로 절대 피크 전압 ( $\Delta V$ ) 을 측정하였다.  $\Delta V$ 는 점진적으로 증가하여 1 G $\Omega$ 저항에서 포화 되었다. 전력 계산을 위해  $\Delta V$ 의 제곱을 저항으로 나눈다 ( $P=V^2/R$ ,  $P$ 는 전력이고  $V$ 는 출력 전압,  $R$ 은 저항). 그 결과, 나노 구조체를 가진 MMTEG의 최대 전력은 2x10<sup>6</sup> $\Omega$ 의 저항에서 21.8 mW이고, 이는 3x10<sup>6</sup> $\Omega$ 에서 3.8 mW의 최대 피크 전력을 갖는 평탄한 PFA 샘플에 비해 5.7 배 더 높았다. 나노구조체를 가진 MMTEG의 출력이 다음과 같이 해석 할 수 있다; 거친 형태를 갖는 AD 나노 탄환 표면 처리는 표면처리를 하지 않은 것과 비교하여 더 큰 마찰전기 접촉면적을 야기하고, 두 소재 사이의 더 강한 마찰은 패터화 되지 않는 표면보다 더 많은 표면 전하를 만들어 낼 수 있다고 설명할 수 있다[42].



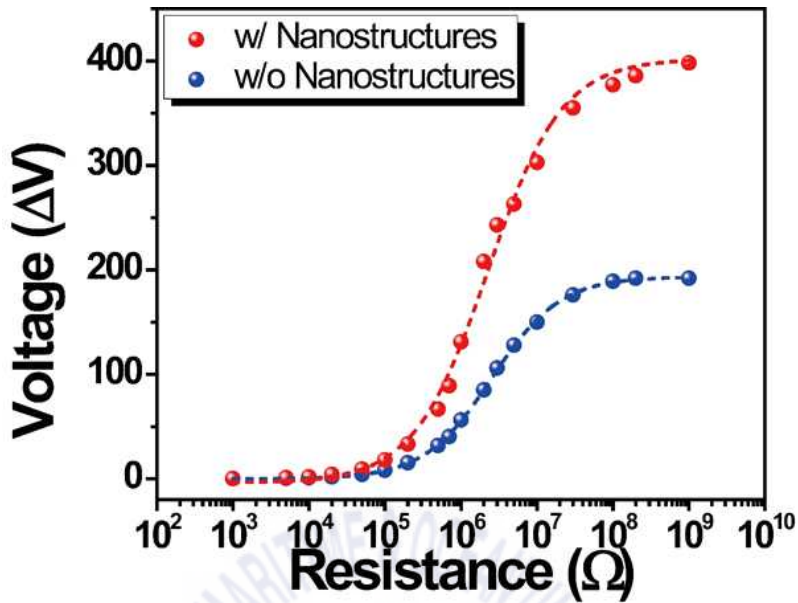


Fig. 4.13 나노구조체가 있는 MMTEG와 없는 MMTEG의 다양한 부하 저항 ( $1 \text{ k}\Omega \sim 1 \text{ G}\Omega$ ) 에서 측정된 절대값 피크 전압

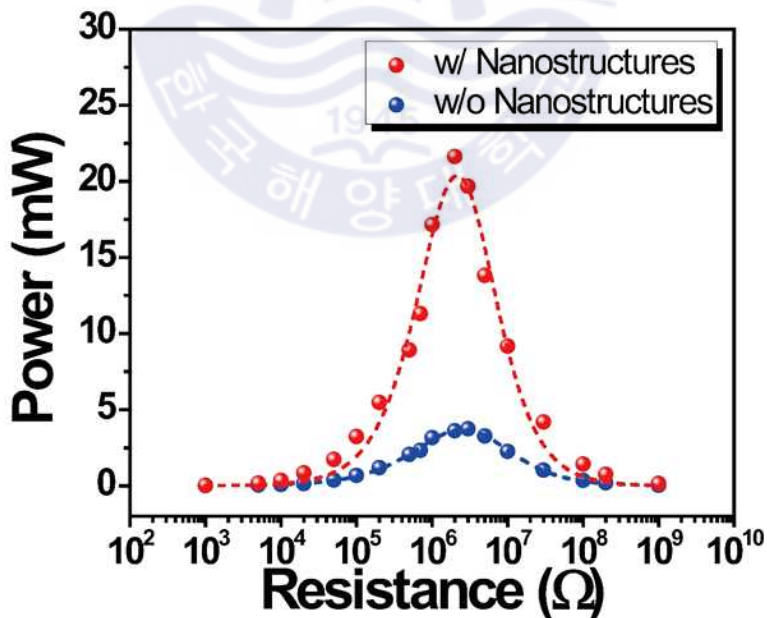


Fig. 4.14 나노구조체가 있는 MMTEG와 나노구조체가 없는 MMTEG의 피크 전력

또한 Fig. 4.15에서 보는 것처럼 MMTEG는 1 초당 4.8 mJ (4.8 mW)의 연속 교류 출력을 만들어 낼 수 있는 것을 볼 수 있다. 전력은 하베스터의 교류 출력 파형을 적분하여 계산하였다. 이것은 최근에 보고된 압전 단결정 기반의 MME 하베스터 (4.6 mW)보다 더 큰 출력을 보여준다[9]. 이전에 보고된 마찰전기 나노 발전기 중 많은 경우에, 하베스팅 작업은 불연속 적이거나 충동적이므로 마찰전기 나노 발전기로부터 생성된 전력은 작을 수 있다[35]. 반대로 본 실험에서 제작된 MMTEG는 공진 모드에서 동작하기 때문에, 출력 신호는 압전 공진 모드 발생기 (즉, 정현파 출력)와 유사하므로 생성된 연속적인 전력은 다른 마찰전기 발전기보다 클 수 있다.



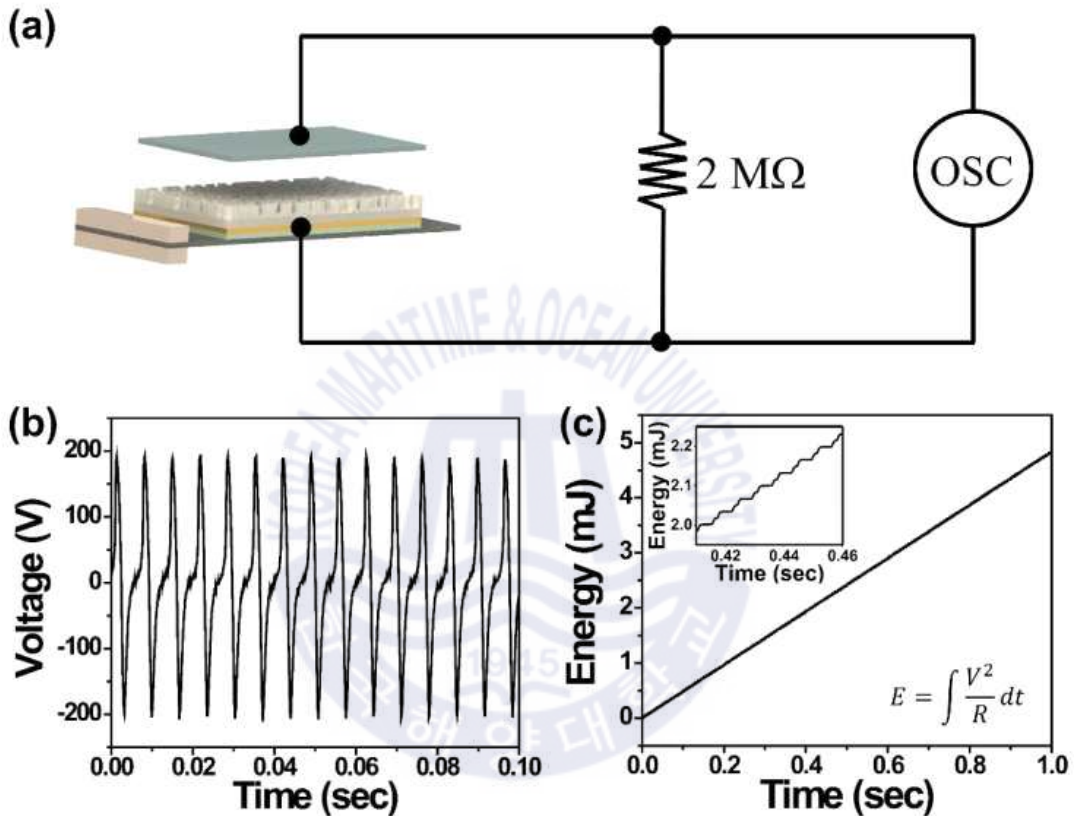


Fig. 4.15 (a) 143.2 Hz에서 7 Oe의 교류 자기장 하에서 MMTEG와 2 MΩ의 부하 저항, 오실로스코프를 사용하여 연속 교류 출력 전력을 측정하기 위한 회로도. (b) 2 MΩ의 저항으로 MMTEG에서 생성된 출력 전압. (c) MMTEG에서 1초동안 생성된 전기 에너지. 마찰전기 하베스터는 4.8 mW (1 초동안 4.8 mJ)의 교류 전력을 연속적으로 발전할 수 있다

