

Double-Clamped Flutter-Type Triboelectric Generators Under Various Environmental Conditions

Jimin Kang¹, Jihun Choi^{1,2}, Yebin Lee^{1,3}, Chang Kyu Jeong^{1,2,3*} 

¹ Major of Electronic Materials Engineering, Division of Advanced Materials Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

² Division of Advanced Materials Engineering, Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School (BK21 FOUR) & Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

³ Department of JBNU-KIST Industry-Academia Convergence Research, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

양단 고정 플러터형 마찰전기 발전기의 다양한 환경 조건에 따른 성능 분석

강지민¹, 최지훈^{1,2}, 이예빈^{1,3}, 정창규^{1,2,3*} 

¹ 전북대학교 신소재공학부 전자재료공학전공

² 전북대학교 에너지저장변환공학과 (BK21 FOUR) 및 수소연료전지연구소

³ 전북대학교 JBNU-KIST 산학연융합학과

✉ Corresponding author(s): ckyu@jbnu.ac.kr (C. K. Jeong)

Cite as J. Electr. Electron. Mater., 39(4), 432–441 (2026), DOI: <https://doi.org/10.4313/JEEM.2026.39.4.14>

Received March 7, 2026; Accepted March 29, 2026

ABSTRACT: Renewable energy harvesting technologies, which convert ambient resources such as wind into electrical energy, have attracted significant attention as sustainable power sources for self-powered systems. However, the long-term applicability of wind energy harvesters in remote or extreme environments has not yet been fully discussed, particularly in terms of structural robustness and environmental adaptability. In this study, we designed a double-clamped flutter-type triboelectric generator (DFTEG) for efficient wind energy harvesting and evaluated its output performance under various simulated outdoor conditions. The DFTEG features a modular acrylic frame with a magnet-based assembly for easy maintenance and film replacement, utilizing PTFE films and aluminum electrodes to maximize the charge density difference according to the triboelectric series. Structural optimization revealed that a single-film configuration with a length of 110 mm produced the most stable flutter vibration and a large effective contact area, achieving a maximum open-circuit voltage of 42.28 V and a short-circuit current of 2.89 μ A. Furthermore, performance evaluations under various environmental variables, including relative humidity, temperature, and sand particles interference, confirmed consistent electrical output across diverse environmental conditions. These results demonstrate the potential of the proposed DFTEG as an environment-adaptive independent power source capable of stable operation under complex environmental factors.

KEYWORDS: Triboelectric generator, Wind energy harvesting, Flutter vibration, Modular, Environmental stability

1 서론

에너지 하베스팅(energy harvesting)은 주변의 빛, 열, 기계적 진동, 바람, 전자기파 등 일상에서 버려지는 에너지를 수집하여 전기 에너지로 변환하는 기술이며, 별도의 연료나 소모품 없이 재생 에너지를 활용할 수 있다 [1,2]. 이 기술은 주변 환경에서 발생하는 에너지를 통해 전력을 얻을 수 있기 때문에 추가적인 외부 전력 장치 없이도 스스로 시스템을 작동할 수 있다는 장점이 있다. 특히 사람의 접근이 어렵거나 유지보수가 까다로운 지역에서는 이러한 에너지 하베스팅 기반의 자기구동형 시스템이 효과적인 전원 구조로 여겨진다 [3].

이러한 측면에서 태양광과 풍력 같은 재생 가능한 에너지원은 주변 환경에서 쉽게 확보할 수 있다는 점에서 널리 활용되고 있다. 태양광 기반 광 에너지 하베스팅은 반도체 광전소자를 이용하여 태양광이나 실내 조명과 같은 광원을 전기 에너지로 변환하는 기술이며, 일사량이 충분한 야외 환경에서는 시스템을 작동하기에 충분한 전력을 제공할 수 있다 [4]. 그러나 태양광 에너지는 본질적으로 태양의 가시성과 일사 강도에 대한 의존도가 높으므로 시간대, 계절, 기상 조건에 따른 출력 변동이 크고, 야간이나 실내와 같이 빛이 거의 도달하지 않는 환경에서는 활용이 어렵다는 한계가 존재한다 [5]. 반면, 바람을 이용하는 풍력 에너지 하베스팅은 기상과 지형 조건에 따라 바람의 세기와 방향이 달라지지만, 해안가나 고지대와 같은 환경에서도 비교적 지속적으로 존재하는 에너지원으로 간주된다. 특히 태양광과 달리 풍력은 밤에도 에너지를 얻을 수 있어 상대적으로 시간의 제약이 적다는 장점이 있다 [6]. 이러한 풍력을 전기에너지로 변환하는 방식으로 회전형(rotary) 풍력 터빈을 사용하는 방식이 있다 [7]. 풍력 터빈은 회전하는 블레이드와 전자기 유도 발전기를 통해 바람의 운동 에너지를 전력으로 변환하여 일정 풍속 이상에서 비교적 높은 출력과 안정된 전력 공급을 제공할 수 있다는 장점이 있다 [8]. 그러나 회전형 풍력 구조는 회전축, 베어링, 기어 등 여러 부품으로 구성되어 장기간 운용 시 마모와 윤활, 부품 교체 등에 대한 정기적인 유지보수가 필수적이며, 설치 위치가 산악 지역이나 해안가처럼 접근성이 낮은 곳이라면 이러한 유지보수 작업 자체가 큰 부담이 된다 [9]. 또한, 충분한 출력을 얻기 위해 일정 크기 이상의 블레이드와 설치 공간이 요구되고 소음 및 진동 문제가 발생할 수 있어, 제한된 공간이나 난류가 심한 환경에서는 적용에 한계가 있다 [10]. 이와 같은 한계를 극복하기 위해 회전 기구를 사용하지 않고 바람에 의한 구조물의 진동을 직접 이용하는 풍력 에너지 하베스터와 이를 구현하기

