

## 1. 머리말

최근 다양한 전자기기들이 소형화, 경량화, 무선화 가능한 형태로 개발되면서, 전원으로부터 독립되어 작동하는 전자 기기에 안정적으로 전원을 공급할 수 있는 요소 기술로서 에너지 하베스팅 기술이 각광 받고 있다. 에너지 하베스팅이란 기계 진동(mechanical vibration), 바람(wind), 태양광/태양열(light and heat) 등 주변 환경의 기계적/열적 에너지를 전기 에너지로 전환시키는 기술을 의미한다. 이러한 에너지 하베스팅 기술에 대한 요구에 힘입어 지난 20년간 광전(photovoltaic), 압전(piezoelectric), 열전(thermoelectric), 초전(pyroelectric), 생화학반응(biochemical reaction) 등 다양한 메커니즘을 이용한 기전력 발생 시스템이 개발되었다. 이 글에서는 다양한 에너지 하베스팅 메커니즘 중에서 최근 들어 활발하게 연구되고 있는 마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅 기술(triboelectric energy harvesting technology)을 소개하려 한다.

## 2. 마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅 기술의 기본 원리

전자친화도(electron affinity)가 다른 두 물질을 접촉시켰을 때 서로 다른 전하로 대전되는 것은 우리 주변에서 쉽게 찾아볼 수 있는 현상이다. 누구나 어린 시절 플라스틱 책받침을 머리카락에 여러 번 문지른 뒤 들어 올렸을 때 머리카락이 따라 올라오는 현상을 경험한 적 있을 것이다. 이는 마찰 대전의 대표적인 사례로서 마찰에 의해 플라스틱 책받침은 음전하, 머리카락은 양전하로 대전되어 서로 끌어당기는 힘을 받는 것이다. 마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅 기술의 기본 원리는 마찰 대전에 의해서 발생한 전위차를 이용하여 외부 회로에 전류를 발생시키는 것이다(그림 1).

마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅 시스템은 기본적으로 음전하, 양전하로 대전되는 두 기관과 외부 전류를 발생시키는 데 이용되는 전극으로 구성된다(그림 1(a)). 이때 두 기관이 모두 도체인 경우 두 기관 사이에 전류가 형성되어 마찰

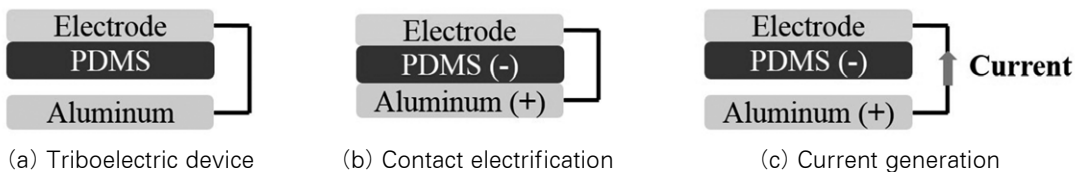


그림 1 마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅 기술의 기본 원리

\* E-mail : hyk@snu.ac.kr

대전으로 형성된 전위차가 유지되지 못하므로 한쪽 기관으로는 절연체를 다른 한쪽 기관은 도체를 이용하는 것이 일반적이다. 그림 1에서는 양전하로 대전되는 기관에는 도체인 알루미늄(aluminum)을, 음전하로 대전되는 기관에는 절연체인 PDMS를 예시로 나타내었다. 또한 마찰대전으로 인해서 발생한 전위차를 전류로 전환시키기 위해서 도체인 기관은 절연체인 기관의 반대편에 부착된 전극과 전선으로 연결된다.

