



• 특집 • 나노마이크로 가공 및 응용 소자

# 원통형 쉘 및 금속 와이어 기반의 전방향 풍력 구동 마찰전기 나노 발전기

## Cylindrical Shell and Metal Wire-Based Omnidirectional Wind-Driven Triboelectric Nanogenerator

고희진<sup>1</sup>, 권대성<sup>1</sup>, 김종백<sup>1</sup>,#  
Hee-Jin Ko<sup>1</sup>, Dae-Sung Kwon<sup>1</sup>, and Jongbaeg Kim<sup>1</sup>,#

<sup>1</sup> 연세대학교 기계공학과 (School of Mechanical Engineering, Yonsei University)  
# Corresponding Author / E-mail: kimjb@yonsei.ac.kr, TEL: +82-2-2123-2812  
ORCID: 0000-0003-4434-5871

KEYWORDS: Triboelectric nanogenerator (마찰전기 나노발전기), Wind energy (바람 에너지), Cylindrical shell (원통형 쉘), Metal wire (금속 와이어), Wind energy harvester (바람 에너지 하베스터)

*In this study, we demonstrated a triboelectric nanogenerator composed of a vertical column, and a cylindrical shell, for omnidirectional wind energy harvesting. With a simple structure using a metal wire, the height between the two triboelectric materials can be maintained, and the Al coated shell can also be electrically connected to the electrode. When the shell is deformed by wind, its Al layer and Polytetrafluoroethylene (PTFE) on the outside of the column can be triboelectrically charged. Thus, wind energy can be harvested through a triboelectric energy conversion mechanism. In particular, due to the high flexibility of the shell, the nanogenerator operates even at wind speeds as low as 1 m/s. Although the output voltage is asymmetrical depending on the wind direction due to the metal wire, it was experimentally confirmed that the device can harvest wind energy from all directions. The measured output RMS power was approximately 15  $\mu$ W at a wind speed of 6 m/s.*

Manuscript received: July 7, 2022 / Revised: July 25, 2022 / Accepted: August 5, 2022

### 1. 서론

에너지 하베스팅 기술은 주변의 버려지는 변형, 진동, 전자기장 그리고 열과 같은 에너지원을 유용한 전기 에너지로 변환하는 기술을 통틀어 말한다[1]. 전통적인 대형 발전 설비들과는 다르게, 에너지 하베스터는 작은 크기로 전력을 생산하는 것을 목적으로 하며, 따라서 제작 비용도 낮은 특성을 가지고 있다. 수확된 에너지는 소형 전자 소자에서 요구되는 전력을 보조하거나, 더 나아가 배터리를 완전히 대체할 수 있다. 따라서 이 기술을 활용하면 전체 IoT (Internet of Thing) 노드를 구성하고 유지하는 데에 요구되는 인력과 비용을 절감할 수 있다. 또한 배터리

사용에 따른 잠재적 환경 부담을 감소시킬 수 있다는 장점을 갖기 때문에 다양한 하베스터들이 연구되고 있다.

바람은 주변에 풍부하게 존재하는 친환경적인 기계적 에너지로서, 과거부터 다양한 형태로 활용되어왔다. 기초 및 타워를 활용하여 5-15 m 이상의 높은 고도에 설치되는 대형 발전기와는 다르게, 에너지 하베스터는 일반적으로 설치부의 표면에 부착된다. 또한 이들은 주로 소형 전자 소자와 결합되어 활용되기 때문에 그 크기도 수-cm에 불과하다. 따라서 바람 에너지 하베스터들에 입력되는 풍속은 설치부의 경계 조건에 따라서 제한된다. 실제로, 하베스터들이 설치되기 가장 용이한 지표면 근처에서의 평균적인 풍속은 약 3.3 m/s에 불과하다[2]. 더군다나, 이러한 바람의

속도와 방향은 시간과 위치에 따라서 불규칙적으로 변화한다 [2,3]. 따라서 효과적인 바람 에너지 하베스팅을 위해서, 넓은 풍속 범위에서 작동할 수 있고 전방향의 바람에 대해서 대응할 수 있는 바람 에너지 하베스터의 개발이 요구되고 있다.