위한 마찰전기 기반 에너지 하베스팅 기술이 활발히 연구되고 있다.

마찰전기 효과(triboelectric effect)란 서로 다른 두 물질이 접촉 후 분리될 때, 물질 간 전하(전자, 이온)가 이동하여 한쪽 표면에는 양전하를 다른 쪽 표면에는 음전하를 띠게 되는 접촉 대전(contact electrification) 현상을 의미한다 [11–14]. 이 과정에서 형성된 전위차에 의해 두 물질 사이에 정전기장이 형성된다 [15–18]. 이때 두 물질에 전극을 연결하고 외부 회로와 연결하면 형성된 전위차에 의해 전류가 흐르게 된다 [19,20]. 마찰전기 나노발전기(triboelectric nanogenerator, TENG)는 이러한 마찰전기 현상과 정전기적 유도 현상을 이용하여 기계적 에너지를 전기에너지로 변환하는 소자로, 2012년 처음 제안된 이후 다양한 연구가 지속되어 왔다 [21–26]. 그중 풍력 TENG는 낮은 주파수에서도 작동 가능하고 구조와 재료 선택의 자유도가 크다는 TENG의 특징에 의하여 회전형, 플러터형(flutter)과 같은 다양한 형태가 제안되었다 [27]. 회전형 풍력 TENG는 풍력 터빈과 유사하게 바람 에너지를 회전 운동으로 변환한 뒤 로터와 스테이터 사이의 접촉-슬라이딩 동작을 통해 전력을 발생시키는 구조가 주로 사용된다 [28]. 이와 같은 구조는 마찰 면적을 크게 확보할 수 있어 동일 부피 대비 높은 출력과 비교적 안정적인 전력 공급이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 마찰층 사이의 반복적인 접촉-슬라이딩으로 인한 마찰열과 마모가 누적되면서 전기적 출력 안정성과 기계적 내구성이 저하되고 회전축, 베어링 등 기계 부품에 의한 마찰 저항으로 인해 시작 풍속이 높아지며 장기간 운용 시 유지보수 비용이 증가하는 단점이 존재한다 [29]. 반면, 바람에 의해 얇고 유연한 구조가 스스로 진동하면서 생기는 불안정한 진동 현상인 플러터 방식을 이용하는 풍력 TENG는 별도의 회전 기구 없이도 바람의 운동 에너지를 직접적인 접촉-분리 동작으로 변환한다 [30]. 이러한 구조는 소형·경량화에 유리하며 비교적 낮은 시작 풍속으로도 에너지 획득이 가능하다는 장점이 있다. 또한, 회전축과 베어링 등의 기계 부품이 필요하지 않아 구조가 단순하고 마찰면 배치를 적절히 설계할 경우 회전형 구조에 비해 마찰에 의한 기계적 손상을 줄일 수 있어 유지보수 측면에서 유리하다. 그러나 기존에 보고된 플러터 기반 TENG의 상당수는 한쪽 끝만 고정된 필름 구조를 사용하며, 다양한 환경에서의 구조적 취약성에 대하여 충분한 논의가 이루어지지 않았다.