전술한 형태로 구성된 시스템에서 외부의 진동에 의해서 두 기관의 접촉과 분리가 반복적으로 이루어지면서 전류가 발생한다. 먼저 그림 1(b)에 나타난 것처럼 전자친화도가 다른 두 기관이 접촉하였을 때 마찰대전으로 인하여 서로 다른 전하를 띄게 된다. 그리고 다음 과정에서 대전된 두 기관이 분리되면 양전하로 대전된 알루미늄 기관에서 상대적으로 전위가 낮은 전극으로 전류가 흐르게 된다[그림 1(c)]. 이후에 다시 기관이 접촉하면 마찰대전 효과로 인하여 다시 그림 1(b)에 나타난 전위분포를 지니게 되고, 전극에서 알루미늄 기관으로 그림 1(c)와는 반대방향의 전류가 형성된다. 두 기관의 접촉/분리가 지속적으로 발생할 경우 전극과 알루미늄 기관을 따라서 맴돌이 전류가 형성되고, 이 전류를 이용하여 전자기기를 가동시키거나 축전기에 전기 에너지를 저장할 수 있다.

### 3. 깃발과 벽의 마찰대전을 이용한 에너지 하베스팅 장치

마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅 시스템은

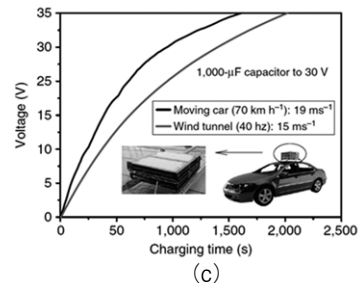
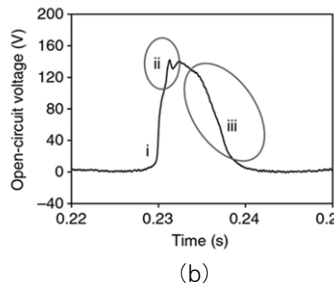
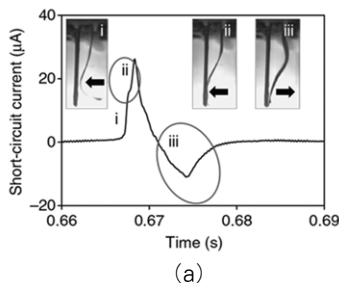


그림 3 깃발의 마찰대전을 이용한 에너지 하베스팅 시스템의 동작시 측정된 (a) 전류신호, (b) 전압신호, (c) 자동차 외벽에 부착된 시스템의 작동 예시

단순한 구조를 지니고 있기 때문에 간단한 공정을 이용하여 다양한 형태로 개발 가능하다. 대표적인 응용 사례 중 하나는 바람에 펄럭이는 깃발을 벽 주위에 설치하고, 이때 유도되는 지속적인 접촉/분리를 마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅에 이용하는 것이다. 깃발을 이용한 마찰전기 에너지 하베스팅 장치의 개념도가 그림 2에 도시되어 있다<sup>(4)</sup>. 여기서 깃발은 펄럭임을 수월하게 하면서도 마찰대전 효과를 극대화하기 위해 전자친화도가 낮은 금으로 코팅된 전도성 직물로 제작되었고, 벽의 표면에는 전자친화도가 높은 PTFE 필름을 부착되었다. 깃발과 PTFE 필름의 표면은 마찰대전의 효과를 극대화하기 위해서 그림 2(a, b)에서 보이는 것과 같이 마이크로 스케일의 거칠기를 지니고 있다. 깃발의 펄럭임에 의해서 벽과 깃발의 접촉/분리가 발생할 때마다 앞서 설명한 마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅 메커니즘에 의해서 맴돌이 전류가 발생하게 된다.

