



# 두 원통형 구조물의 접촉-분리를 활용한 마찰대전 바람 에너지 하베스터

## Wind-powered Triboelectric Nanogenerator Using Contact-separation of Two Cylindrical Structures

최종안<sup>1</sup>, 정진구<sup>1</sup>, 강민규<sup>2</sup>, 표순재<sup>1,2,#</sup>  
Jong-An Choi<sup>1</sup>, Jingu Jeong<sup>1</sup>, Mingyu Kang<sup>2</sup>, and Soonjae Pyo<sup>1,2,#</sup>

<sup>1</sup> 서울과학기술대학교 기계설계로봇공학과 (Department of Mechanical Design and Robot Engineering, Seoul National University of Science and Technology)  
<sup>2</sup> 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology)  
# Corresponding Author / E-mail: sjpyo@seoultech.ac.kr, TEL: +82-2-970-6375  
ORCID: 0000-0002-2882-5923

KEYWORDS: Triboelectric effect (마찰대전 효과), Triboelectric nanogenerator (마찰대전 나노발전기), Wind energy (바람 에너지), Rotating structure (회전 구조), Energy harvesting (에너지 수확)

*In this paper, we develop a cylindrical triboelectric nanogenerator (TENG) for omnidirectional wind energy harvesting, by designing a slanted slit structure along the outer surface of the cylinder. The TENG consists of an inner cylinder based on Al film and a 3D printed outer structure. Wind blowing through the slits of the outer structure causes the inner cylinder to rotate in the slanted direction, and the contact-separation between the Al cylinder and polytetrafluoroethylene attached to the inner surface of the outer structure generates an output voltage. The performance of the harvester with different inner cylinder diameters under various wind speeds is experimentally studied. The results indicate that the TENG with a smaller Al cylinder is suitable for a self-powered wind speed sensor while that with a larger cylinder is optimal for efficient energy harvesting. In addition, the TENG is capable of harvesting wind energy in all directions. Its potential utility to be used as a supplementary power source for small electronic devices is verified through various experiments. Based on its compact size, simple design, and ease of manufacturing, the proposed TENG can be used as a low-cost, portable harvester.*

Manuscript received: March 6, 2023 / Revised: June 13, 2023 / Accepted: July 14, 2023  
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2022

### 1. 서론

일상적으로 버려지거나 사용하지 않는 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 기술들을 에너지 하베스팅 기술(Energy Harvesting Technology)이라 하며, 태양, 바람, 열, 파도, 진동, 신체의 움직임과 같이 자연 혹은 주변 환경에서 필연적으로 발생하는 에너지원을 활용하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다[1-6]. 에너지 하베스터는 태양열 발전기, 풍력 발전기와 같이 현재 상용화된 대형 발전기와 비교했을 때 큰 전력을 생산할 수는 없지만 상대적으로 크기가 작기 때문에, 일상 생활에서 작은 공간으로

도 에너지를 수확할 수 있고, 설치가 쉽다는 장점을 갖고 있다. 따라서, 일상 생활에서 저전력이 요구되는 소형 전자 부품 및 기기에 지속적으로 에너지를 공급하기에 용이하다[7,8].

다양한 에너지 하베스팅 원리 중 서로 다른 전기 음성도를 가지는 두 물질 간 접촉과 분리에 의하여 전기적으로 대전되는 현상인 마찰대전 효과(Triboelectric Effect)와 전하 유도 현상을 활용한 마찰대전 나노발전기(Triboelectric Nanogenerator, TENG)가 최근 들어 활발하게 연구되고 있다[9,10]. TENG 기반 에너지 수확 방식은 저렴하고 다양한 재료들을 활용할 수 있어 열전 발전에 비하여 가격 경쟁력이 상대적으로 우수하고,

넓은 대역폭의 진동 에너지를 수확할 수 있기 때문에 압전 방식에 비하여 활용 가능성이 높다. 즉, 건물/기계의 진동, 자연 현상과 같은 수많은 에너지원으로부터 접촉과 분리만으로 에너지를 수확할 수 있기 때문에 효율적인 에너지 수확이 가능하며, 넓은 활용처를 가진다.

바람은 자연 및 실생활에서 쉽게 관측 가능하고 지속적으로 이용 가능한 친환경적인 에너지원으로, 바람으로부터 전력을 생산하기 위해 터빈을 활용하는 등 과거부터 널리 사용되고 있다 [11]. 거대한 구조를 가져 높은 풍속 하에서만 작동하며 공간적 제약이 크고 소음, 환경문제와 같은 문제점을 가지는 전통적인 대형 풍력 발전기와는 달리 에너지 하베스터들은 소형으로 제작할 수 있어 공간활용도가 우수하고 휴대성이 용이하다는 장점을 가진다. 최근 들어 바람 에너지 수확을 위하여 다양한 재료와 구조를 활용한 TENG 연구들이 보고되고 있다[12-17]. 예를 들어, Yuan 등은 웨이크 갠로핑(Wake Galloping) 현상을 활용하여 저풍속(1 m/s)의 바람으로부터 에너지를 수확할 수 있는 TENG를 개발하였다[16]. 제작된 하베스터는 간단한 구조를 가지며 매우 가볍다는 장점이 있지만(8.5 g), 특정 풍향에 대해서만 작동한다는 단점을 가진다. Wang 등은 초경량 점토를 활용하여 160 V 이상의 출력 전압을 나타내며 전방향 바람 에너지를 수확할 수 있는 풍선 구조의 TENG를 개발하였다[17]. 하지만, 부피가 크고 외부 구조가 움직여야 하기 때문에 설치 가능한 장소가 한정된다. 하베스터의 장점인 지속적인 에너지 수확과 공간 활용도를 심분 활용하기 위해서는 시간 및 장소에 따라 불규칙한 풍향과 풍속에 대해 에너지를 수확할 수 있는 하베스터 개발이 요구된다.