이러한 배경에서 본 연구에서는 바람을 에너지원으로 사용하면서 다양한 환경에서 작동할 수 있는 플러터형 마찰전기 발전기 구조를 제안한다. 이를 위해 플러터 현상을 이용하는 양단 고정 필름 구조의 마찰전기 발전기(double-clamped flutter-type triboelectric generator, DFTEG)를 설계하고 풍력 에

너지 하베스팅에 적합한 마찰층 및 전극 구조를 선정 한 후, 필름 길이와 형상 변화에 따른 출력 특성을 분석하여 본 구조에서의 최적 조건을 탐색하였다. 또한, 주변 환경 변화에 민감한 풍력 에너지 하베스터의 특성을 고려하여, 다양한 풍속과 환경 조건에서의 출력 변화를 측정함으로써 제안된 DFTEG 구조의 환경 내성을 분석하였다. 이러한 결과를 바탕으로 DFTEG의 필름 형태와 환경 조건이 출력에 미치는 영향을 확인하고, 실제 야외 환경에서 사용할 수 있는 풍력 마찰전기 에너지 하베스터로서의 발전 가능성을 제시한다.

2 실험 방법

그림 1은 DFTEG의 구조와 소자 내 필름의 발전 원리에 대한 모식도이다. 그림 1(a)에 도시한 바와 같이, 소자는 외부 공기 흐름을 유도하고 내부의 필름과 전극을 외부 충격 및 오염으로부터 보호하기 위하여 두께 5 mm의 아크릴판을 가공하여 상·하부 평판과 이를 연결하는 십자 형상의 측면 지지대로 이루어진 프레임 구조를 제작하였다. 프레임은 충분한 기계적 강도와 내구성을 가지면서도 가공이 쉽다는 점에서 아크릴을 재료로 선택하였으며 필름과 전극의 유지 보수가 편리하도록 조립식 구조로 설계하였다. 프레임 내부 상·하부 평판의 안쪽 면에는 알루미늄(aluminum, Al) 테이프를 부착하여 전극이자 마찰 표면으로 사용하였다. 이는 서로 다른 재료가 접촉·분리될 때 어느 쪽이 전하를 얻거나 잃기 쉬운지를 나타내는 마찰대전열(triboelectric series)에 근거하여

선정하였다. 마찰대전열 상에서 알루미늄은 상대적으로 양전하를 띠기 쉬운 위치에 분포해 있어 다양한 마찰 재료와 조합하였을 때 안정적으로 전하를 생성할 수 있다. 마찰대전층으로는 두께 50 μm 의 상대적으로 음전하를 띠기 쉬운 PTFE (polytetrafluoroethylene)를 필름으로 사용하였다. 이는 마찰대전열 차이를 극대화하여 접촉·분리 과정에서 생성되는 전하량을 증가시켜 마찰전기 발생 효율을 높이기 위함이다. 또한, PTFE는 우수한 전기 절연성을 가져 생성된 전하의 손실을 막을 수 있고, 매우 낮은 마찰계수와 유연한 박막 형태로 인해 플러터 운동 시 손상이 적어 필름으로 사용하기에 적합하다. 이러한 PTFE 필름은 네오디뮴 자석을 사용하여 측면 지지대에 고정해 양단 고정 플러터형 구조를 구현하였다. 자석을 이용한 고정 방식은 필름에 일정한 장력을 부여해 플러터 진동 중에도 필름의 위치를 일정하게 유지하며, 필름 손상 시 자석을 분리하는 것만으로 간편하게 교체할 수 있다는 장점이 있다.

제작된 DFTEG의 전기적 특성은 외부 도선을 연결하여 전위계(electrometer, KEITHLEY 6514, USA)를 이용하여 측정하였다. 바람은 공기 압축기를 사용하여 프레임 정면의 유입구로 인가하였으며, 유입 위치에서의 풍속은 디지털 풍속계를 이용해 확인하였다. 본 연구에서는 외부 조건에 따른 개방 전압(open-circuit voltage, V_{oc})과 단락 전류(short-circuit current, I_{sc})를 측정하여 다양한 환경에서 DFTEG의 에너지 하베스팅 성능을 분석하였다.

그림 1(b)는 DFTEG의 작동 원리를 단계별로 나타낸 것이다. 바람을 가해주기 전 초기 상태 [그림 1(b)의 (i)]에서 PTFE 필름과 알루미늄 전극은 모두 전기적 중성 상태에 있다. 필