## 4.2.2 내구성 평가

출력의 안정성과 기계적 내구성은 에너지 하베스터의 중요한 특성이다[66, 67]. MMTEG의 피로 특성을 평가하고자 얇은 금속 층인 Al 호일을 기계적으로 지지하기 위해 두께가 약 50  $\mu\text{m}$ 인 탄성체인 polydimethylsiloxane (PDMS)을 Al 호일의 뒷면에 코팅을 하였고, Fig. 4.16에 제시된 바와 같이 최대 출력  $V_{pp}$ 는 143.2 Hz에서 7 Oe인 교류 자기장 내에서 3500만 사이클 동안 기록되었다. PDMS 층이 없다면 내구성 시험에서 Al 호일에서 균열이 쉽게 발생하고, MMTEG는 원래의 출력 성능을 유지하지 못한다. Fig. 4.16에 삽입된 그래프는 초기 상태 (685 V)와 100만 사이클 (672 V), 3300만 사이클 (651 V)에서의 시간에 따른  $V_{pp}$  그래프를 보여준다. 3300만 사이클 동안 5 % 미만의 전기적 출력 변동을 관찰하였다. 그 결과, MMTEG는 3300만 사이클 동안 뛰어난 내구성을 가지고 있음을 확인하였으며, 이는 비접촉식을 포함한 다른 마찰대전형 나노 발전기에 비해 월등히 뛰어났다[68-72]. MMTEG의 내구성은 자가발전 전자시스템의 실제 응용을 위한 장치 구조 및 마찰 재료의 추가적인 최적화로 증가 될 수 있다.



Fig. 4.16 나노 탄환으로 만들어진 MMTEG의 3300만 번의 진동 주기  
(68시간)동안의 작동 안정성 테스트 결과

### 4.3 유한요소해석을 이용한 소자 구조 설계 및 특성

캔틸레버 형 MMTEG의 작동 원리를 밝히기 위해 유한요소해석 (Finite Element Analysis, FEA) 프로그램을 이용하여 기계적 공진 모드와 생성된 마찰 전위를 분석하기 위한 이론적 시뮬레이션을 수행했다.

#### 4.3.1 소자 구조 설계

하베스터의 고유 주파수 모드 (Eigenfrequency mode)는 공진 주파수에서 직사각형 빔의 변형 형상을 검증하기 위해 사용하였다. 분석을 위해 캔틸레버의 한쪽 끝을 고정하고 반대쪽 끝 부분에 질량체로 자석을 배치했다. Fig. 4.17에 제시된 것과 같이, 캔틸레버 구조의 소자에 대한 휨 및 비틀림, 축 변형 등의 다양한 공진모드가 있을지라도, 휨 모드는 각 마찰전기 층을 효과적으로 부딪치기 위한 위아래 동작을 제공할 수 있기 때문에 MMTEG에 가장 적합할 수 있다[73].



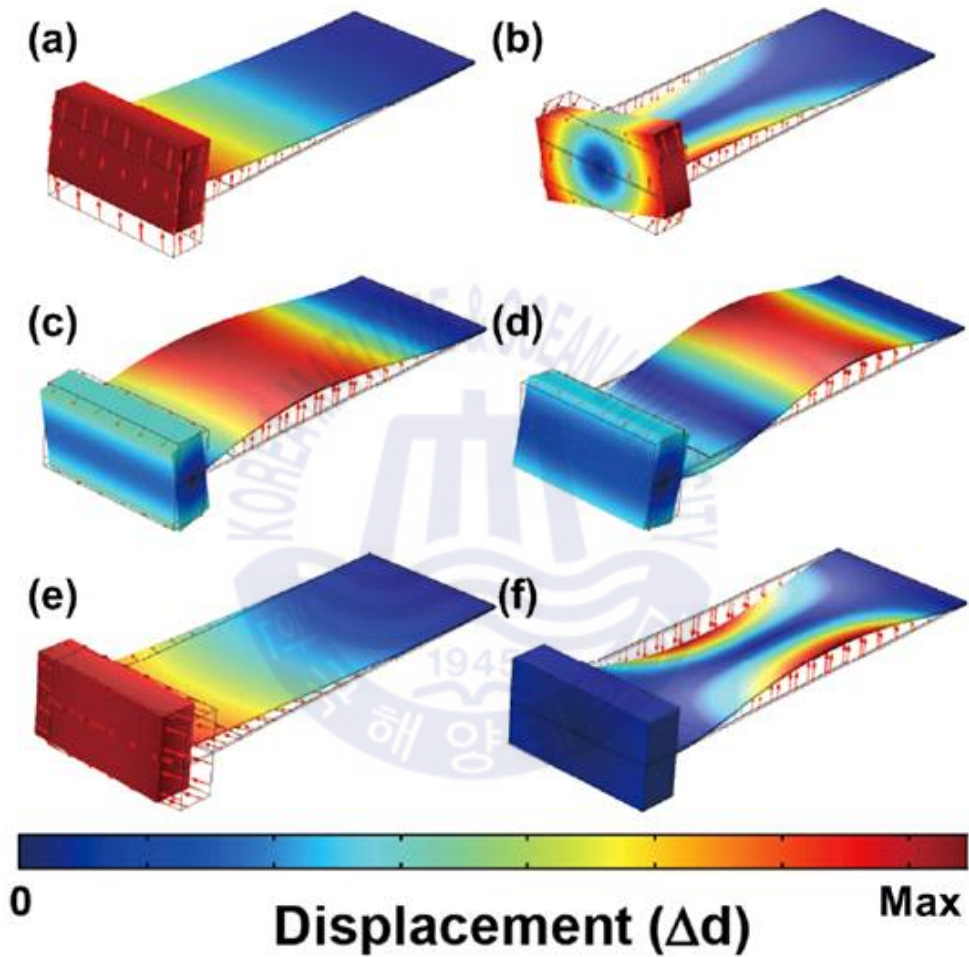


Fig. 4.17 시뮬레이션 상, 캔틸레버 구조의 주파수에 따른 다양한 공진 모드  
 (a) 11.775 Hz, (b) 78.304 Hz, (c) 180.29 Hz, (d) 519.54 Hz, (e) 766.75 Hz, (f)  
 847.28 Hz

1차 공진 휨 모드에 있어서, MMTEG의 질량 자석은 전형적인 캔틸레버 운동으로서 진동 운동의 가장 큰 변위를 보였고, 이는 Fig. 4.18에 제시된 실제 실험에서 15.1 Hz의 공진 주파수에서 나타났고, 7 Oe의 교류 자기장 하에서 149 V의 개방 회로 출력  $V_{pp}$ 를 보여준다. 두 번째 공진 휨 모드에서, 마찰전기 캔틸레버의 중간 영역은 Fig. 4.19에 나온 것과 같이 진동 운동의 최대 변위를 가지며, 실제 실험에서 143.2 Hz의 공진 주파수에서 나타났고, 개방회로출력  $V_{pp}$ 가 708 V였다. MMTEG의 제 1 및 제 2 휨 공진 모드 사이의 성능 차이는 PFA 필름 및 Al 호일의 마찰전기 접촉 영역에 의해 설명될 수 있다. 두 번째 휨 공진 모드는 첫 번째 휨 공진 모드와 비교하여 하베스팅 작업에서 더 큰 활성 마찰전기 영역을 제공할 수 있으므로, 전압 출력의 높은 향상을 가져온다. 이러한 이유로 본 실험에서는 최종적으로 MME 마찰전기 장치에 두 번째 휨 공진 모드를 채택했다.



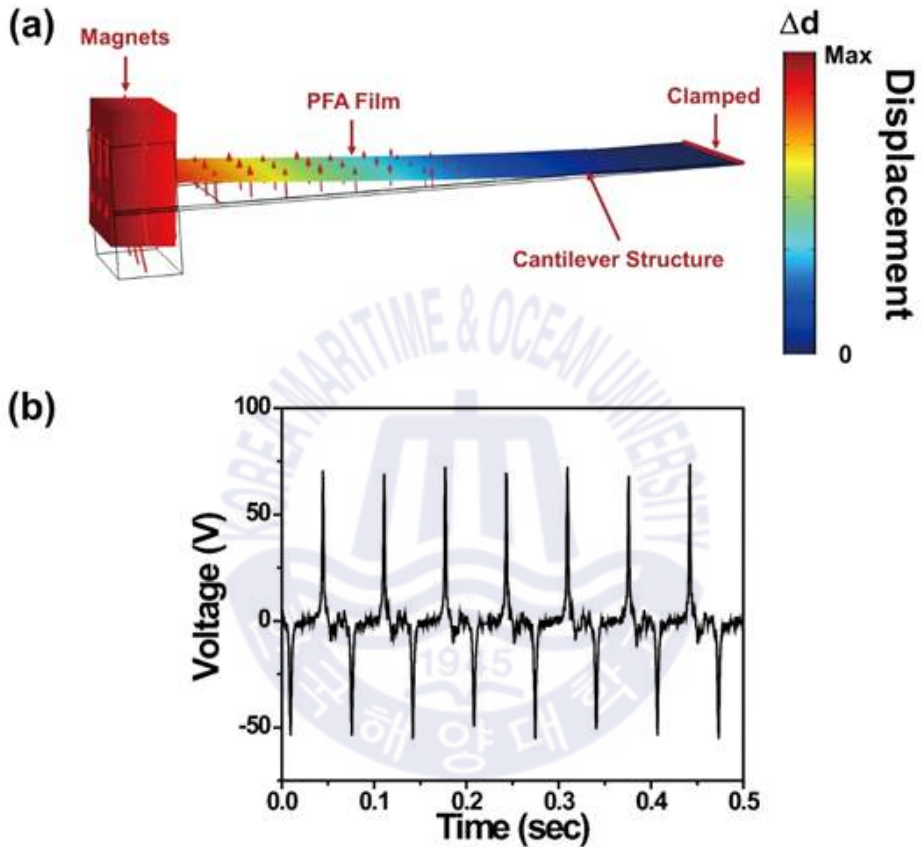


Fig. 4.18 (a) 시뮬레이션을 사용하여 캔틸레버형 MMTEG에 대한 첫 번째 공진 주파수에서 휨 모드의 고유 주파수 분석. (b) 실제 실험 측정에 의해 7 Oe의 교류 자기장을 갖는 15.1 Hz에서의 제 1 고유 진동 휨 모드의 개방 회로 출력 전압