이러한 바람 에너지 하베스팅[4]의 대표적인 방식 중 하나는 전통적인 회전 구조를 활용한 바람 유도 회전(Wind-Induced Rotation)이다. 이들은 회전 베어링에 의한 마찰 손실을 피할 수 없기 때문에 태생적으로 저풍속 구간에서 에너지 수확이 힘든 단점을 가지고 있다. 두 번째 방식으로는 유연 구조의 와류유기 진동(Vortex-Induced Vibration), 공탄성 플러터링(Aeroelastic Fluttering), 그리고 갤로핑(Galloping) 등을 활용하는 바람 유도 진동(Wind-Induced Vibration) 방식이 있다. 이 방식은 직접적으로 양력과 항력을 이용하기 때문에 작은 크기로 제작하기 용이하며, 특히, 낮은 범위 풍속에서의 에너지 수확에 적합하다고 알려져 있다. 2012년에는 마찰 대전된 두 물질이 상대운동 할 때의 정전기 유도 현상을 통해 전위차를 만들어내는 마찰전기 나노발전기가 소개되었다[5]. 이들은 소재의 선택이 비교적 자유롭고, 에너지 변환 메커니즘이 단순하기 때문에 유연 소자를 활용한 바람 유도 진동 기반의 풍력 구동 마찰전기 나노발전기(Wind-Driven Triboelectric Nanogenerator, WTENG) 제작에 활발히 도입되고 있다. 하지만, 여전히 진동을 시작하는 임계 풍속이 3-4 m/s 이상인 WTENG들이 주로 시연되고 있다[6].

본 연구진은, 정형화된 플러터 기반의 WTENG에서 벗어나, 원통형 셸 구조 기반의 WTENG를 시연했다[7]. 이 구조는 낮은 풍속에서 진동하는 셸의 움직임에 미치는 영향을 최소화하면서 전극과의 전기적 연결도 유지할 수 있도록, 마찰전기 나노발전기에 필연적으로 존재하는 대전면 간의 쿨롱 인력을 이용했다. 본 연구에서는, 앞선 연구와 에너지 수확 원리는 동일하지만, 전극 구조를 단순화하고 제작 공정을 간소화시킨 원통형 셸 및 금속 와이어 구조의 WTENG를 제안한다. 소자의 기본적인 에너지 수확 특성을 확인했으며, 금속 와이어 활용에 따른 출력의 풍향 의존성을 실험적으로 확인했다.

2. 제작 및 구조

2.1 제작 방법

제안하는 WTENG의 구조와 제작 공정을 Fig. 1에 나타냈다. Polytetrafluoroethylene (PTFE) 기둥 구조의 제작을 위해서 우선 25 mm 외경의 기둥 외부에 50 mm 높이의 Cu 양면테이프를 부착하여 전극을 형성했다. 전극 외부에는 500 μm 두께의 PTFE 필름을 부착했다. 그 후, 25 μm 두께의 Polyethylene Terephthalate (PET) 필름 위에 Al이 50 nm 코팅된 50 × 125.66 mm<sup>2</sup> 크기의 PET/Al 필름을 원형으로 굴곡시킨 뒤, 테이프로 끝단을 고정하여 지름 40 mm 크기의 원통형 셸을 제작했다. 그 후 원통형 셸을 기둥 외부에 씌워 마찰물질 쌍인 Al과 PTFE 층이 서로 접촉할 수 있도록 했다. 추가로, 셸의 운동에 최소한의 영향을

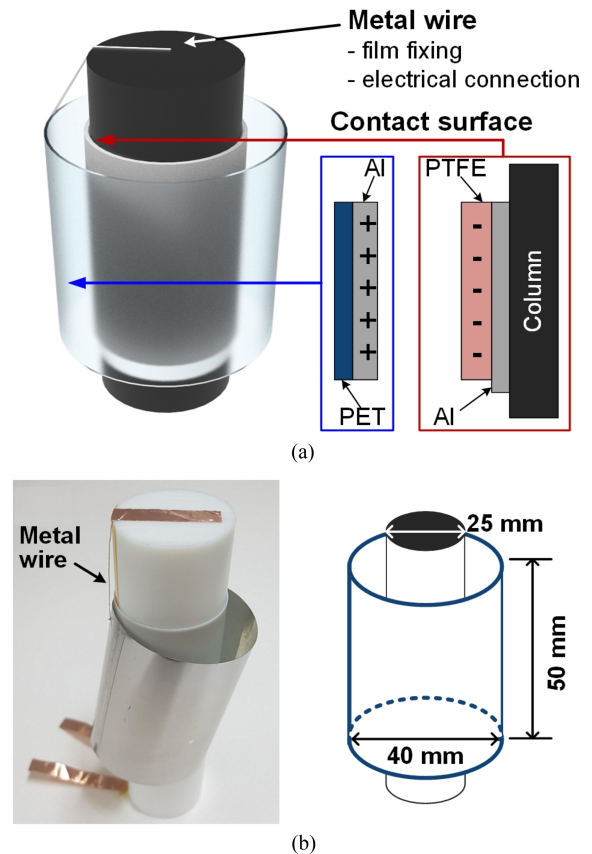


Fig. 1 (a), (b) Schematic diagram of the omnidirectional wind-driven triboelectric nanogenerator. The proposed WTENG is composed of flexible polymer film and a rigid column