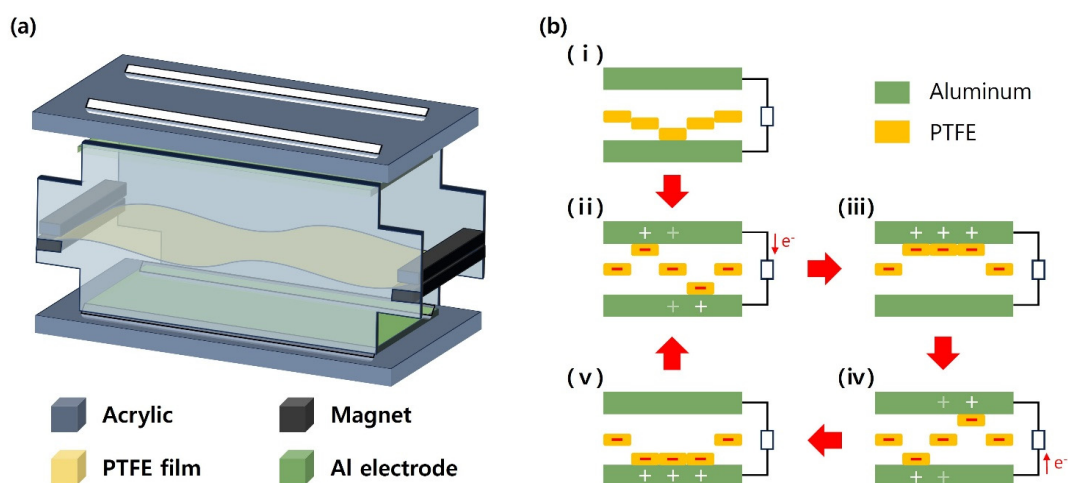


Fig. 1. (a) Schematic diagram of the DFTEG and (b) sketches that illustrate the working mechanism of DFTEG

름이 바람에 의해 위로 휘어지면서 상부 알루미늄 전극과 접촉하는 순간 [그림 1(b)의 (ii)], PTFE 필름과 알루미늄 전극 간의 마찰대전 효과에 의해 PTFE 필름은 음전하로, 알루미늄 전극은 양전하로 대전된다. 이때 상·하부 전극 간의 전위차에 의해 외부 회로를 통해 전자가 흐른다. PTFE 필름이 상부 전극에 넓게 접촉하는 순간 [그림 1(b)의 (iii)]에는 PTFE 필름의 음전하에 의해 상부 알루미늄 전극에 양전하가 유도된다. 다음 순간 필름이 아래로 휘어지면서 하부 알루미늄 전극과 접촉한다 [그림 1(b)의 (iv)]. 그림 1(b)(ii)과 같은 원리로 PTFE 필름과 알루미늄 전극의 마찰대전 효과에 의해 PTFE 필름은 음전하를 하부 전극은 양전하를 나타내며 다시 상·하부 전극 간의 전위차가 형성되어 외부 회로를 통해 전자가 흐른다. PTFE 필름이 하부 전극에서 다시 분리되어 상부 전극으로 향하면서 [그림 1(b)의 (v)] 이러한 작동 원리가 PTFE 필름의 플러터 운동과 함께 반복되며 DFTEG는 전기 에너지를 생성한다. 실제 작동 환경에서는,

양단에 고정된 필름 구간은 항상 중간 위치를 유지하여 전극과 접촉하지 않으므로 마찰대전에는 직접 참여하지 않지만, 전체 필름 구조의 기계적 안정성과 재현성 있는 진동을 보장하는 역할을 한다. 결과적으로 플러터 운동으로 인한 PTFE 필름과 상·하부 전극의 주기적인 접촉·분리에 따라 DFTEG에서 바람 에너지가 전기 에너지로 변환된다.

3 결과 및 고찰

3.1 필름 구조에 따른 출력 특성

그림 2는 DFTEG의 PTFE 필름의 길이를 120 mm, 115 mm, 110 mm로 변화시키면서 일정한 풍속 조건에서 출력을 비교하였다. 본 구조에서 필름 길이가 120 mm를 초과할 경우, 바람을 가했을 때 충분한 플러터 진동이 형성되지 않아 전극