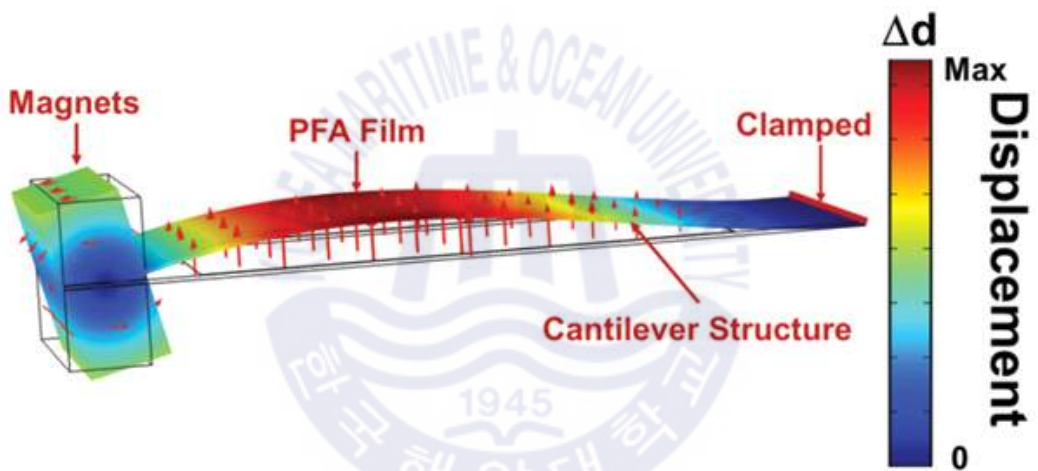


Fig. 4.19 두 번째 휨 공진 모드에서 캔틸레버형 MMTEG 구조에 대한 시뮬레이션 형상

### 4.3.2 전기적 특성 예측

나노구조체를 갖는 PFA 필름에서 나노구조체가 마찰 전위에 대한 영향을 검증하기 위해, 나노구조체가 없는 평면 PFA 필름과 비교하여 분석 시뮬레이션을 수행했다. 접촉 모드 마찰전기 발생기로부터 생성되는 이론적인 전압 값은 식 (1)로 정의된다[74].

$$\Delta V = -\frac{Q}{S\epsilon_0}\left(\frac{d}{\epsilon} + x\right) + \frac{\sigma x}{\epsilon_0} \quad (1)$$

여기서  $\Delta V$ 는 두 전극 사이의 전위 차이,  $Q$ 는 두 층 사이의 전하량,  $S$ 는 전극의 면적,  $\epsilon$ 는 PFA 필름의 유전율,  $\epsilon_0$ 는 진공에서의 유전율,  $d$ 는 필름의 두께,  $x$ 는 Al 호일과 PFA 필름 사이의 간격,  $\sigma$ 는 마찰전기 전하밀도이다. 개방 회로 조건에서 전하의 이동이 없고 ( $Q = 0$ ), 개방 회로 전압 ( $V_{oc}$ )은 식 (2)로 표현된다 [75].

$$V_{oc} = \frac{\sigma \cdot x}{\epsilon_0} \quad (2)$$

이 식에서 개방 회로 상태에서 233 V (Fig. 4.9)의 최대  $V_{oc}$ 와 실제 측정한 평면 PFA 필름과 Al 호일 사이의 최대 거리인 3 mm를 이용하여 평면 PFA 필름에서  $0.69 \mu C/m^2$ 의 최대 마찰전기 전하밀도  $\sigma$ 를 얻었다. 이어서 Fig. 4.20에 나타냈듯이, 시뮬레이션 프로그램에  $0.69 \mu C/m^2$ 의 마찰전기 전하밀도  $\sigma$ 와 3 mm의 거리  $x$ 를 입력하여 나노 패턴 형상이 있는 것과 없는 평면 PFA 필름의 마찰전위를 비교했다. 대전된 표면이 더 넓을수록 더 많은 양의 전하를 유도할 수 있기 때문에 마찰전기 출력 전압은 큰 접촉면적에 비례하여 향상된다[42, 76]. FEA 결과는 나노탄환으로 변형된 구조로 인하여 표면적이 증가하면, 동일한 장치 구조 및 크기를 갖는 평탄한 마찰전기 하베스터와 비교하였을 때 나노구조체를 갖는 MMTEG에서 높은 전위를 생성할 수 있음을 보여준다.