그림 3(a, b)는 실제 에너지 하베스팅 시스템이

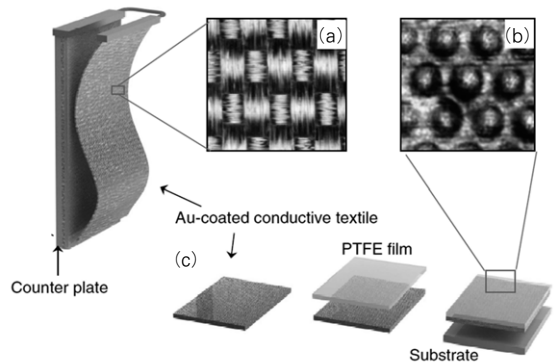


그림 2 깃발과 벽의 마찰대전을 이용한 에너지 하베스팅 장치 개념도

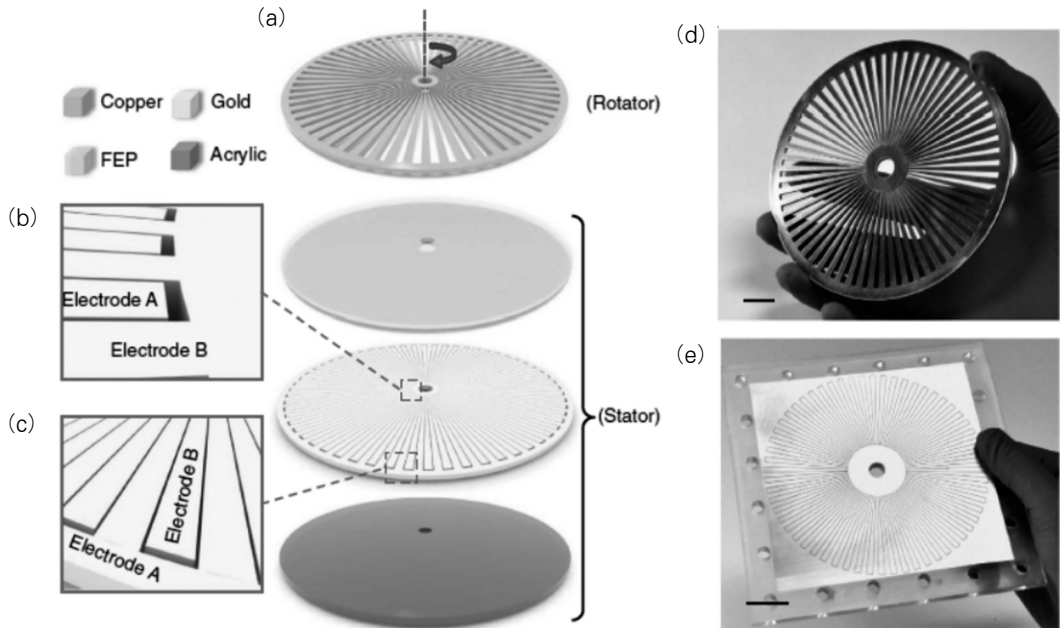


그림 4 회전타입 마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅 장치의 구조 (a) 장치의 개념도, (b, c) 내부 패턴 전극의 개념도, (d) 회전 기판의 사진, (e) 비회전 기판의 사진<sup>(2)</sup>

동작할 때 측정된 전류 및 전압 신호이다. 깃발의 필럭임에 의해서 깃발과 벽이 접촉하는 순간 그림 3(a, b)의 i-ii에서 확인할 수 있는 것처럼 순간적인 전류 및 전압 신호가 측정된다. 그리고 깃발이 벽으로부터 분리되면서 그림 3(a)의 iii에서 확인할 수 있는 것처럼 반대방향의 전류 신호가 관측된다. 그림 3(b)의 전압 신호는 실제 축전기의 전기 에너지 저장에 이용될 수 있도록 마이너스 신호와 플러스 신호가 정류되어서 플러스 값으로 관측이 되었다. 마찰대전을 이용한 에너지 하베스팅 시스템은 그림 3(b)에서 보이는 것처럼 순간적으로 120 V 이상의 높은 전압이 생성되기 때문에, 고전압을 요구하는 전자기에 응용이 가능하며, 생산되는 전기 에너지의 총량도 매우 높다. 그림 3(c)는 깃발을 이용한 에너지 하베스팅 시스템을 자동차 외벽에 부착을 하여 실제 축전기의 충전에 응용한 예시이다. 그림 3(c)에서 나타난 축전기의 양단에서 측정된 전압 값이 시간에 따라서 증가하는 것을 통해서, 시스템이 전기 에너지를 성공적으로 저장하고 있음을 확인할 수 있다.