본 연구에서는 임의의 방향에서 불어오는 바람 에너지 수확을 위해 경사진 슬릿(Slit) 구조가 원통 구조로 배열된 부유식 원통형 TENG를 개발하였다. 제작된 TENG는 외부 구조물이 고정되어 있고 내부 원통이 회전하며 외부 구조물 내면과 내부 원통 외면이 접촉과 분리를 반복하여 전압을 생산하는 구조이다. 따라서, 외부 환경에 노출되어 움직이는 부품이 없어 공간 활용에 용이하며 여러 개의 소자를 배열하여 바람 에너지를 수확하고자 할 때 매우 유용하다. 실험을 통해 소자에 가해지는 풍속이 증가함에 따라 출력 전압도 증가하는 것을 확인하였으며, 전방향에서 불어오는 바람에 대해 동일한 성능으로 에너지 수확이 가능함을 입증하였다. 또한, 수확된 에너지를 다양한 정전용량을 가진 커패시터(Capacitor)에 저장하고 다수의 LED 및 전자시계를 구동함으로써 제안하는 하베스터가 소형 전자 부품의 보조 전력원으로 활용 가능함을 보였다.

## 2. 하베스터의 제작 및 구동 원리

### 2.1 구조 및 제작 방법

제안하는 부유식 원통형 하베스터의 사진과 구조는 Fig. 1과 같다. 원통 형상을 가진 TENG의 외부 구조는 6개의 슬릿이

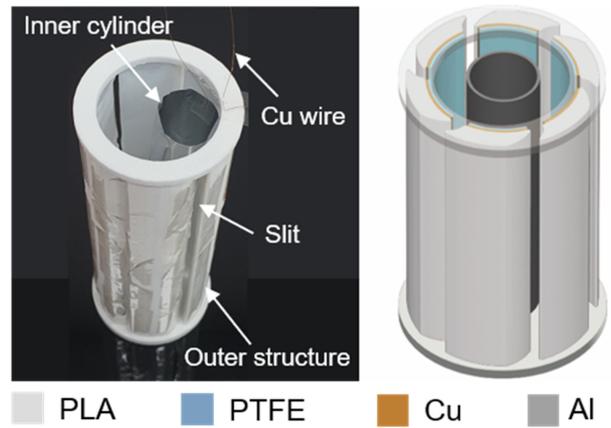


Fig. 1 Photograph and schematic of the proposed wind-powered triboelectric nanogenerator based on two cylindrical structures

원형으로 형성되도록 배치되어 있으며, 각각의 슬릿은 임의의 방향에서 불어오는 바람에 대해 슬릿 내부에 와류를 유도하기 위한 목적으로 설계되었다. 슬릿 형성을 위한 외부 구조물은 3D 프린팅을 활용하여 Polylactic Acid (PLA) 소재로 제작하였고, 원통형 구조의 지름과 높이는 각각 50, 160 mm이다. 내부 원통과의 접촉-분리에 따른 마찰대전 효과를 유도하기 위해 6개의 외부 구조물 내면에 0.05 mm 두께의 Polytetrafluoroethylene (PTFE)가 30 × 140 mm<sup>2</sup>의 크기로 부착되어 있으며, 발생하는 전력을 수확하기 위해 PTFE 뒷면에 동일한 크기를 가지는 Cu 전극을 배치하였다. 6개의 외부 구조물을 고정하는 하단, 상단 고정부 또한 3D 프린팅으로 제작된 PLA 소재로 이루어져 있다. 두 개의 고정부 모두 외경은 50 mm이지만, 상단 고정부는 내부 원통의 출입을 위하여 내경 35 mm의 중공축 모양으로 제작했으며, 하부 고정부는 6개의 외부 구조물을 고정하기 위한 홈이 형성되어 있다. 외부 구조물 내부에서 회전하는 내부 원통은 바닥면에 고정되어 있지 않고 부유되어(Freestanding) 있는 형태로 외부 구조물 내에서 수평방향으로 자유롭게 움직일 수 있다. 내부 원통은 Al 필름을 원형으로 굴곡시킨 뒤 테이프로 고정하여 제작하였으며, 두께 0.03 mm, 높이 130 mm의 크기를 갖는다. 본 연구에서는 내부 원통의 지름에 따른 에너지 수확량을 비교하기 위하여 4개의 서로 다른 지름(22.5, 25, 27.5, 30 mm)을 갖는 내부 원통을 준비하였다. 마지막으로 Cu 와이어를 이용하여 PTFE와 Al을 전기적으로 연결하였다. 제안하는 하베스터의 제작 공정은 매우 간단할 뿐만 아니라 손쉽게 조립과 분리가 가능하고 휴대성이 용이하므로 야외에서 사용할 수 있는 휴대용 바람 에너지 하베스터로 활용 가능하다.