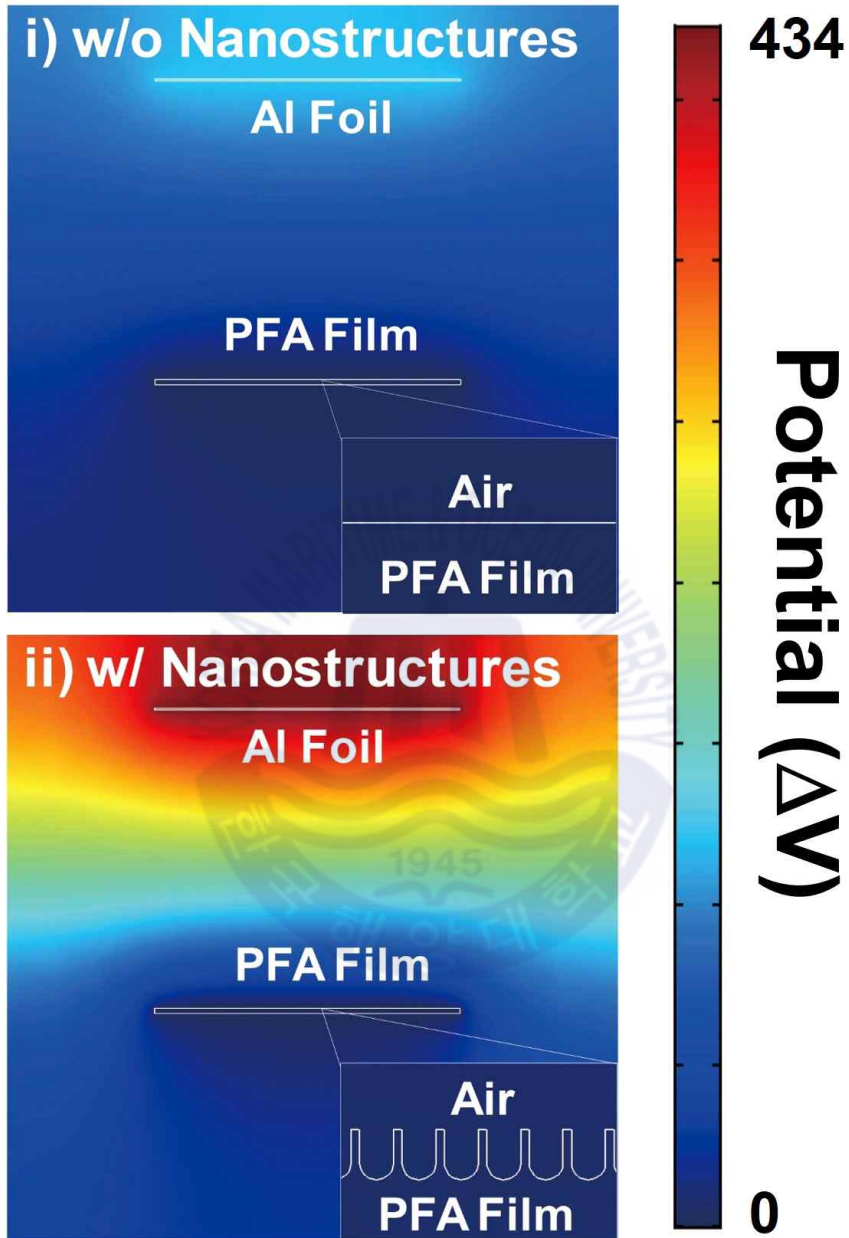


Fig. 4.20 상부의 Al부분과 평면 및 나노 구조를 가진 PFA 표면에 대해 계산된 정전기의 전위

#### 4.4 IoT 디바이스 구동 데모

Fig. 4.21은 MMTEG를 이용하여 무선 실내 위치 인식 시스템에 전력을 공급하는 적용 개념을 보여준다. i) 마찰전기 하베스터는 IoT 위치 비콘을 활성화하기 위해 교류 자기장 내에서 전기에너지를 생성할 수 있다. ii) 사용자가 비콘에 가까이 가면, IoT 장치는 블루투스 저 에너지 (Bluetooth Low Energy, BLE) 프로토콜에 의해 위치 정보의 무선 신호를 이용해 휴대용 스마트 패드로 전송할 수 있다. iii) 사람의 정확한 위치는 무선 인터넷 서비스를 통하여 휴대용 스마트 패드에서 주 모니터링 컴퓨터로 전송된다. 이러한 유형의 시스템은 목표물의 정확한 위치를 찾기 위한 자가발전 IoT 비콘의 시연뿐만 아니라 실내 환경에서 개인 위치의 동시 모니터링을 제공한다. Fig. 4.22 과 같이, MMTEG와 전력관리회로 (0.1 mF 커패시터  $C_1$ 과 Linear technology의 LTC3588), 전력저장 커패시터 ( $C_2$ , 1mF), IoT위치 비콘 (Vinetech Wezon)을 포함하는 자가발전 방식의 IoT 위치 시스템을 설계했다. LTC3588이 에너지 변환 역할을 하는 저전력 소비 회로로 널리 알려져 있지만, 내부 임피던스가 높고 최대 708 V의 매우 높은 출력  $V_{pp}$ 와 최대 277 mA의 비교적 낮은 출력 전류를 발생시키는 MMTEG용으로 설계되지 않았다. 이러한 이유로 MMTEG의 에너지 전환 과정은 막대한 에너지 손실을 초래할 수 있다[77]. 마찰전기 하베스터의 교류 형 고출력 전압은 일반적으로 직류 전압이 5 V인 상용 전자기기에는 적합하지 않다[77]. 이 문제를 해결하기 위해 MMTEG의 교류 출력을 정류하여 3.6 V의 일정한 직류 전압으로 변환하여 전력관리 회로를 통해 전력저장 커패시터를 충전했다. 7 Oe의 교류 자기장 하에서 MMTEG를 작동시킨 후, 1 mF 커패시터는 158 초 이내에 0 V 에서 3.6 V까지 충전되었고, 그 다음 IoT 비콘은 Fig. 4.23에 제시된 것처럼 커패시터에 연결하였다. 비콘 장치가 작동이 되면, 내부의 전자 회로의 초기 작동을 위해 커패시터의 전압이 2.8 V로 떨어지게 되고, 이어서 MMTEG로부터 발생된 전기 에너지에 의해 충전 전압이 3.5 V까지 회복이 되었다. Fig. 4.23의 삽입된 그래프는 비콘 장치가 자가발전 IoT 시스템으로서 1 초 간격으로 위치 신호를 연속적으로 송신 할 수 있음을 나타낸다.



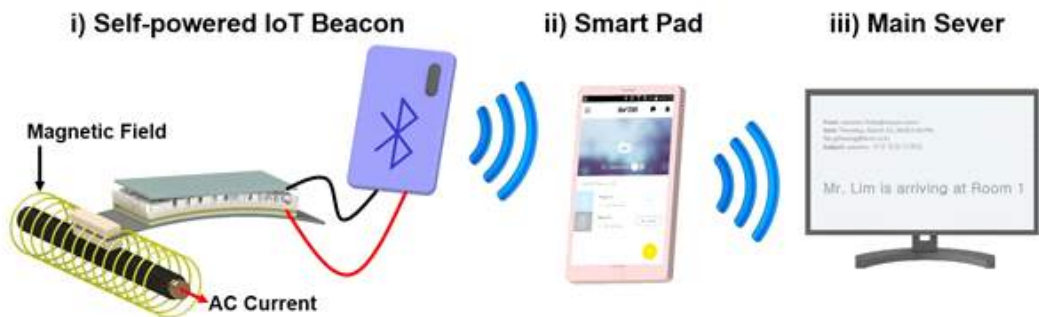


Fig. 4.21 무선 실내 위치 측정 시스템의 개념도

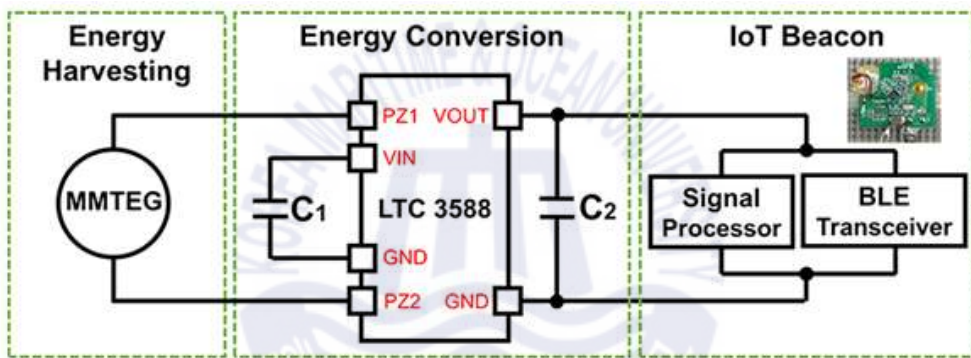


Fig. 4.22 MMTEG 기반의 자가발전 IoT 비콘 시스템의 회로도. 삽입된 그림은 블루투스 비콘 장치의 사진

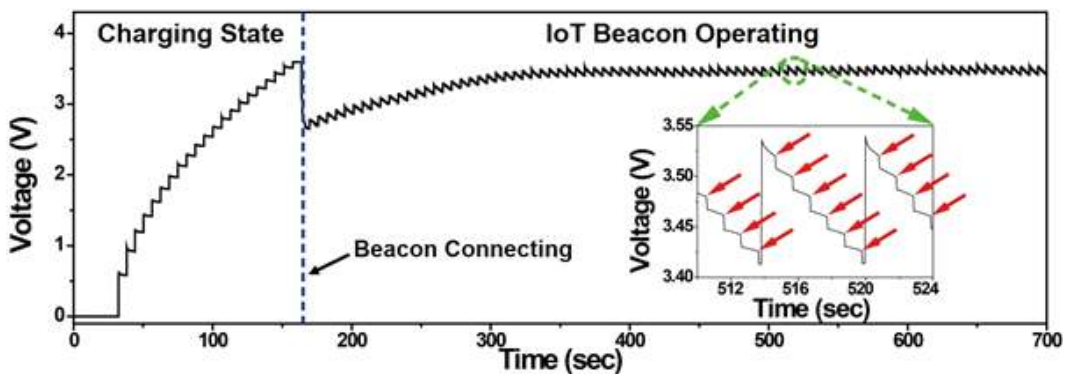


Fig. 4.23 MMTEG와 정류/변환 회로에 의해 에너지 저장용 1 mF 커패시터의 충·방전 그래프. 삽입된 그래프는 위치 비콘의 연속적인 동작을 보여준다

Fig. 4.24는 위치 비콘과 사용자 사이의 대응하는 물리적 거리를 스마트 패드의 모니터링 프로그램의 캡처 이미지를 보여준다. i) 사용자는 1호실에 설치된 IoT 비콘과 매우 떨어져 있음을 나타낸다. 프로그램은 ‘No signal’ 상태를 나타냈다. ii) 사용자가 1호실의 문에 접근했을 때, 장애물로 인하여 IoT 신호가 약했기 때문에 프로그램은 ‘Far’ 상태를 표시했다. iii) 사용자가 1호실에 들어간 후, 프로그램은 ‘Near’ 상태를 나타냈고, 이는 자가발전 위치 비콘 시스템이 스마트 패드 근처에 있음을 의미한다. 마지막으로, ‘Near’ 상태에서는 사용자의 위치 정보가 무선 인터넷을 통해 스마트 패드에서 주 모니터링 컴퓨터로 전달되었다 (Fig. 4.25). 무선실내 위치 확인의 모든 절차는 동영상 (<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ee/c8ee03008a#!divAbstract>)에 기록되었다. 이 시연으로 MMTEG가 외부 전원이나 내부 배터리 없이 IoT 시스템에 충분한 전력을 지속적으로 공급할 수 있음을 확인했다.





Fig. 4.24 사용자와 IoT 비콘 간의 물리적 거리 ( ‘No Signal’ 과 ‘Far’ , ‘Near’ )에 해당하는 스마트폰의 모니터링 프로그램의 캡처 이미지.