미치면서 외부 전극과 전기적인 연결을 유지시킬 수 있도록 20 mm 길이의 금속 와이어를 활용했다. Cu 테이프를 이용하여 셸의 Al 표면에 한쪽 끝을 부착한 금속 와이어의 반대쪽 끝을 기둥의 상단에 고정했으며, 이를 다시 기둥 내부의 절연된 Al 테이프와 연결했다. PTFE 표면에 나노 구조물을 형성하는 것은 높은 출력을 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 널리 사용되고 있는 Reactive Ion Etching (RIE)을 활용한 표면 개질 방법은 낮은 생산성을 가질 뿐만 아니라 제작 비용을 높이게 된다.

본 연구에서는 높은 생산성을 갖는 소자 제작을 위해서 추가적인 표면 처리 공정을 진행하지 않았다. 따라서, Fig. 1(b)에서도 확인할 수 있듯이 기존 셸 구조 기반의 WTENG 논문과는 다르게 표면 전하 밀도가 부족하기 때문에 쿨롱 인력만으로는 셸 구조가 기둥에 고정되지 못한다. 하지만 셸과 외부 전극 간의 전기적인 연결을 위해서 사용된 금속 와이어가, 동시에 셸이 상하로 과도하게 이동하지 못하게 구속하는 역할도 수행한다. 따라서 셸은 여전히 공중에 떠있는 구조를 유지할 수 있다.

2.2 에너지 수확 원리

본 WTENG의 에너지 수확 원리는 Fig. 2와 같다. 기둥의 바깥면을 이루는 PTFE와 셸의 내부면을 이루는 Al은 마찰대전열에서 서로 멀리 떨어져 있는 물질로서, 일반적인 마찰전기 나노

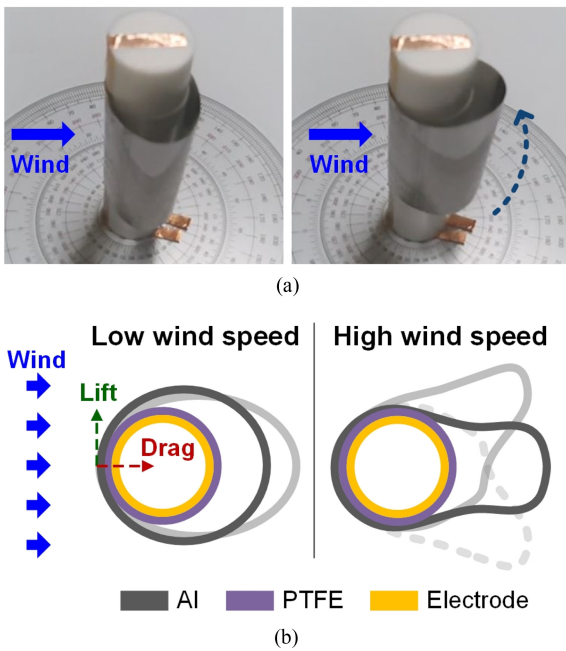


Fig. 2 (a) Alignment principle of the cylindrical shell. (b) Working principle of the WTENG. When the wind blows around the column, a vortex is created that causes the shell to vibrate

발전기의 마찰물질 쌍으로서 자주 사용된다. 두 물질은 서로 접촉했을 때, 각각 음과 양으로 대전되며 두 물질 간의 상대 운동이 발생하면 정전기 유도 현상에 의하여 전하의 이동이 발생할 수 있다. 바람이 WTENG에 입력되면, 셸 구조는 항력에 의하여 바람의 방향을 따라서 회전하고, 후방으로 밀려난다. 셸 구조가 기둥에서 더 이상 밀려날 수 없게 되면 일부 면이 기둥과의 접촉면에 고정된 상태로 진동한다. 높이가  $L$ 이고, 특성 길이 (Characteristic Length)가  $D$ 인 구조물에 밀도가  $\rho$ 인 유체가  $v_{wind}$  속도로 입력될 때, 다음 수식에 나타난 것과 같이 바람 방향에 수평한 항력과 수직한 양력이 발생한다[8].