### 2.2 구동 원리

Fig. 2(a)와 같이 TENG에 바람이 불어오면 슬릿 구조로 인해 외부 원통 내부에 회전하는 와류가 발생하고 이에 따라 내부 원통은 반시계 방향으로 회전하게 된다. 이 회전에 의하여 6개의 외부 구조물 안쪽에 부착되어 있는 PTFE와 내부 원통의 Al이

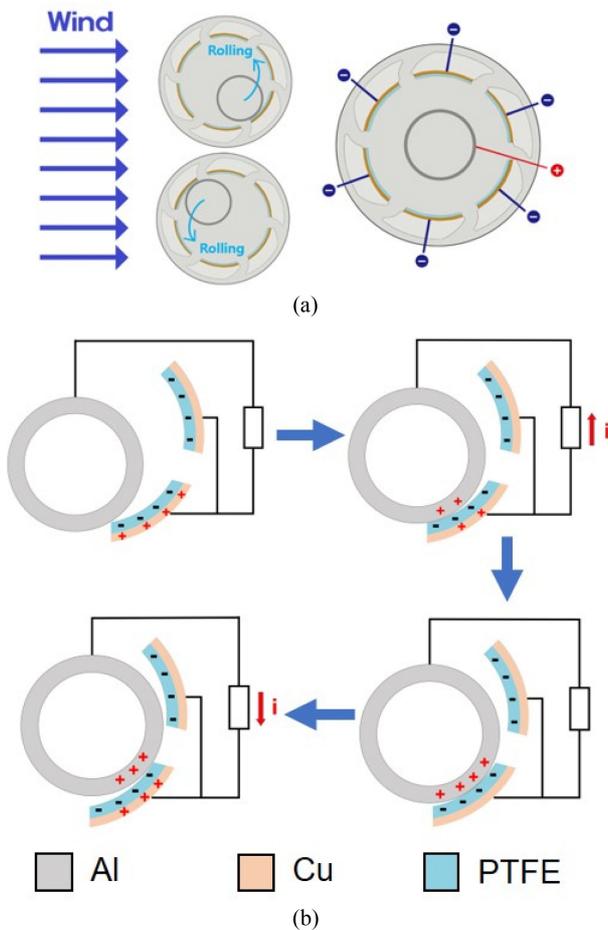


Fig. 2 (a) Principle that the inner cylinder rotates by the input wind. (b) Schematic illustration presenting triboelectric effect between Al and PTFE when they are contacted and separated

반복적으로 접촉과 분리를 일으킨다. 외부 구조물은 고정되어 있고 내부 원통이 외부 구조물 내에서 회전하는 구조이기 때문에, 프로펠러 기반 바람 에너지 하베스터에서 필연적으로 발생하는 외부 움직임이 발생하지 않아 에너지 수확에 필요한 공간을 줄일 수 있다. Fig. 2(a)의 오른쪽 그림은 접촉/분리에 따른 마찰대전 효과로 인해 발생하는 전력을 수확하기 위한 전기적 배선을 나타낸다. 6개의 PTFE는 하나의 전극으로 연결되었고, 내부 Al 원통과 전기적으로 연결하여 두 소재의 전위차로 인해 발생한 전력을 수확한다. Fig. 2(b)는 내부 원통 외벽의 Al과 외부 구조물 내벽의 PTFE가 접촉할 때 발생하는 전류의 이동을 나타낸다. Al과 PTFE가 접촉하게 되면 Al은 상대적으로 전기적 양성을 띄고 PTFE는 전기적 음성을 가지게 되며, 전위차에 의한 전류가 Cu 와이어를 통해 두 전극 사이에 흐르게 된다. 내부 원통이 회전하면서 두 면이 분리되는 경우에는 전류가 반대로 발생한다. 내부 원통이 회전함에 따라 6개의 접촉면에서 이러한 과정이 반복적으로 일어나기 때문에 지속적인 전력 수확이 가능하다.