Fig. 4.25 자체 전원이 공급되는 IoT 비콘 시스템에 밀접하게 접근한 사용자의 정확한 실내 위치를 포함하는 메시지. 이는 스마트폰에서 무선 인터넷 서비스를 통해 주 모니터링 컴퓨터로 전송된 것이다

#### 4.5 60 Hz에서 MMTEG의 구동

우리는 가전제품에 연결된 전력 케이블 주위에서 발생하는 60 Hz의 자기장 하에서 MMTEG의 하베스팅 가능성을 확인했다. 실험을 위해, MMTEG의 캔틸레버형 Ti 기관의 크기 (마찰전기 면적)를  $50 \times 20 \text{ mm}^2$ 에서  $95 \times 20 \text{ mm}^2$ 로 변경하였고, 공진 주파수를 조절하기 위해 캔틸레버 끝 부분에 12 개의 자석 (18 g) 을 부착하여 MMTEG의 공진 주파수를 60 Hz로 조정하였다. Fig. 4.2의 MMTEG 장치와 비교하여 증가 된 질량은 작동 중에 캔틸레버의 이동 거리를 증가시킬 수 있으며, 이것은 고출력을 유도할 수 있다. Fig. 4.26는 MMTEG와 헤어드라이어의 전력케이블, 오실로스코프로 구성된 실험 장치를 보여준다. 전원케이블은 1 mm의 거리를 두고 마찰전기 캔틸레버의 질량 자석 아래에 놓여서, 자기-기계 진동을 방해하지 않으면서 자기장과 질량 자석의 강한 반응을 유도했다. Fig. 4.27는 두 대의 헤어드라이어를 사용하여 전원 케이블에서 측정된 RMS 교류전류가 9.2 A 임을 보여준다.



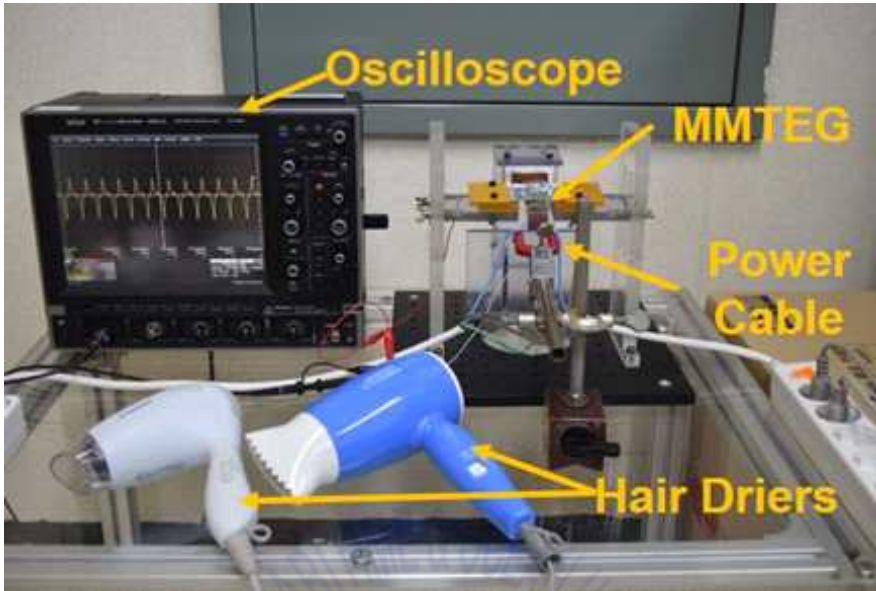


Fig. 4.26 두 대의 헤어드라이어에 연결된 전원 케이블 근처의 MMTEG 실험 구성 사진

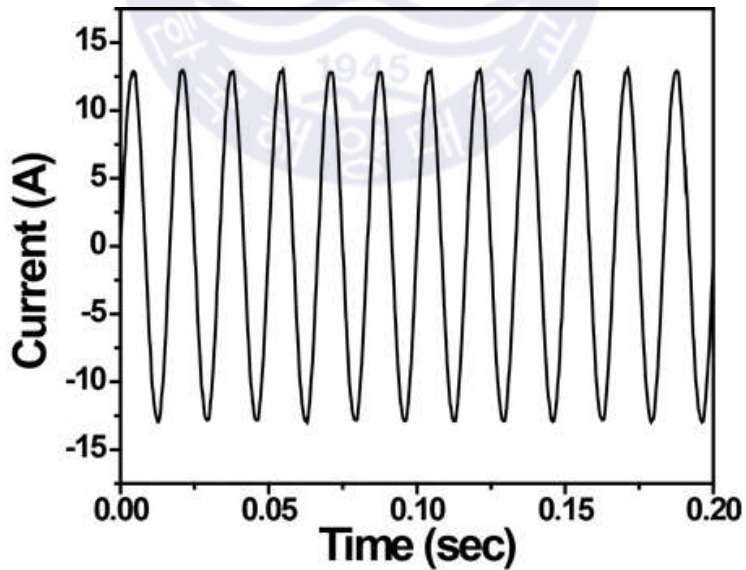


Fig. 4.27 두 대의 헤어드라이어를 사용하였을 때, 전원 케이블에서 측정된 교류 전류

암페어의 법칙 (식 3, 4)과 Fig. 4.28 (전기 케이블과 질량 자석의 중심점 사이의 총 거리: 14 mm)을 사용하여 캔틸레버 구조의 끝 부분에 위치한 질량 자석의 중간층에 작용하는 1.3 Oe의 교류 자기장을 계산하였다.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I \quad (3)$$

$$I_{rms} = 9.2 \text{ A}, \quad B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \times 9.2 \text{ A}}{2\pi \times 14 \text{ mm}} = 1.31 \times 10^{-4} \text{ T} = 131 \mu\text{T} = 1.31 \text{ Oe} \quad (4)$$

MMTEG는 Fig. 4.29와 Fig. 4.30에 도시한 바와 같이, 60 Hz에서 300 V의  $V_{pp}$ 와 23  $\mu\text{A}$ 의 단락전류를 생성했다.





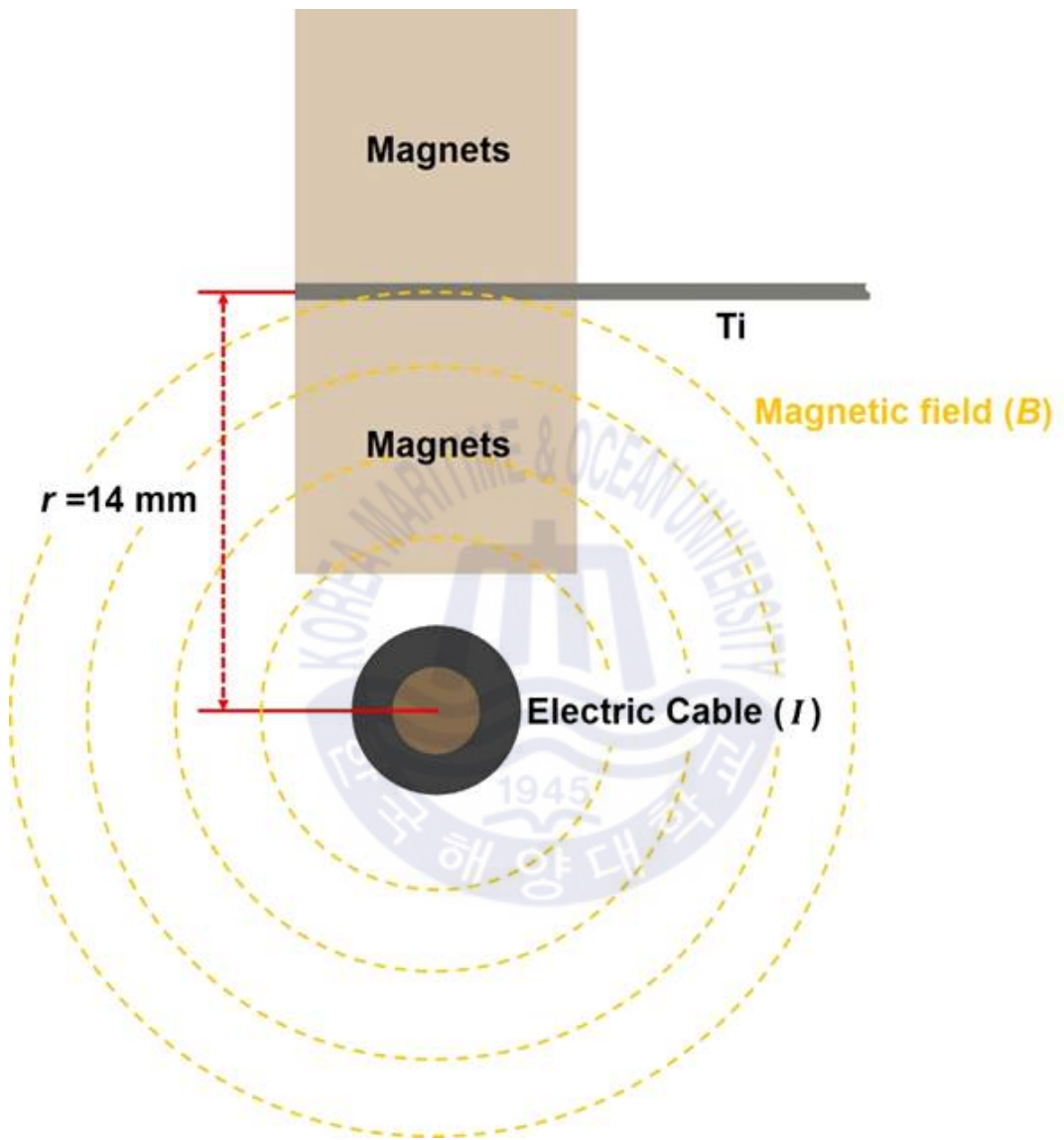


Fig. 4.28 MME 캔틸레버 구조에 걸리는 교류 자기장 ( $B$ )의 개략도.