$$F_{Lift} = \frac{1}{2} \hat{C}_L \rho D L v_{wind}^2 \sin(\omega_s t) \tag{1}$$

$$F_{Drag} = \frac{1}{2} \bar{C}_D \rho D L v_{wind}^2 + \frac{1}{2} \hat{C}_D \rho D L v_{wind}^2 \sin(2\omega_s t) \tag{2}$$

이때,  $\hat{C}_L$ 은  $\bar{C}_D$ , 그리고  $\hat{C}_D$ 는 각각 양력 계수와 평균(Mean) 그리고 진동(Oscillating) 항력 계수이다. 이때  $\omega_s$ 는 무차원수인 스트로우홀 수로 계산될 수 있는 각 와류 흘림(Vortex Shedding) 주파수이다. 본 연구진의 이전 논문에서 확인됐듯이, 해당 구조는 풍속의 크기에 따라서 진동 양상을 지배하는 힘의 종류가 변화하게 된다. 약 2 또는 3 m/s 이하의 저풍속 영역에서는 셸에 가해지는 수직 방향으로의 변형력이 크지 않다. 따라서 셸은 주로 진동 항력에 의하여 바람의 방향과 평행하게 진동한다. 해당 구조는 진동하는 동안 Fig. 2(b)의 좌측 모식도와 같이 주기적으로 후방으로 길어졌다가 다시 짧아지는 형태를 갖는다.

반면 이보다 더 높은 풍속이 입력되면, 셸 구조에 가해지는

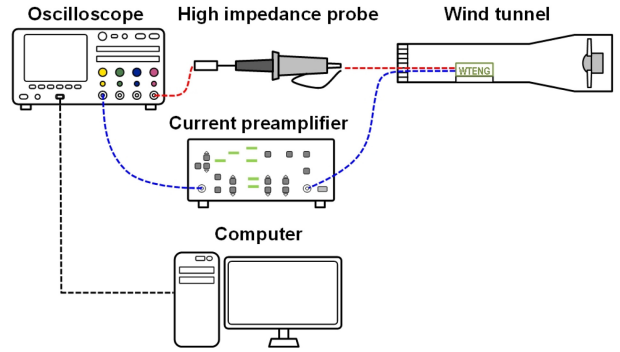


Fig. 3 Experiment setups for measuring voltage and current

수직 방향 양력이 강해진다. 따라서 셸은 고풍속 범위에서 더 이상 본래의 원형 구조를 유지하지 못한다. 또한 바람의 수직 방향으로 진동하는 중에 최대 이동 지점에서는 비대칭적으로, 중앙 부분에서는 대칭적으로 좌굴된 구조를 가지며 진동한다. 이러한 셸의 움직임은 마찰물질쌍 간의 상대 거리의 주기적인 변화를 발생시키고, 마찰전기 나노발전기 원리에 따라서[9] 전위차를 생성한다. 한편, 셸이 지표면에 대해서 상하로 움직이게 되면 두 물질 간의 접촉 면적 감소에 따른 출력 저하를 예상할 수 있으나 금속 와이어의 강성 덕분에 이러한 영향이 억제될 수 있다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 측정 장치 구성

Fig. 3에 나타난 것과 같이, 나노발전기의 출력 전압, 임피던스 매칭 시험 시의 부하 저항의 전압 강하, 그리고 정류된 에너지 저장 실험시의 커패시터 양단의 전압차를 측정하기 위해서 Oscilloscope (DSO5014A, Keysight)에 연결된 1,000 : 1 High-Voltage Passive Probe (P6015A, Tektronix)를 이용했다. 출력 폐회로 전류는 동일한 Oscilloscope에 Low Noise Current Preamplifier (SR570, Stanford Research)를 연결하여 측정했다. 모든 데이터는 Oscilloscope와 연결된 PC를 통해서 2초간 수집된 이후에 실효(RMS) 출력으로 변환되었다. 나노발전기로 입력되는 바람의 속도는 직접 구성한 풍동을 이용하여 조절했다.