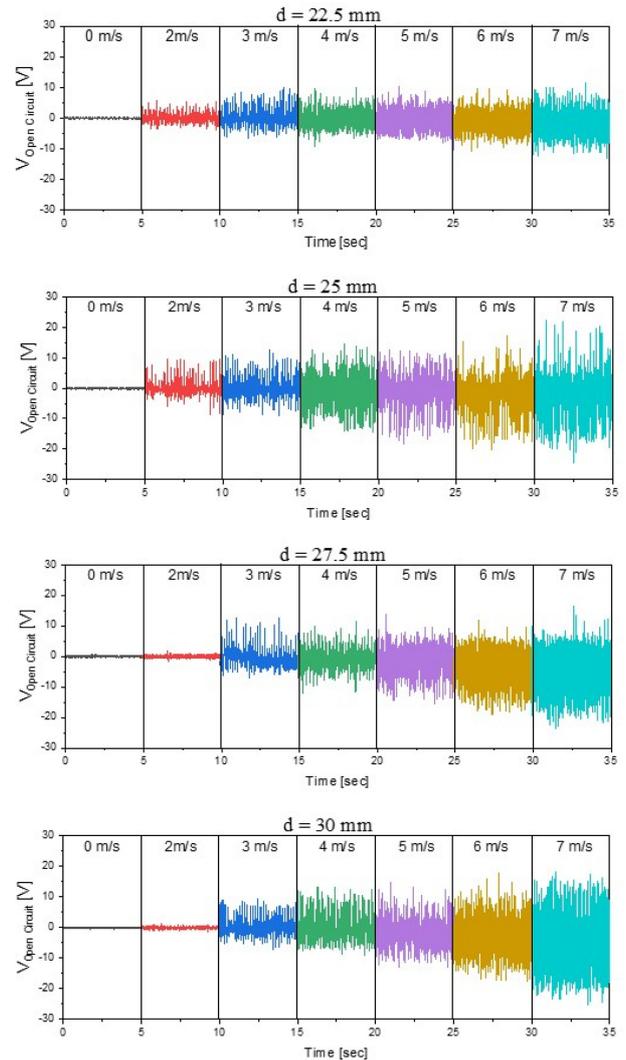


Fig. 3 Output voltage of the harvester using the inner cylinder with different diameters (22.5, 25, 27.5, and 30 mm) when the wind speed increases from 0 to 7 m/s

### 3. 실험 결과

#### 3.1 실험 방법

제작된 TENG의 성능 평가를 위해 직접 제작한 소형 풍동 시스템에서 풍속 및 풍향에 따른 전기적 출력 특성을 측정하였다. 출력 전압은 오실로스코프(TBS 2102B, Tektronix)와 1,000 : 1 고전압 패시브 프로브(P6015A, Tektronix)를 활용하여 측정하였으며, 동일한 오실로스코프에 저잡음 전류 증폭기(SR570, Stanford Research)를 연결하여 전류를 측정하였다. 모든 데이터는 오실로스코프에 연결된 컴퓨터를 사용하여 수집되고 처리되었다.

#### 3.2 실험 결과 및 고찰

Fig. 3은 풍속의 변화에 따른 소자의 개방회로 전압(Open

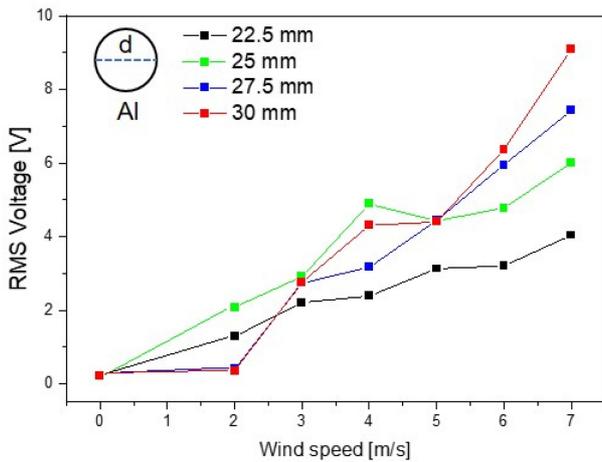


Fig. 4 Effect of wind speed on RMS voltage of the TENG with various inner cylinder diameters

Circuit Voltage)을 나타낸다. 내부 원통의 지름이 서로 다른 4개의 소자 모두 풍속이 증가할수록 전압이 증가하는 경향성을 보였다. 이는 고풍속 하에서 내부 원통이 더 빠르게 회전하여 내부 원통과 외부 구조물 내벽 사이의 접촉-분리가 더 빠르게 자주 발생하기 때문이다[18]. 비교적 낮은 풍속인 2 m/s의 바람에서는 내부 원통의 지름이 작은 두 소자( $d = 22.5, 25$  mm)는 작동을 하지만, 상대적으로 큰 지름을 가지는 두 소자( $d = 27.5, 30$  mm)는 내부 원통이 거의 움직이지 않아 출력 전압이 매우 작다. 이는 지름이 커질수록 내부 원통의 무게 또한 증가하여 Al과 PTFE의 접촉-분리가 거의 발생하지 않기 때문이며, 이를 통해 작동을 위한 임계 유속은 내부 원통의 무게와 밀접하게 연관되어 있음을 추측할 수 있다. Fig. 4는 2-7 m/s의 입력 풍속에 대한 내부 원통의 지름 크기별 실효(Root Mean Square, RMS) 전압 값을 보여준다. 앞서 설명한 바와 같이 풍속이 증가할수록 RMS 전압도 증가하는 경향성을 보이며, 고풍속(6 m/s 이상) 하에서는 지름이 큰 내부 원통이 외부 구조물과 접촉하는 면적이 더 넓기 때문에 RMS 전압도 큰 것을 확인할 수 있다. 하지만, 마찰대전 효과를 활용하는 하베스터의 특성상 바람으로 인해 발생하는 내부 원통의 회전 속도와 지름 크기에 따른 접촉면적 변화, 두 가지 요소가 서로 반대로 작용하기 때문에 RMS 전압이 일정하게 증가하지는 않는다. 그럼에도 불구하고, 지름의 크기가 작으면 가벼운 무게로 인해 저속에도 민감하게 반응하므로 작은 내부 원통 기반 TENG는 자가구동 풍속 센서에 적합한 특성을 보이며, 큰 지름의 내부 원통으로 제작된 하베스터는 고풍속에서 최대 효율의 에너지 수확이 가능하므로 내부 원통 크기에 따라 적합한 응용처에 충분히 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