실제로 깃발을 이용한 에너지 하베스팅 시스템

은 매우 다양한 형태로 응용이 가능하다. 바람이 많이 부는 장소에 단순히 깃발을 세워놓는 형태로 전기 에너지 생산을 하는 것도 가능하며, 풍향계에 부착을 하여 바람의 방향이 변화하는 것에도 순간적으로 대처를 하여 지속적인 에너지 생산이 가능하다. 또한 그림 3(c)에 나타난 것처럼 고속으로 이동하는 자동차나 기차 또는 비행기에 부착을 하는 형태로도 활용이 가능하다. 기본적으로 단순한 깃발을 이용하기 때문에 작은 크기로도 제작이 가능하며 제작 단가도 매우 낮다. 그리고 여러 개의 깃발을 병렬로 설치하면 규모가 큰 발전 시스템으로도 응용할 수 있으며, 소음과 환경오염의 우려가 없다는 것이 장점이다.

#### 4. 회전하는 기판의 마찰대전을 이용한 에너지 하베스팅 장치

또 다른 주목할 만한 마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅 시스템은 조지아 공대의 왕종린 교수팀이 개발한 회전하는 기판의 마찰대전을 이용한 장치이다<sup>(2)</sup>. 회전 타입의 마찰전기 에너지

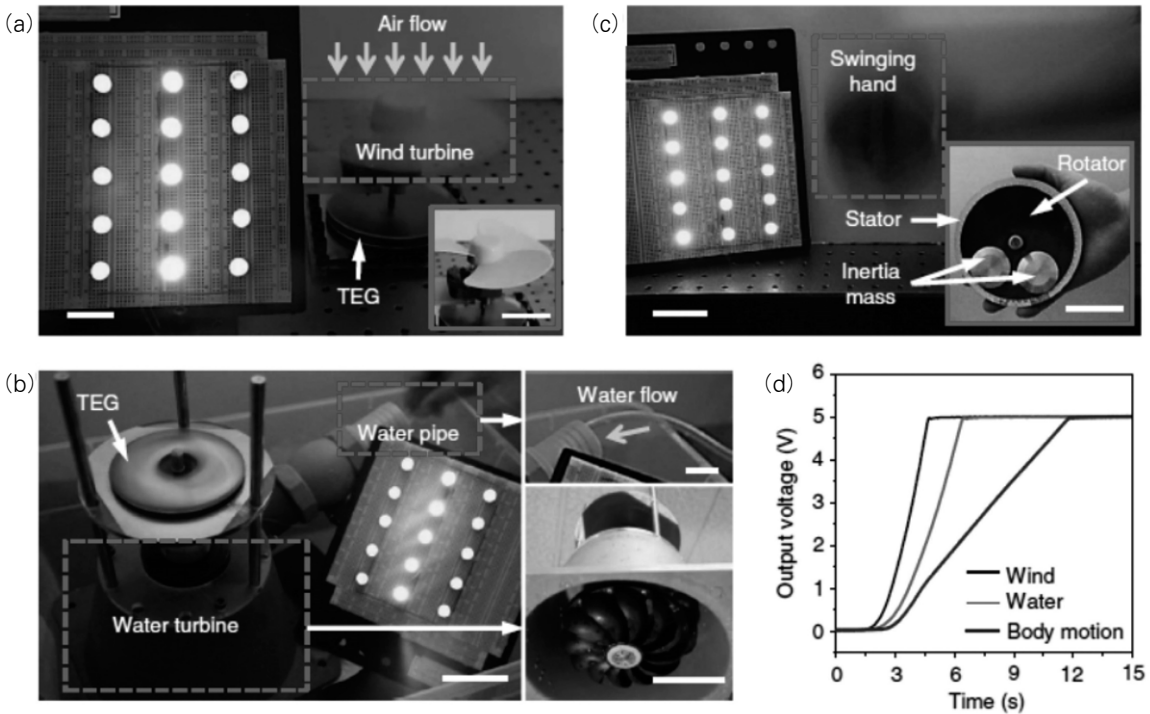


그림 5 회전 타입 에너지 하베스팅 장치의 응용 사례 (a) 풍력 에너지 하베스팅 적용 사례, (b) 수력 에너지 하베스팅 적용 사례, (c) 진동자를 이용한 에너지 하베스팅 사례, (d) 각 메커니즘을 이용한 장치들의 출력 전압<sup>(2)</sup>

하베스팅 장치의 개념도가 아래의 그림 4에 도시되어 있다. 이 장치는 기본적으로 전자친화도가 서로 다른 물질로 제작된 회전기판과 비회전기판으로 구성되어 있다. 