#### 3.2 측정 결과 및 논의

Fig. 4(a)는 입력되는 바람의 풍속이 변화할 때, 디바이스에서 측정된 개회로 전압을 나타낸다. 피크-투-피크 출력 전압은 풍속이 6 m/s로 증가함에 따라서 최대 150 V까지 증가했다. 특히, 1 m/s의 매우 낮은 풍속에서도 3.7 V의 전압이 측정되었기 때문에, 하베스터가 동작을 시작하기 위한 임계 유속은 해당 풍속보다 낮을 것으로 추측된다. 이는 기존 연구에서도 확인되었듯이, 원통형 셸의 강성이 매우 낮을 뿐만 아니라 해당 구조가 기둥에 매달려 있기 때문에 작은 힘에도 셸이 쉽게 이동하거나 변형될 수 있기 때문으로 생각된다. 약 3 m/s 풍속을 기준으로, 더 낮은

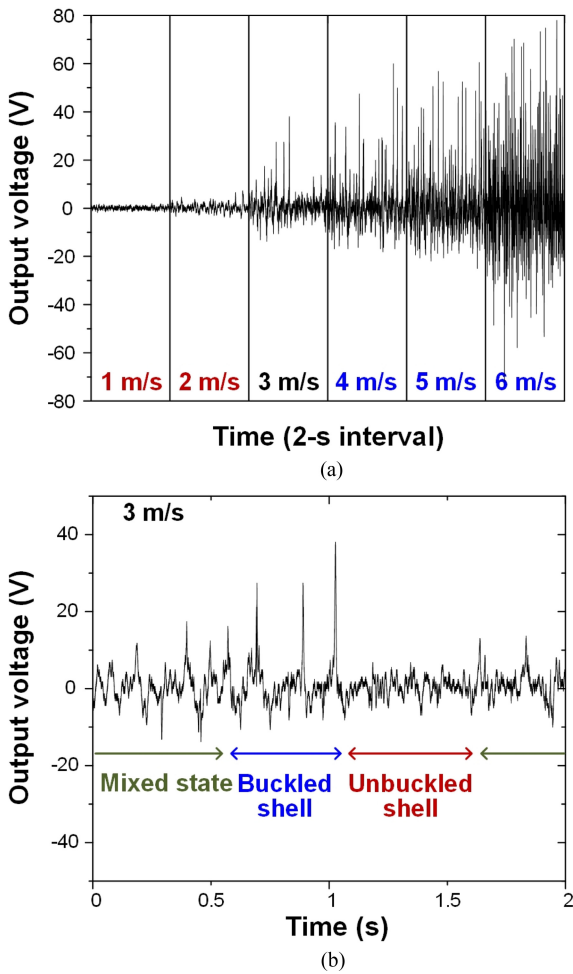


Fig. 4 (a) Open-circuit voltage of the harvester when the wind speed changes. (b) Enlarged graph of the data at 3 m/s wind speed

저풍속 구간에서는 셸의 변형이 미소했으며, 피크 출력 전압도 10 V 이하로 낮았다. 고풍속 구간에서는 확연한 셸의 플러터링이 관찰되었으며, 출력 전압도 40 V 이상으로 급격하게 증가했다. 3 m/s에서 측정된 전압은 이러한 두 구간에서의 경향이 혼재되어 나타나는 것을 확인할 수 있다(Fig. 4(b)). 이러한 전이 구간은 기존 디바이스에서는 4 m/s로서, 본 디바이스에서 더 낮았다. 셸의 좌굴이 발생하는 풍속은 필름의 강성, 즉 PET/Al 필름의 두께에 의하여 변화한다. 다만, 두 대전면들의 표면 전하 밀도가 기존 디바이스보다 낮기 때문에 셸의 초기 상태는 항상 제작 시의 원형 형태를 유지하며 기동과는 거의 접촉하지 않게 된다. 따라서 본 디바이스가 동일한 두께의 필름을 활용한 기존 디바이스에 비하여 출력 전압은 낮지만 바람이 입력되는 면적이 근소하게 증가했기 때문에, 전이 풍속 구간의 차이가 발생한 것으로 추측된다.

공탄성 플러터링 방식 WTENG들은 디바이스가 일정한 풍속 하에서 동작하더라도 피크 전압 및 피크 전류가 불안정하게 변화한다. 이는 와류 자체가 불안정할 뿐만 아니라 필름 구조의 진동이 공기의 유동에 역으로 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