현재까지 개발된 많은 TENG 기반 바람 에너지 하베스터는 특정 방향의 바람에만 작동하는 풍향 의존성을 보인다. 모든 풍향에 대응하기 위하여 소자를 실시간으로 회전시키거나 방사형으로 배열할 수 있지만 이러한 추가 작업은 대형 발전기 대비 에너지 하베스터가 갖는 장점을 활용하기 어렵게 만든다. 본

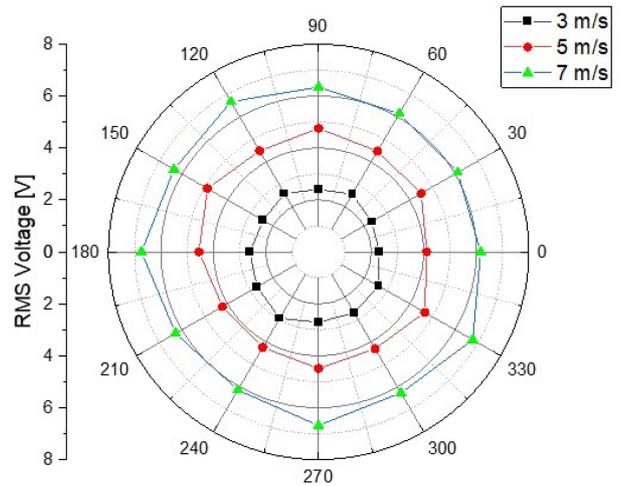
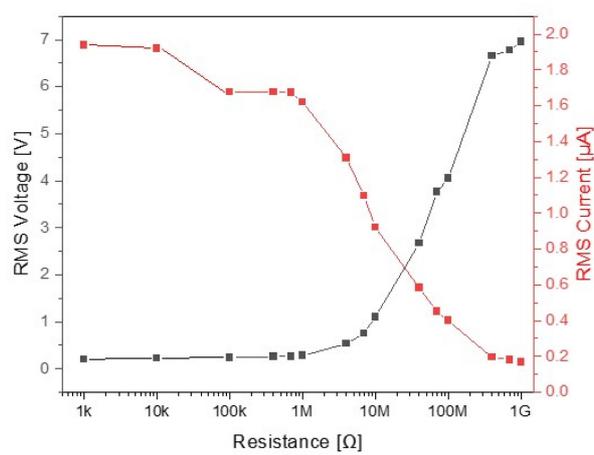


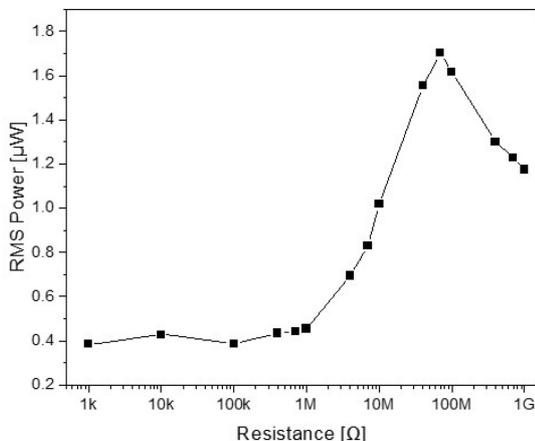
Fig. 5 RMS voltage output of the TENG at different wind speeds when changing the wind direction by a 30° interval

연구에서 개발한 원통형 하베스터는 슬릿 구조로 인하여 임의의 방향에서 바람이 불어와도 원통 내부에 회전하는 와류를 만들어낼 수 있어 모든 풍향에 대응한 에너지 수확이 가능하다. 하베스터의 전방향성을 확인하기 위하여 Fig. 5와 같이 다양한 풍속 하에서 바람의 입력 방향을 30° 간격으로 변화시켜가며 RMS 전압을 측정하였다. 실험 결과, 동일한 풍속 하에서 풍향에 관계없이 유사한 값을 가지며, 이는 제안하는 하베스터가 전방향 풍력 에너지를 수확할 수 있다는 것을 입증한다.