회전기판은 상대적으로 전자친화도가 높고 단가가 낮은 구리(copper)로 제작이 되며, 비회전기판의 상층부는 전자친화도가 낮은 fluorinated ethylene propylene(FEP)로 제작된다. 회전 시 회전기판과 비회전 기판의 접촉/분리를 지속적으로 발생시키기 위해서 상층부의 기판은 그림 4(d)에 나타난 것처럼 방사형의 빔살을 지닌 구조를 지닌다. 마찰대전으로 발생한 전위차를 외부 전류로 전환시키기 위해서 비회전 기판의 FEP층 아래에는 금으로 제작된 전극이 위치하며, 이 전극은 회전 구리 기판과 연결이 되어 마찰 대전이 발생할 때마다 그림 1과 유사한 형태로 구리기판과 전극 사이에 맴돌이 전류가 발생한다. 또한 에너지 하베스팅 장치에 전력 조절 회로(power management circuit)가 연결되어 회전 기판의 각 빔살들이 접촉할 때 발생하

는 전력을 수집하여 일정한 출력 전압을 유지할 수 있도록 구성되어 있다.

회전 타입의 마찰전기 에너지 하베스팅 장치의 장점은 우리 주변의 다양한 에너지원들을 간단한 기계장치를 통하여 회전에너지로 변환시키기 용이하다는 점이다. 그림 5는 회전 타입 마찰전기 에너지 하베스팅 장치를 이용하여 풍력, 수력 및 진동 에너지를 전기 에너지로 변환시킨 응용사례이다. 그림 5(a)는 풍력 발전용 터빈(wind turbine)에 회전 타입의 마찰전기 에너지 하베스팅 장치를 부착하여 바람에 에너지를 전기 에너지로 변환시킨 사례이다. 풍력 발전용 터빈이 바람의 에너지를 기계장치의 회전 에너지로 변환시키고, 이 회전에너지는 다시 회전타입 마찰전기 에너지 하베스팅 장치를 통해서 전기 에너지로 변환된다. 그림 5(b)는 유사한 시스템을 수력 발전용 터빈(water turbine)을 이용하여 구성한 사례이다. 그림 5(c)는 비대칭 질량 분포를 지닌 회전자를 이용하여 진동 에너지를 기계장치의 회