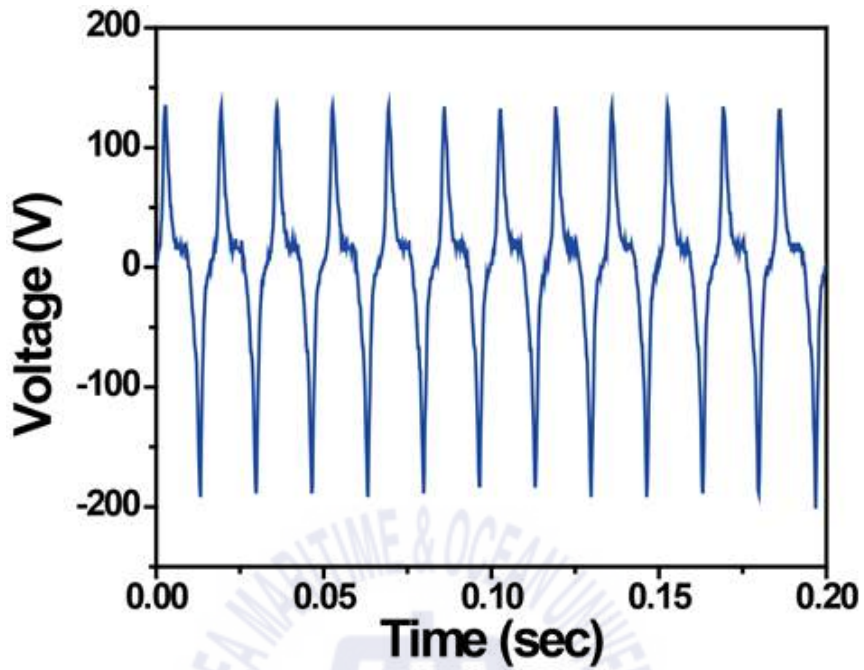


Fig. 4.29 잡음 교류 자기장 하에서 MMTEG로부터 생성된 개방 회로 전압

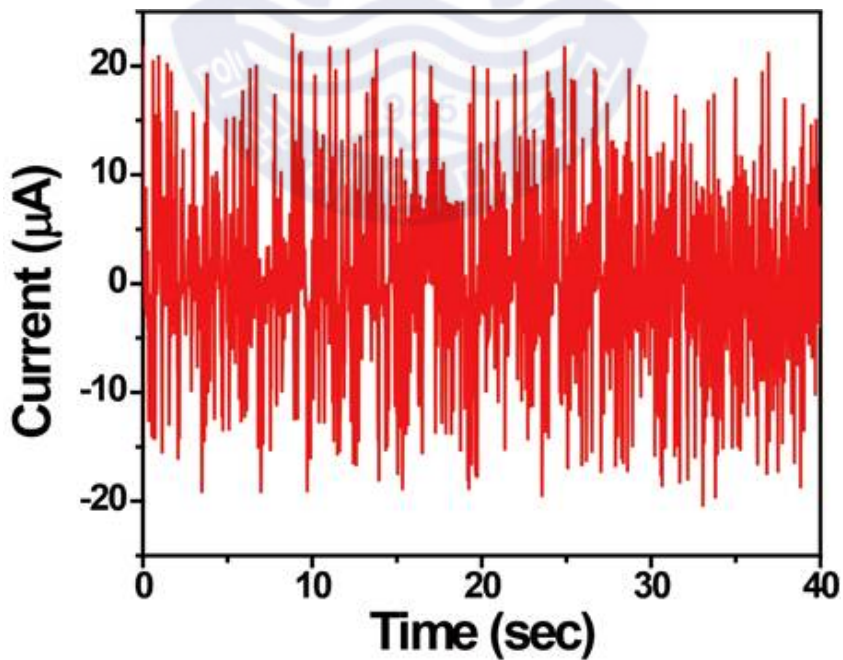


Fig. 4.30 잡음 교류 자기장 하에서 MMTEG로부터 생성된 단락 전류

하나의 헤어드라이어의 작동으로, 전원케이블은 5.0 A의 RMS 교류 전류를 전송하고, 이는 암페어의 법칙으로 계산을 하면 (식 5) 약 0.7 Oe에 상응하는 교류 자기장이 형성된다. 이 때 나오는 MMTEG의 출력은 Fig. 4.31에 제시된 것처럼  $V_{pp}$ 는 151 V이고 11.7  $\mu$ A의 단락전류를 생성하였다.

$$I_{rms} = 5.0 \text{ A}, B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \times 5 \text{ A}}{2\pi \times 14 \text{ mm}} = 7.14 \times 10^{-5} \text{ T} = 71.4 \mu\text{T} = 0.71 \text{ Oe} \quad (5)$$

Fig. 4.32는 전력 케이블 근처의 MMTEG의 정류된 출력이 108 개의 청색 LED를 연속적으로 점등하는데 직접 사용될 수 있음을 나타낸다.



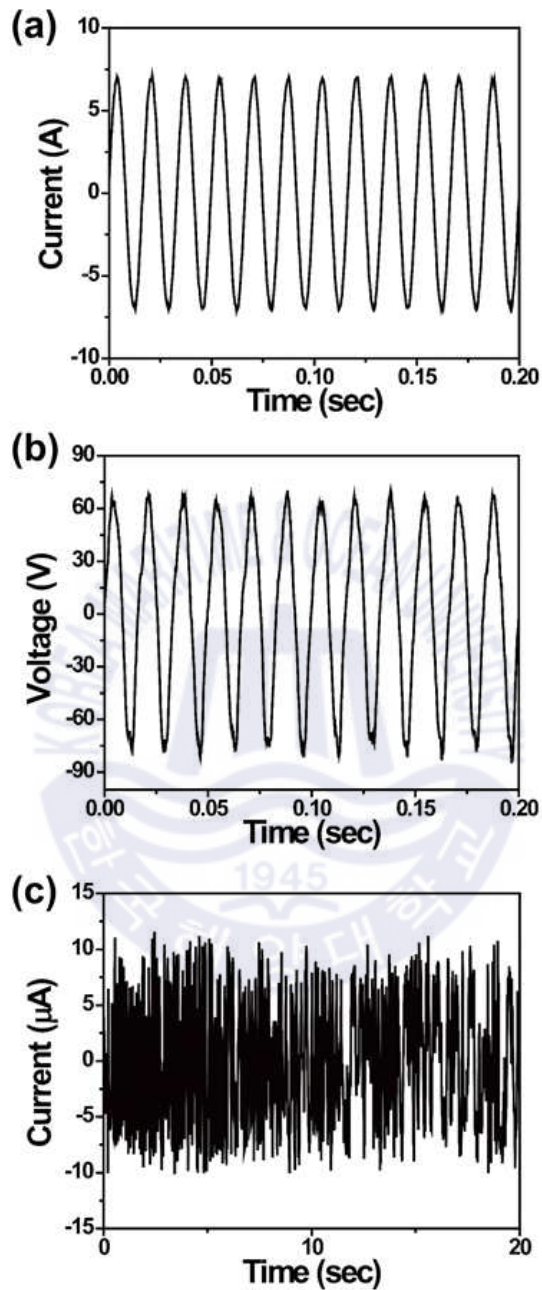


Fig. 4.31 (a) 하나의 헤어드라이어를 사용하였을 때의 전원 케이블의 교류 전류. (b), (c) 전원 케이블에서 발생하는 교류 자기장의 잡음에 의한 MMTEG의 개방 회로 전압 및 단락 전류