다음으로 수확된 에너지를 소형 전자 부품 및 기기의 보조 전력으로 활용 가능한지를 검증하기 위하여 6 m/s 풍속 하에서 하베스터와 연결된 부하 저항을 1 kΩ에서 1 GΩ까지 증가시키며 임피던스 매칭 실험을 진행하였다. Fig. 6(a)는 부하 저항에 따라 일정한 풍속 하에서 6.4초간 측정된 출력 전압과 전류를 RMS 값으로 변환한 결과이다. 저항이 증가함에 따라 RMS 전압은 증가하고 RMS 전류는 감소하는 경향을 보였다.  $P = IV$  식을 이용하여 계산한 최대 RMS 전력은 400 mW의 부하 저항에서 약 1.7 μW였다(Fig. 6(b)). Fig. 7(a)는 TENG에서 발생하는 교류전압을 직류전압으로 변환하기 위하여 6 m/s의 풍속 조건에서 정류회로를 거쳐 측정된 전압을 보여준다. Fig. 7(b)는 정류 회로를 사용해 1 μF부터 22 μF까지 다양한 용량의 커패시터를 충전한 결과이다. 저장량의 커패시터는 하베스터 작동 초기에 빠르게 반응하고 커패시터의 용량이 늘어날수록 느리게 충전되는 모습을 보이며, 1 μF의 커패시터를 150초간 충전했을 때 커패시터 양단의 전압차는 약 9.8 V였다. 본 연구진은 제안하는 하베스터를 통해 수확된 전력의 실시간 활용 가능성을 검증하기 위하여 LED 작동을 시연하였다. 6 m/s의 바람이 가해질 때 Fig. 7(c)와 같이 직렬 연결된 10개의 LED가 실시간으로 작동하는 것을 확인하였다. 추가로, 커패시터에 충전된 전력을 활용하여 전자시계를 구동하였다. Fig. 8(a)는 33 μF 용량의 커패시터를 활용하여 TENG와 연결된 전자시계를 15초 동안 작동시킨 사진이다. 6 m/s의 바람에 대해 Fig. 8(b)와 같이 약 400초에



(a)

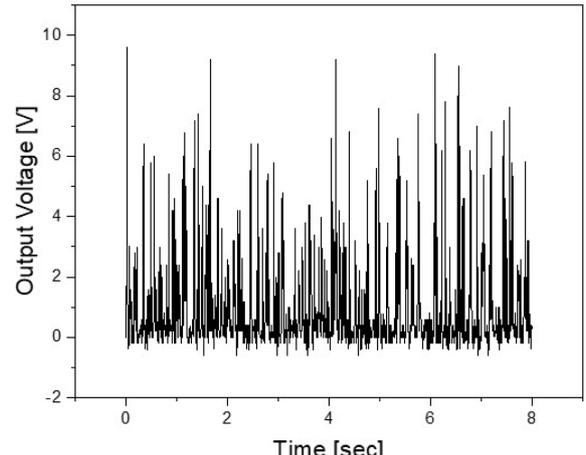


(b)

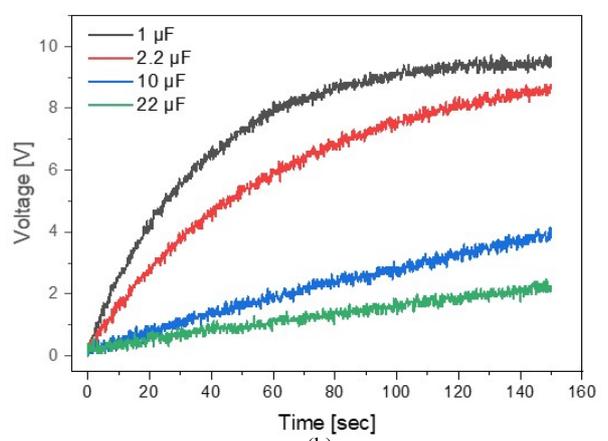
Fig. 6 Impedance-matching result when the wind speed is 6 m/s. (a) RMS voltage and current of the TENG as a function of external load resistance. (b) Dependence of the RMS power on the load resistance

걸쳐 에너지를 수확하였으며 충전된 커패시터를 활용하여 전자 시계를 구동할 수 있었고, Fig. 8(c)에 나타난 바와 같이 시계가 작동할 때 커패시터는 전압강하를 일으킨다. 이는 제안하는 TENG가 상용 전자부품에 전력을 공급하기에 충분한 에너지를 생산할 수 있음을 의미한다. 이번 연구에서는 필요한 전력이 상대적으로 작은 LED 실시간 구동 및 충전된 커패시터를 활용한 전자시계 구동을 수행하였으나, 전력관리칩과 연결하여 에너지를 충전해서 사용할 경우 다양한 소형 센서들도 구동할 수 있을 것으로 예상된다.