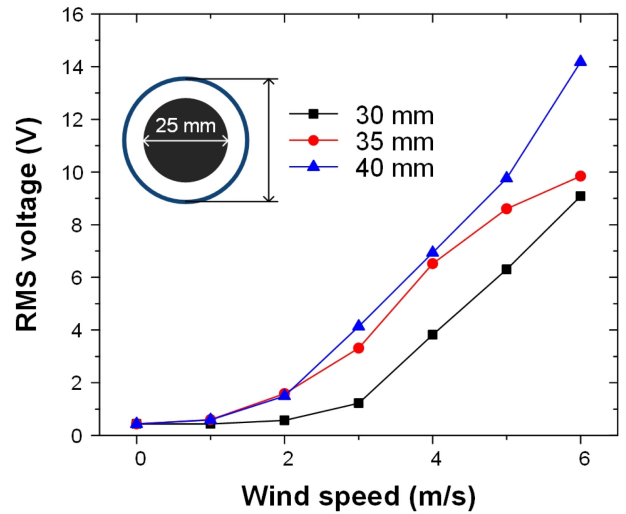


Fig. 5 Influence of wind speed on RMS voltage of the WTENG with three different film diameters

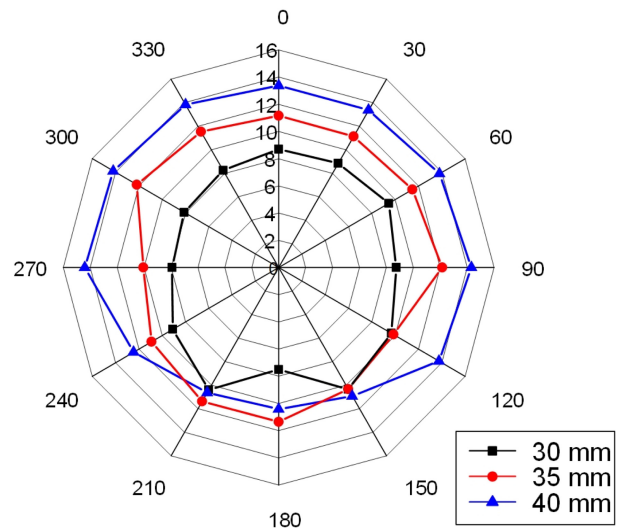


Fig. 6 RMS voltage of the WTENG for different wind directions

하지만 긴 시간 동안 평균적인 입력 에너지는 일정하기 때문에 본 연구에서는 실효 전압을 기준으로 디바이스의 출력 전압을 평가했다. Fig. 5는 원통형 셸의 지름에 따른 출력 변화를 보여 준다. 모든 크기의 셸에서 풍속이 증가함에 따라서 전압이 증가했으며, 특정 구간에서 전이 구간이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 초기 지름이 작아질수록 바람이 입력되는 면적이 감소한다. 뿐만 아니라, 셸과 기동 사이의 변형 가능한 공간 역시도 감소하기 때문에 대전된 PTEF와 Al 사이의 상대 운동의 크기 역시 저해된다. 따라서 지름이 30에서 40 mm로 증가함에 따라서 출력 전압 수준이 증가했을 것으로 추측된다.

제작된 나노발전기에는 금속 와이어가 특정한 방향으로 정렬되어 부착되어 있다. 따라서 원통형 셸이 자유롭게 회전할 수 없는 구조를 가진다. 이러한 구조적 비대칭성 때문에 에너지 수확량이 방향 의존적일 것임을 예상할 수 있다. 이를 확인하기 위하여

디바이스를 6 m/s 풍속 조건 하에서 30° 간격으로 회전시키면서 실효 출력 전압을 측정했으며, 이를 Fig. 6에 도시했다. 셀의 지름과 무관하게 금속 와이어가 바람의 방향과 마주보는 0° 각도에서 최대의 전압이 발생했다. 바람과 금속 와이어 정렬 각도의 차이가 90 이상으로 증가하면 출력 전압의 크기가 점차 감소하다가 180°에서 최소의 전압이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2(a)에서 확인할 수 있듯이, 금속 와이어와 마주보는 방향으로 바람이 불어오는 경우에는 금속 와이어가 셀과 기둥이 접촉하고 있는 접촉면 상단에 위치하기 때문에 금속 와이어 자체의 진동이 억제된다. 이 각도가 증가하게 되면 금속 와이어는 비교적 자유롭게 이동할 수 있게 된다. 금속 와이어의 단면적은 셀에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 바람에 의한 큰 공기역학적 힘(Aerodynamic Force)을 기대하기 힘든 반면에, 높은 수준의 굽힘 강성을 가지고 있기 때문에[10] 셀의 움직임을 방해할 수 있다. 이러한 효과 때문에 출력 전압의 비대칭성이 발생한 것으로 생각된다. 그럼에도 불구하고, 40 mm 지름의 셀을 활용한 디바이스의 전체 방향에 대한 평균 RMS 전압은 13.0 V로 여전히 높은 수준이며, 최대 및 최소 RMS 전압과의 차이는 각각 10.0 그리고 19.6%에 불과했다. 따라서 제작된 나노발전기는 저비용으로 제작가능한 전방향 바람 에너지 하베스터로서 충분히 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