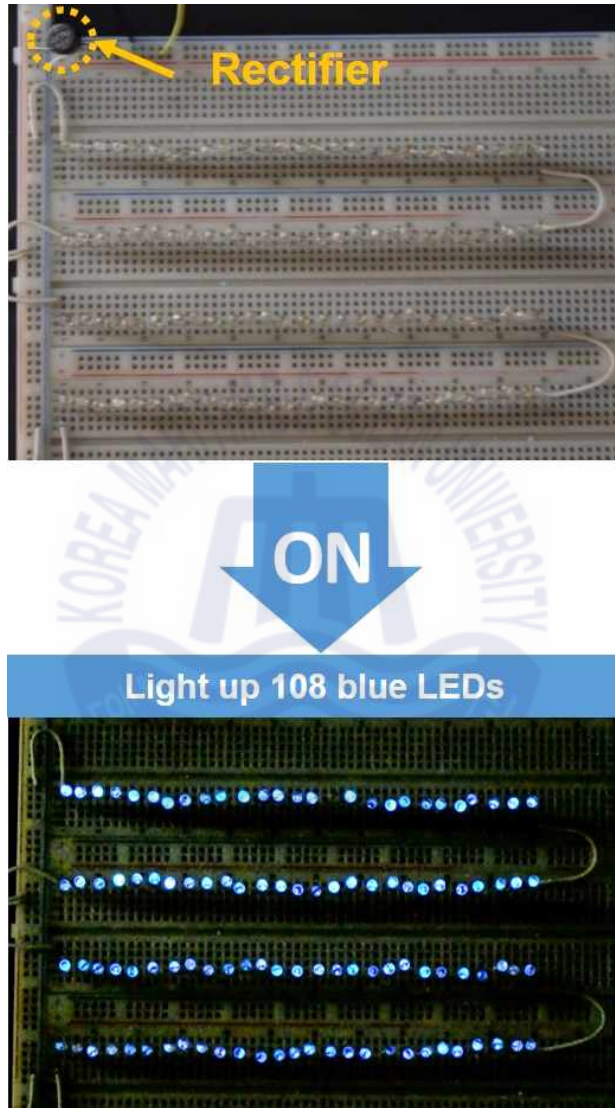


Fig. 4.32 MMTEG에 의해 구동되는 108 개의 청색 LED의 사진

## 제 5 장 결론

본 논문에서는 실내 무선 위치 시스템에 전력을 공급하기 위해, 나노 탄환에 의해 변형된 구조를 기반으로 하는 고성능 MMTEG 에 대한 연구를 했다. 수용성 NaCl 나노 입자는 높은 운동에너지를 이용한 AD 공정과 이후의 환경 친화적인 용해 공정을 이용하여 PFA 필름에 나노구조체를 형성하기 위해 사용했다. MME 하베스터는 마찰전기 성능을 극대화하기 위해 FEA 연구에서 파생된 최적의 공진 모드와 장치 구조를 채택했다. 7 Oe의 교류 자기장 내에서 MMTEG는 708 V의 개방 회로 피크투피크 전압  $V_{pp}$ 와 277  $\mu A$ 의 단락 회로 전류를 생성할 수 있다. 또한 외부저항  $2 \times 10^6 \Omega$ 에서 MMTEG로부터 21.8 mW의 최대 피크 출력과 4.8 mW의 연속 교류 출력을 달성했다. MMTEG의 고출력은 나노 탄환 AD 공정에 의해 변형된 넓은 표면 영역과 두 번째 휨 공진 모드로 진동 운동을 유발하여 접촉 마찰전기 및 정전 유도를 향상시켰으며, 최대 3300만 진동 주기의 매우 높은 내구성을 보여준다. MMTEG의 전력을 정류 및 변환함으로써, 우리는 자기장 하베스터와 전력제어 회로, 전력저장 요소, IoT 블루투스 비콘으로 구성된 지속적으로 작동하는 자가발전 무선 실내 위치 시스템을 시연했다. 마지막으로, 가전제품과 연결된 60 Hz 전원 케이블 근처에 MMTEG를 위치하여 330 V의 개방 회로 전압  $V_{pp}$ 와 23  $\mu A$ 의 단락 회로 전류를 생성하였고, 이는 108개의 청색 LED를 켤 수 있다. 이 결과는 자체 구동 IoT 전자 장치를 작동한다는 것만이 아니라 지능형 공장 및 구조/환경 모니터링, 생활 지능 시스템을 포함한 특정 자체 전원 공급 응용 프로그램을 구현하기 위해 약한 자기장에서 전기 에너지를 수집하는 MMTEG의 실현 가능성을 검증한다[1, 78]. 더욱이 MMTEG는 하베스팅 시스템의 총 전력 출력을 증가시키기 위해 전자기 또는 풍력, 태양열, 열, 화학 에너지로 작동되는 다양한 하베스터들과 결합될 수 있다[27, 31, 79].

## 참고문헌

- [1] J. Gubbi, et al., 2013, Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions, *Future Generation Computer Systems*, 29(7), pp.1645-1660.
- [2] L. Atzori, et al., 2010, The Internet of Things: A survey, *Computer Networks*, 54(15), pp.2787-2805.
- [3] R. Haight, et al., 2016, Solar-powering the Internet of Things, *Science*, 353(6295), pp.124-125.
- [4] D. Miorandi, et al., 2012, Internet of things: Vision, applications and research challenges, *Ad Hoc Networks*, 10(7), pp.1497-1516.
- [5] Z. L. Wang, et al., 2015, Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors, *Energy & Environmental Science*, 8(8), pp.2250-2282.
- [6] H. Ryu, et al., 2018, Sustainable direct current powering a triboelectric nanogenerator via a novel asymmetrical design, *Energy & Environmental Science*, 11(8), pp.2057-2063.
- [7] H. Geon-Tae, et al., 2016, Self-Powered Wireless Sensor Node Enabled by an Aerosol-Deposited PZT Flexible Energy Harvester, *Advanced Energy Materials*, 6(13), pp.1600237.
- [8] J. Ryu, et al., 2015, Ubiquitous magneto-mechano-electric generator, *Energy & Environmental Science*, 8(8), pp.2402-2408.
- [9] V. Annapureddy, et al., 2018, Exceeding milli-watt powering magneto-mechano-electric generator for standalone-powered electronics, *Energy & Environmental Science*, 11(4), pp.818-829.



- [10] S. Wang, et al., 2016, Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(1), pp.3159805.
- [11] R. C. Kambale, et al., 2013, Magnetoelectric properties and magnetomechanical energy harvesting from stray vibration and electromagnetic wave by  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$  single crystal/Ni cantilever, *Journal of Applied Physics*, 113(20), pp.204108.
- [12] D. R. Patil, et al., 2014, Anisotropic self-biased dual-phase low frequency magneto-mechano-electric energy harvesters with giant power densities, *APL Materials*, 2(4), pp.046102.
- [13] P. Li, et al., 2010, A magnetoelectric energy harvester and management circuit for wireless sensor network, *Sensors and Actuators A: Physical*, 157(1), pp.100-106.
- [14] C.-W. Nan, et al., 2008, Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions, *Journal of Applied Physics*, 103(3), pp.031101.
- [15] F.-R. Fan, et al., 2012, Flexible triboelectric generator, *Nano Energy*, 1(2), pp.328-334.
- [16] Z. L. Wang, 2013, Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors, *ACS Nano*, 7(11), pp.9533-9557.
- [17] H. Ronan, et al., 2015, Recent Progress on Flexible Triboelectric Nanogenerators for SelfPowered Electronics, *ChemSusChem*, 8(14), pp.2327-2344.
- [18] Y. Lee, et al., 2017, Cam-based sustainable triboelectric nanogenerators with a resolution-free 3D-printed system, *Nano Energy*, 38, pp.326-334.
- [19] S. Wang, et al., 2015, Elasto-Aerodynamics-Driven Triboelectric Nanogenerator for Scavenging Air-Flow Energy, *ACS Nano*, 9(10), pp.9554-9563.



- [20] J. Chun, et al., 2015, Mesoporous pores impregnated with Au nanoparticles as effective dielectrics for enhancing triboelectric nanogenerator performance in harsh environments, *Energy & Environmental Science*, 8(10), pp.3006-3012.
- [21] S. Wang, et al., 2015, Flow-Driven Triboelectric Generator for Directly Powering a Wireless Sensor Node, *Advanced Materials*, 27(2), pp.240-248.
- [22] Y. Yang, et al., 2014, Electret Film-Enhanced Triboelectric Nanogenerator Matrix for Self-Powered Instantaneous Tactile Imaging, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(5), pp.3680-3688.
- [23] M. L. S. and W. G. M., 2008, Electrostatic Charging Due to Separation of Ions at Interfaces: Contact Electrification of Ionic Electrets, *Angewandte Chemie International Edition*, 47(12), pp.2188-2207.
- [24] W.-S. Jung, et al., 2015, High Output Piezo/Triboelectric Hybrid Generator, *Scientific Reports*, 5, pp.9309.
- [25] X.-S. Zhang, et al., 2014, High-performance triboelectric nanogenerator with enhanced energy density based on single-step fluorocarbon plasma treatment, *Nano Energy*, 4, pp.123-131.
- [26] S. Wang, et al., 2016, A One-Structure-Based Hybridized Nanogenerator for Scavenging Mechanical and Thermal Energies by Triboelectric–Piezoelectric–Pyroelectric Effects, *Advanced Materials*, 28(15), pp.2881-2887.
- [27] Y. Wu, et al., 2014, Hybrid energy cell for simultaneously harvesting wind, solar, and chemical energies, *Nano Research*, 7(11), pp.1631-1639.
- [28] T. Quan, et al., 2015, Hybridized Electromagnetic–Triboelectric Nanogenerator for a Self-Powered Electronic Watch, *ACS Nano*, 9(12), pp.12301-12310.
- [29] X. Wen, et al., 2014, Applicability of triboelectric generator over a wide

range of temperature, *Nano Energy*, 4, pp.150-156.

[30] X. Wang, et al., 2016, Hybridized nanogenerator for simultaneously scavenging mechanical and thermal energies by electromagnetic-triboelectric-thermoelectric effects, *Nano Energy*, 26, pp.164-171.

[31] K. Zhang, et al., 2015, Hybridized Electromagnetic–Triboelectric Nanogenerator for Scavenging Biomechanical Energy for Sustainably Powering Wearable Electronics, *ACS Nano*, 9(4), pp.3521-3529.