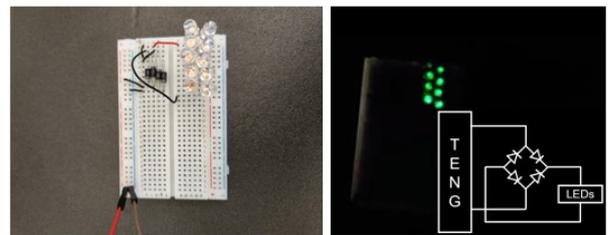
마지막으로 외부 환경에서 하베스터 성능을 평가하였다(Fig. 9(a)). 풍동 실험과 동일한 장비를 활용하여 전압을 측정하였으며, 상용화된 풍속계를 통해 구간 내 최대 풍속을 측정하였다. Figs. 9(b), 9(c), 9(d)는 최대 풍속이 2, 4, 그리고 7 m/s일 때의 출력 전압을 나타낸다. 풍동 환경과는 달리 자연적으로 불어오는 바람의 풍속과 풍향이 일정하지 않기 때문에 지속적이고 일정하게 전력을 수확할 수 없었으나 출력 전압이 발생하는 것을 확인하였으며 최대 풍속 대비 출력 전압도 풍동 실험결과와 유사



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 (a) Rectified output voltage measured when the wind speed is 6 m/s. (b) Charged voltage of four capacitors increasing over time. (c) Photographs exhibiting the successful operation of green LEDs using the electrical energy generated from the harvester

하였다. 다양한 외부 환경 중에서도 바람이 지속적으로 빠르게 부는 환경에 설치한다면 하베스터의 효율성을 최대한 활용할 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 경사각을 가진 슬릿 구조를 원통 형상으로 설계하여 전방향 바람 에너지 수확이 가능한 TENG를 개발하였다.

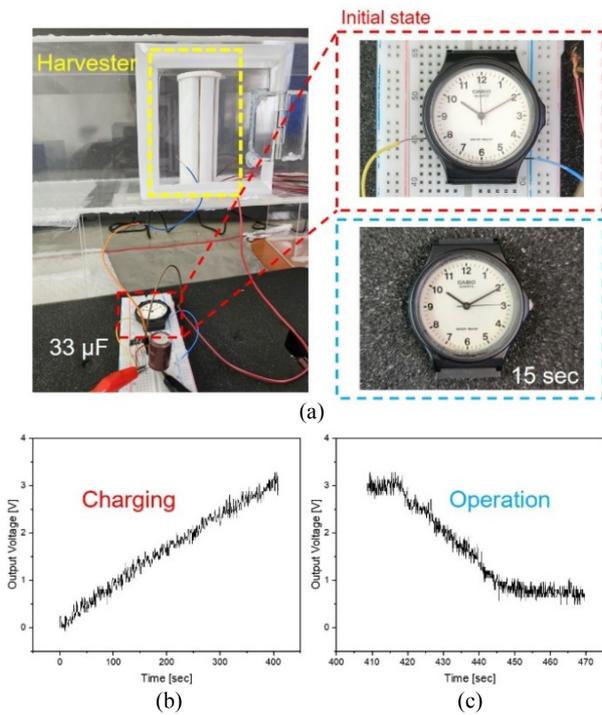


Fig. 8 (a) Photograph of the electronic watch operated for 15 s. (b) Voltage of the capacitor (33  $\mu\text{F}$ ) at a wind speed of 6 m/s. (c) Voltage drop of the capacitor when the watch operates

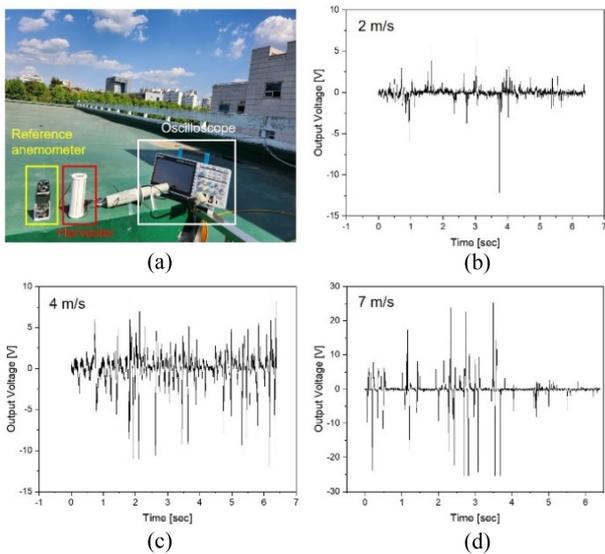


Fig. 9 (a) Photograph of the device placed outdoor environment. (b)-(d) Output voltage of the harvester at wind speed up to 2, 4, and 7 m/s

소자는 AI 필름으로 제작한 내부 원통과 3D 프린팅을 이용해 제작한 외부 구조물로 구성되었다. 외부 구조물의 슬릿을 통해 바람이 들어오면 내부 원통이 경사진 방향으로 회전하고 내부 원통의 AI과 외부 구조물 내면에 부착된 PTFE의 접촉-분리에 의해 전압이 발생하는 것을 확인하였다. 내부 원통의 지름 및