이 나노발전기를 효율적으로 소형 전자 소자의 전력 공급원으로 활용하기 위해서는 임피던스 매칭을 수행할 필요가 있다. 따라서 6 m/s 풍속 하에서 디바이스와 직결한 부하 저항을 15 MΩ까지 1 MΩ씩 증가시켜가면서 부하 저항 양단에서의 RMS 전압차를 3 회씩 측정했다. Fig. 7(a)에 나타난 것과 같이 부하 저항이 증가함에 따라서 전압이 점차 포화되어가며 증가하는 것을 확인할 수 있다.  $P = V^2/R$  식을 이용해 계산한 RMS 전력은 약 10 MΩ의 최적 부하 저항  $R_{TENG}$ 에서 약 15 μW의 최댓값을 가졌다. 다만, 반복 실험 시에 동일한 부하 저항에서도 오차가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있는데 이는 금속 와이어의 진동 및 이에 의한 셀의 진동 특성 변화가 소자의 용량 리액턴스에 영향을 미쳤기 때문으로 생각된다. 추가로 디바이스에서 발생된 에너지를 정류 회로를 거쳐, 10 그리고 100 μF의 용량을 갖는 커패시터에 저장했다.

Fig. 7(b)에 6 m/s 풍속 조건에서 시간에 따른 두 커패시터 양단의 전압차를 도시했다. 해당 조건에서 정류 후의 실효 출력 전압  $V_{rec}$ 은 13.4 V였다. 이 데이터들을 기반으로 에너지 하베스터에 활용되는 LTC3588-1 (Analog Devices, Inc.) 전력관리칩에 용량  $C = 100 \mu F$ 인 커패시터가 연결된 회로를 가정하여 [11], 본 하베스터가 센싱 시스템의 구동 에너지원으로 사용될 수 있는지 계산했다. 이 전력관리칩이 센서로 출력을 전달하기 시작하는 커패시터의 전압  $V_{rising} = 4.04 V$ 에 처음 도달하기 위해서는 약 358.8초의 충전 시간이 필요하다. 이후, 센서에서 저장된 에너지를 사용하여 커패시터 전압이  $V_{falling} = 2.87 V$ 에 도달되면 전압 출력이 중단된다. 이 동안 전달되는 에너지의 양은 0.4 mJ로서 휴지 모드를 갖는 무선 센서들을 구동하기에 충분한 수준이다[12]. 이후, 다음 수식을 활용하여 약 117.8초마다

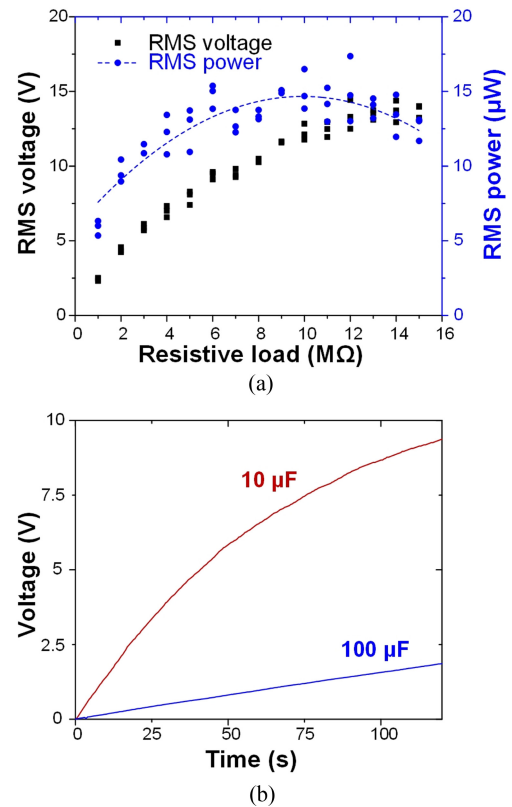


Fig. 7 (a) Output voltage and power of the fabricated WTENG with various resistive loads. (b) The change in voltage across the capacitors with time when the output is passed through a full-bridge rectifier circuit and stored in two capacitors

센서에 동일한 에너지를 전달할 수 있음을 계산할 수 있다.