[32] X. Zhong, et al., 2015, Rotating-disk-based hybridized electromagnetic-triboelectric nanogenerator for scavenging biomechanical energy as a mobile power source, *Nano Energy*, 13, pp.771-780.

[33] H. Long-Biao, et al., 2016, Magnetic-Assisted Noncontact Triboelectric Nanogenerator Converting Mechanical Energy into Electricity and Light Emissions, *Advanced Materials*, 28(14), pp.2744-2751.

[34] K. N. Kim, et al., 2015, Highly Stretchable 2D Fabrics for Wearable Triboelectric Nanogenerator under Harsh Environments, *ACS Nano*, 9(6), pp.6394-6400.

[35] J. Chen and Z. L. Wang, 2017, Reviving Vibration Energy Harvesting and Self-Powered Sensing by a Triboelectric Nanogenerator, *Joule*, 1(3), pp.480-521.

[36] S. Wang, et al., 2012, Nanoscale Triboelectric-Effect-Enabled Energy Conversion for Sustainably Powering Portable Electronics, *Nano Letters*, 12(12), pp.6339-6346.

[37] B. Meng, et al., 2013, A transparent single-friction-surface triboelectric generator and self-powered touch sensor, *Energy & Environmental Science*, 6(11), pp.3235-3240.

[38] L. Lin, et al., 2013, Segmentally Structured Disk Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Rotational Mechanical Energy, *Nano Letters*, 13(6),

pp.2916-2923.

[39] X.-S. Zhang, et al., 2013, Frequency-Multiplication High-Output Triboelectric Nanogenerator for Sustainably Powering Biomedical Microsystems, *Nano Letters*, 13(3), pp.1168-1172.

[40] Z.-H. Lin, et al., 2013, Enhanced Triboelectric Nanogenerators and Triboelectric Nanosensor Using Chemically Modified TiO<sub>2</sub> Nanomaterials, *ACS Nano*, 7(5), pp.4554-4560.

[41] L. Zong-Hong, et al., 2013, A Self-Powered Triboelectric Nanosensor for Mercury Ion Detection, *Angewandte Chemie International Edition*, 52(19), pp.5065-5069.

[42] C. K. Jeong, et al., 2014, Topographically-Designed Triboelectric Nanogenerator via Block Copolymer Self-Assembly, *Nano Letters*, 14(12), pp.7031-7038.

[43] P. Bai, et al., 2013, Integrated Multilayered Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Biomechanical Energy from Human Motions, *ACS Nano*, 7(4), pp.3713-3719.

[44] L. K. Young, et al., 2014, Hydrophobic Sponge Structure-Based Triboelectric Nanogenerator, *Advanced Materials*, 26(29), pp.5037-5042.

[45] K. Ji-Hyun, et al., 2015, Self-Powered, Room-Temperature Electronic Nose Based on Triboelectrification and Heterogeneous Catalytic Reaction, *Advanced Functional Materials*, 25(45), pp.7049-7055.

[46] ALPAFLON, 2015. 테프론 비점착 PFA0050 [Online] Available at: [http://afmall.co.kr/product/detail.html?product\\_no=183&cate\\_no=85&display\\_group=1](http://afmall.co.kr/product/detail.html?product_no=183&cate_no=85&display_group=1)[18 June 2019]

[47] doopedia두산백과, 알루미늄 [Online] Available at: <https://terms.naver.com/entry.nhn?docId=1122874&cid=40942&categoryId=32269>

#\_\_datalab[17June2019]

[48] doopedia두산백과, *알루미늄포일* [Online] Available at: <https://terms.naver.com/entry.nhn?docId=1261880&cid=40942&categoryId=32227> [17 June 2019]

[49] M. Sopicka-Lizer, 2010. *High-Energy Ball Milling: Mechanochemical Processing of Nanopowders*. Ed. Elsevier Science:

[50] 박동수, et al., 2007, 에어로졸 데포지션 (Aerosol deposition)에 의한 나노 구조 세라믹스 코팅공정 기술, *세라미스트*, 10(2), pp.7-17.

[51] J. I. Goldstein, et al., 2017. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. 4th Ed. Springer: New York

[52] A. Chauhan, 2018, Deformation and damage mechanisms of ODS steels under high-temperature cyclic loading, *Journal*, (Issue),

[53] 박형호, et al., 2007, XPS 분석 기술과 나노 박막에의 응용, *세라미스트*, 10(5), pp.74-85.

[54] 위키백과, 2011. *XPS PHYSICS* [Online] (Updated 7 November 2011) Available at: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:XPS\\_PHYSICS.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:XPS_PHYSICS.png)[18 June 2019]

[55] Doopedia두산백과, *오실로스코프* [Online] Available at: <https://terms.naver.com/entry.nhn?docId=1128378&cid=40942&categoryId=32382> [18 June 2019]

[56] Tistory, 2014. *소스 측정 단위(SMU) 계측기란?* [Online] (Updated 18 January 2014) Available at: <https://tdori.tistory.com/47>[17 June 2019]

[57] J. Ryu, et al., 2009, Enhanced domain contribution to ferroelectric properties in freestanding thick films, *Journal of Applied Physics*, 106(2), pp.024108.

- [58] A. F. Diaz and R. M. Felix-Navarro, 2004, A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: the influence of chemical structure and properties, *Journal of Electrostatics*, 62(4), pp.277-290.
- [59] K. Uchino, 2017. *Advanced Piezoelectric Materials: Science and Technology*. 2nd Ed. Elsevier Science: Amsterdam
- [60] D. Choi, et al., 2017, Facile and cost-effective fabrication of patternable superhydrophobic surfaces via salt dissolution assisted etching, *Applied Surface Science*, 393, pp.449-456.
- [61] M. Gooding Diana and K. Kaufman George, 2014, Tribocharging and the Triboelectric Series, pp.1-9.
- [62] P. Bai, et al., 2013, Cylindrical Rotating Triboelectric Nanogenerator, *ACS Nano*, 7(7), pp.6361-6366.
- [63] W. Bauer and G. D. Westfall, 2013. *University Physics with Modern Physics*. Ed. McGraw-Hill:
- [64] D. Bhatia, et al., 2017, Tandem triboelectric nanogenerators for optimally scavenging mechanical energy with broadband vibration frequencies, *Nano Energy*, 33, pp.515-521.
- [65] H. S. Wang, et al., 2017, Performance-enhanced triboelectric nanogenerator enabled by wafer-scale nanogrates of multistep pattern downscaling, *Nano Energy*, 35, pp.415-423.
- [66] Y. Min-Hsin, et al., 2016, Rolling Friction Enhanced Free-Standing Triboelectric Nanogenerators and their Applications in Self-Powered Electrochemical Recovery Systems, *Advanced Functional Materials*, 26(7), pp.1054-1062.
- [67] A. Venkateswarlu, et al., 2016, Low-Loss Piezoelectric Single-Crystal Fibers for Enhanced Magnetic Energy Harvesting with Magnetolectric Composite,

*Advanced Energy Materials*, 6(24), pp.1601244.

[68] J. Chen, et al., 2015, Automatic Mode Transition Enabled Robust Triboelectric Nanogenerators, *ACS Nano*, 9(12), pp.12334-12343.

[69] J. P. Lee, et al., 2017, 3D printed noise-cancelling triboelectric nanogenerator, *Nano Energy*, 38, pp.377-384.

[70] W. Sihong, et al., 2014, Maximum Surface Charge Density for Triboelectric Nanogenerators Achieved by Ionized-Air Injection: Methodology and Theoretical Understanding, *Advanced Materials*, 26(39), pp.6720-6728.

[71] H. Guo, et al., 2015, An Ultrarobust High-Performance Triboelectric Nanogenerator Based on Charge Replenishment, *ACS Nano*, 9(5), pp.5577-5584.

[72] L. Lin, et al., 2014, Noncontact Free-Rotating Disk Triboelectric Nanogenerator as a Sustainable Energy Harvester and Self-Powered Mechanical Sensor, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(4), pp.3031-3038.

[73] S. G. Richard, et al., 2013, Experimental determination of mode correction factors for thermal method spring constant calibration of AFM cantilevers using laser Doppler vibrometry, *Nanotechnology*, 24(25), pp.255706.

[74] S. Niu, et al., 2013, Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source, *Energy & Environmental Science*, 6(12), pp.3576-3583.

[75] S. Niu and Z. L. Wang, 2015, Theoretical systems of triboelectric nanogenerators, *Nano Energy*, 14, pp.161-192.

[76] G. Wenxi, et al., 2014, Electrochemical Cathodic Protection Powered by Triboelectric Nanogenerator, *Advanced Functional Materials*, 24(42), pp.6691-6699.

[77] H. Geon-Tae, et al., 2015, A Reconfigurable Rectified Flexible Energy Harvester via Solid-State Single Crystal Grown PMN–PZT, *Advanced Energy Materials*, 5(10), pp.1500051.

[78] A. Zanella, et al., 2014, Internet of Things for Smart Cities, *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), pp.22-32.

[79] Y. Yang and Z. L. Wang, 2015, Hybrid energy cells for simultaneously harvesting multi-types of energies, *Nano Energy*, 14, pp.245-256.