풍속에 따른 하베스터의 성능 검증을 위한 실험을 수행하였으며, 지름의 길이에 따라 고효율 에너지 하베스터 또는 자가구동 풍속 센서로 활용할 수 있음을 확인하였다. 또한 개발한 하베스터는 바람이 불어오는 방향과 상관없이 에너지를 수확할 수 있었으며, 임피던스 매칭, 커패시터 충전, LED 및 전자시계 구동 실험을 통해 소형 전자부품의 보조 전력원으로 활용할 수 있음을 입증하였다. 제작한 소자는 비교적 작고 간단한 구조로 설계되어 휴대성이 용이하며, 외부 구조물이 고정되어 주변 환경에 큰 영향을 받지 않아 효율적인 공간 활용에 유리하다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Shaikh, F. K., Zeadally, S., (2016), Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 1041-1054.
2. Yun, Y., Jang, S., Cho, S., Lee, S. H., Hwang, H. J., Choi, D., (2021), Exo-shoe triboelectric nanogenerator: Toward high-performance wearable biomechanical energy harvester, *Nano Energy*, 80, 105525.
3. Kishore, R. A., Priya, S., (2018), A review on low-grade thermal energy harvesting: Materials, methods and devices, *Materials*, 11(8), 1433.
4. Rodrigues, C., Nunes, D., Clemente, D., Mathias, N., Correia, J., Rosa-Santos, P., Taveira-Pinto, F., Morais, T., Pereira, A., Ventura, J., (2020), Emerging triboelectric nanogenerators for ocean wave energy harvesting: State of the art and future perspectives, *Energy & Environmental Science*, 13(9), 2657-2683.
5. Panda, S., Hajra, S., Mistewicz, K., In-na, P., Sahu, M., Rajaiitha, P. M., Kim, H. J., (2022), Piezoelectric energy harvesting systems for biomedical applications, *Nano Energy*, 100, 107514.
6. Vasiliev, M., Nur-E-Alam, M., Alameh, K., (2019), Recent developments in solar energy-harvesting technologies for building integration and distributed energy generation, *Energies*, 12(6), 1080.
7. Zeadally, S., Shaikh, F. K., Talpur, A., Sheng, Q. Z., (2020), Design architectures for energy harvesting in the Internet of Things, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128, 109901.
8. Ko, H.-J., Kwon, D.-S., Bae, K., Kim, J., (2022), Self-suspended shell-based triboelectric nanogenerator for omnidirectional wind-energy harvesting, *Nano Energy*, 96, 107062.

9. Luo, J., Wang, Z. L., (2020), Recent progress of triboelectric nanogenerators: From fundamental theory to practical applications, *EcoMat*, 2(4), e12059.
10. Ko, H.-J., Kwon, D.-S., Kim, J., (2022), Cylindrical shell and metal wire-based omnidirectional wind-driven triboelectric nanogenerator, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(10), 753-758.
11. Amano, R. S., (2017), Review of wind turbine research in 21st century, *Journal of Energy Resources Technology*, 139(5), 050801.
12. Chen, B., Yang, Y., Wang, Z. L., (2018), Scavenging wind energy by triboelectric nanogenerators, *Advanced Energy Materials*, 8(10), 1702649.
13. Ko, H.-J., Kwon, D.-S., Pyo, S., Kim, J., (2022), Curved flap array-based triboelectric self-powered sensor for omnidirectional monitoring of wind speed and direction, *Nano Energy*, 102, 107717.
14. Yong, H., Chung, J., Choi, D., Jung, D., Cho, M., Lee, S., (2016), Highly reliable wind-rolling triboelectric nanogenerator operating in a wide wind speed range, *Scientific Reports*, 6(1), 33977.
15. Zeng, Q., Wu, Y., Tang, Q., Liu, W., Wu, J., Zhang, Y., Yin, G., Yang, H., Yuan, S., Tan, D., (2020), A high-efficient breeze energy harvester utilizing a full-packaged triboelectric nanogenerator based on flow-induced vibration, *Nano Energy*, 70, 104524.
16. Yuan, S., Zeng, Q., Tan, D., Luo, Y., Zhang, X., Guo, H., Wang, X., Wang, Z. L., (2022), Scavenging breeze wind energy (1–8.1 ms<sup>-1</sup>) by minimalist triboelectric nanogenerator based on the wake galloping phenomenon, *Nano Energy*, 100, 107465.
17. Wang, K., Zhang, Y., Luo, X., Zhu, L., Wang, Z. L., (2022), Active deformable and flexible triboelectric nanogenerator based on super-light clay, *ACS Applied Electronic Materials*, 4(9), 4764-4771.
18. Lee, J.-S., Yong, H., Choi, Y. I., Ryu, J., Lee, S., (2021), Stackable disk-shaped triboelectric nanogenerator to generate energy from omnidirectional wind, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 9, 557-565.



#### **Jong-An Choi**

M.S. candidate in the Department of Mechanical Design and Robot Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interests are energy harvesters and fabrication of micro sensors.

E-mail: finalplan95@seoultech.ac.kr



#### **Jingu Jeong**

M.S. candidate in the Department of Mechanical Design and Robot Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interests are energy harvesters and micro/nanofabrication.

E-mail: lklk789@seoultech.ac.kr



#### **Mingyu Kang**

B.S. candidate in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interests are additive manufacturing and micro/nano sensors.

E-mail: 99mingue@seoultech.ac.kr



#### **Soonjae Pyo**

Assistant Professor in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interests are modeling, design, and fabrication of micro/nano-systems

E-mail: sjpyo@seoultech.ac.kr