$$V_{rising} = (V_{rec} - V_{falling}) \left( 1 - e^{-\frac{t}{R_{TENG}C}} \right) + V_{falling} \quad (3)$$

따라서 본 WTENG를 통해서 수확된 전력이 소형 전자 시스템의 구동원으로도 충분히 활용될 수 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 간단한 제작 공정을 통해서 수직 기둥과 원통형 셀로 구성된 풍력 구동 마찰전기 나노발전기를 제작했다. 해당 구조에서 금속 와이어를 이용하여 셀의 높이가 유지될 수 있음과 동시에, 셀의 내부 전극을 외부와 전기적으로 연결할 수 있었음을 확인했다. 이 나노발전기를 구성하는 기둥 외부의 PTFE와 셀의 Al 층은 서로 접촉하여 마찰대전될 수 있었으며, 마찰전기 에너지 변환 메커니즘을 통해서 1에서 6 m/s 풍속 범위의 바람 에너지 수확이 가능했다. 비록 사용된 금속 와이어때문에 바람 방향에 따른 출력의 비대칭 특성을 갖기는 했으나, 모든 방향에서 에너지 수확이 가능한 구조임을 확인했다. 실험적으로 확인된 출력 전력의 크기는 6 m/s 풍속 하에서 약 15 μW였다.

## ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A2B5B03002850).

## REFERENCES

1. Truitt, A., Mahmoodi, S. N., (2013), A review on active wind energy harvesting designs, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14(9), 1667-1675.
2. Zeng, Z., Ziegler, A. D., Searchinger, T., Yang, L., Chen, A., Ju, K., Piao, S., Li, L. Z., Ciais, P., Chen, D., (2019), A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production, *Nature Climate Change*, 9(12), 979-985.
3. Archer, C. L., Jacobson, M. Z., (2005), Evaluation of global wind power, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D12), 1-20.
4. Wen, Q., He, X., Lu, Z., Streiter, R., Otto, T., (2021), A comprehensive review of miniaturized wind energy harvesters, *Nano Materials Science*, 3(2), 170-185.
5. Fan, F.-R., Tian, Z.-Q., Wang, Z. L., (2012), Flexible triboelectric generator, *Nano Energy*, 1(2), 328-334.
6. Ren, Z., Wang, Z., Liu, Z., Wang, L., Guo, H., Li, L., Li, S., Chen, X., Tang, W., Wang, Z. L., (2020), Energy harvesting from breeze wind (0.7-6 m s<sup>-1</sup>) using ultra-stretchable triboelectric nanogenerator, *Advanced Energy Materials*, 10(36), 2001770.
7. 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.
8. Wang, E., Xiao, Q., Incecik, A., (2017), Three-dimensional numerical simulation of two-degree-of-freedom VIV of a circular cylinder with varying natural frequency ratios at Re = 500, *Journal of Fluids and Structures*, 73, 162-182.
9. Niu, S., Wang, Z. L., (2015), Theoretical systems of triboelectric nanogenerators, *Nano Energy*, 14, 161-192.
10. Zorowski, C., Chen, C., (1965), Cantilever bending behavior of continuous filament cords 1, *Textile Research Journal*, 35(6), 529-538.
11. Chen, F., Wu, Y., Ding, Z., Xia, X., Li, S., Zheng, H., Diao, C., Yue, G., Zi, Y., (2019), A novel triboelectric nanogenerator based on electrospun polyvinylidene fluoride nanofibers for effective acoustic energy harvesting and self-powered multifunctional sensing, *Nano Energy*, 56, 241-251.
12. Wang, Z. L., Wu, W., (2012), Nanotechnology-enabled energy harvesting for self-powered micro-/nanosystems, *Angewandte Chemie International Edition*, 51(47), 11700-11721.



### Hee-Jin Ko

Ph.D. candidate in the School of Mechanical Engineering, Yonsei University. His research interests are energy harvesters and self-powered sensors using triboelectric energy conversion mechanism.  
E-mail: blood425@yonsei.ac.kr



### Dae-Sung Kwon

Senior Researcher at Hyundai Motors. He received the Ph.D. degree in the School of Mechanical Engineering, Yonsei University. His research interests are energy harvesters and fabrication of nano/microsystems.  
E-mail: ds0309@yonsei.ac.kr



### Jongbaeg Kim

Professor in the School of Mechanical Engineering, Yonsei University. His research interests are modeling, design, fabrication of microsystems, and integrated nanostructures on MEMS.  
E-mail: kimjb@yonsei.ac.kr