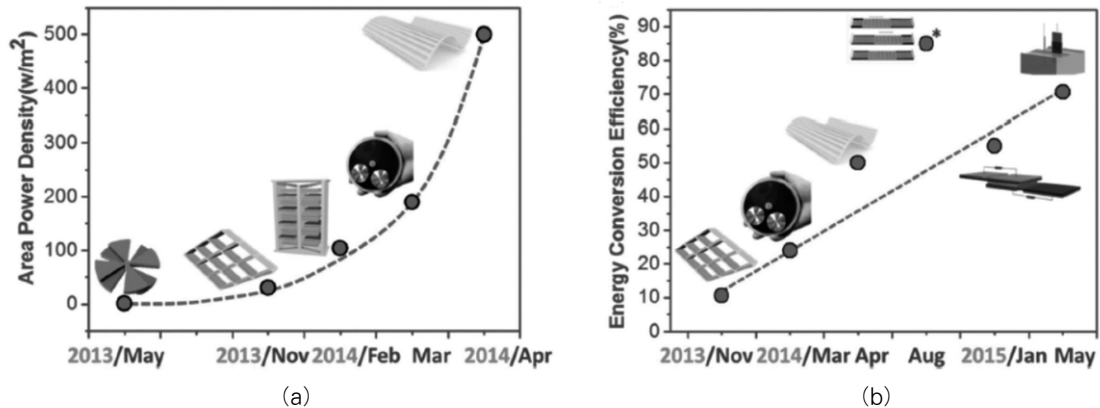


그림 6 최근 2년간 마찰전기 에너지 하베스팅 시스템의 발전 요약<sup>(3)</sup> (a) 단위 면적당 전력, (b) 에너지 전환 효율

전 에너지로 그리고 다시 회전 에너지를 전기 에너지로 전환시키는 장치를 구성한 사례이다. 모든 응용 사례에서 전력 조절 회로를 통하여 일정한 출력 전압이 발생하는 것을 확인할 수 있다 [그림 5(d)].

## 5. 맺음말

이 글에서는 마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅 시스템의 기본 원리와 그 응용사례로서 깃발을 이용한 시스템과 기계회전을 이용한 시스템에 대해서 간단히 알아보았다. 마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅 시스템은 높은 수준의 전력을 출력하면서도 소음이나 환경 오염의 우려가 없고, 간단한 공정으로 쉽게 제작이 가능하기 때문에 실생활에서 다양한 형태로 응용이 가능하다. 또한 한번 설치된 장비의 내구성이 매우 높고, 일반적인 전기 생산 시설과는 달리 센티미터 스케일의 크기에서부터 미터 스케일까지 다양한 크기로 제작이 가능하다. 이러한 다양한 장점으로 인해 마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅 기술은 에너지 문제를 해결할 수 있는 중요한 대안 중 하나로 각광받고 있다. 특히 최근 2년간의 집중적인 연구를 통해서 괄목할만한 성장을 이루었는데, 일례로 개발 초기의 마찰 전기 에너지 하베스팅 시스템이 ~1 W/m<sup>2</sup> 수준의 출력 전압을 생산하였으나 2015년 현재 최대 500 W/m<sup>2</sup> 수준

의 출력 전압을 생산하는 시스템이 개발되었으며 순간 에너지 전환 효율은 최대 70%에 육박하고 있다(그림 6). 마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅 시스템의 성능 도약은 지금 현재에도 계속해서 이루어지고 있으며, 본격적인 개발이 이루어진지는 이제 겨우 만 4년여 밖에 되지 않았기 때문에 시스템의 발전 가능성도 매우 높다. 마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅 시스템의 성능 향상이 효과적으로 이루어져 가까운 장래에 우리 주변에서 마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅 기계 시스템을 찾아볼 수 있게 되기를 기대한다. [KSNVE](#)

## 참고문헌

- (1) Bae, J. et al., 2014, Flutter-driven Triboelectrification for Harvesting Wind Energy, *Nature Communications*, Vol. 5, p. 4929.
- (2) Zhu, G. et al., 2014, Radial-arrayed Rotary Electrification for High Performance Triboelectric Generator, *Nature Communications*, Vol. 5, p. 3426.
- (3) Wang, Z. L. et al., 2015, Progress in Triboelectric Nanogenerators as a New Energy Technology and Self-powered Sensors, *Energy Environ. Sci.*, Vol. 8, pp. 2250~2282.