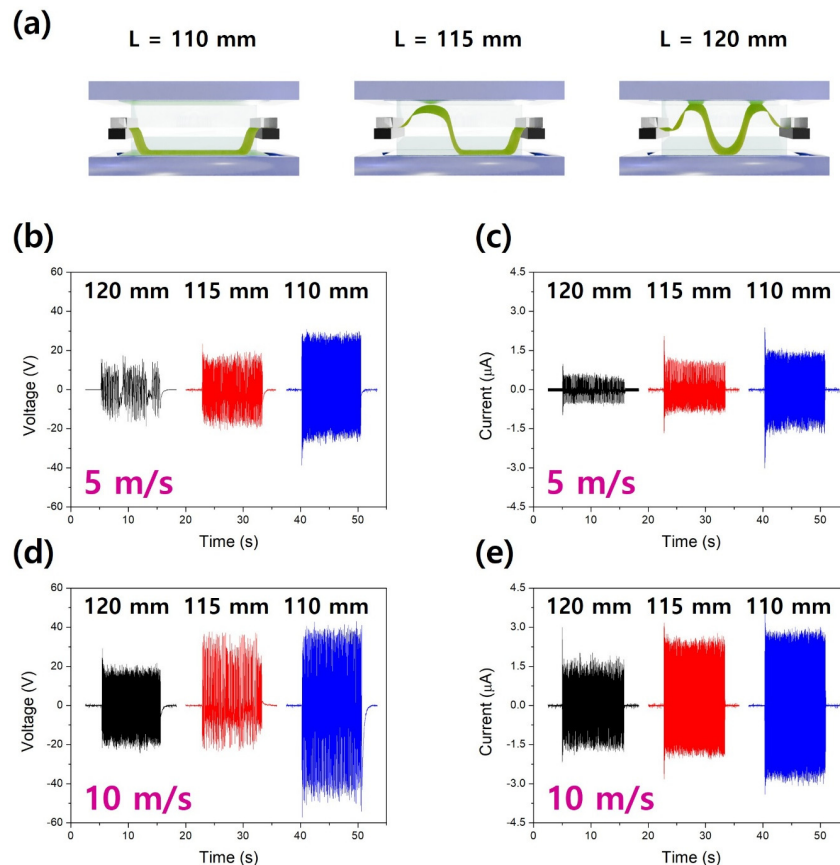


Fig. 2. (a) Photographs of the DFTEG with different PTFE film lengths, (b, c) comparison of V_{oc} and I_{sc} of the DFTEG under different PTFE film lengths at the wind speed of 5 m/s, and (d, e) 10 m/s, respectively

으로부터 원활히 분리가 되지 않고, 필름 길이 110 mm 미만은 전극과 접촉을 하지 못하여 출력이 거의 발생하지 않는다. 그림 2(a)는 필름의 길이 차이를 시각적으로 나타낸 모식도이며, 그림 2(b)와 (c)는 5 m/s 풍속에서의 전압 및 전류 출력을 보여준다. 필름 길이가 120 mm에서 110 mm로 감소함에 따라 출력 전압은 각각 13.47 V, 18.06 V, 27.55 V가 측정되었고, 출력 전류는 0.49 μ A, 0.99 μ A, 1.54 μ A가 발생하였다. 본 구조에서 필름은 양쪽이 고정된 형태이기에 길이가 길어질수록 더 유연해지고 고유 진동수가 낮아진다. 120 mm 필름에 바람을 인가하였을 때, 필름의 움직임은 정해진 위치에서 진동하지 않고 후방 구간에서만 진동이 발생한다. 이는 필름 길이가 길어지면서 앞쪽 구간은 바람에 의해 평평하게 펴진 상태가 되고 남은 에너지는 상대적으로 유연한 뒤쪽에 집중되기 때문이다. 이로 인하여 필름과 알루미늄 전극간의 접촉·분리에 의한 전하 교환이 제한된 구간에서만 일어나게 된다. 반면, 110 mm에서는 필름이 안정적으로 흔들리는 플러터 상

태가 형성되며 알루미늄 전극과 상대적으로 넓은 영역에서 접촉·분리가 일어나 출력이 더 높게 나타난다. 그림 2(d)와 (e)의 10 m/s 측정 데이터에서도 동일한 경향성이 관찰되었다. 120 mm부터 차례대로 19.53 V, 27.31 V, 42.28 V의 전압과 1.65 μ A, 2.25 μ A, 2.89 μ A의 전류값을 얻었다. 이러한 측정을 통하여 필름의 길이에 따른 진동 변화와 유효 접촉 면적의 차이가 알루미늄 전극과의 접촉 대전을 결정하며 전압 및 전류 신호에 영향을 미침을 확인하였다.

그림 3은 필름 분할이 DFTEG의 출력 특성에 미치는 영향을 분석한 결과이다. 필름 분할에 따른 접촉 횟수 변화가 출력 특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 원상태, 2갈래로 분할, 3갈래로 분할하여 일정한 풍속 조건에서 출력 특성을 비교하였다. 그림 3(a)는 필름 분할에 따른 모습을 나타낸 그림이며, 그림 3(b)과 (c)에 나타난 바와 같이 풍속 5 m/s 조건에서의 출력 값은 필름 분할 여부에 따라 각각 27.55 V, 22.38 V, 1.56 V의 전압과, 1.54 μ A, 1.22 μ A, 0.05 μ A의 전류가 발생

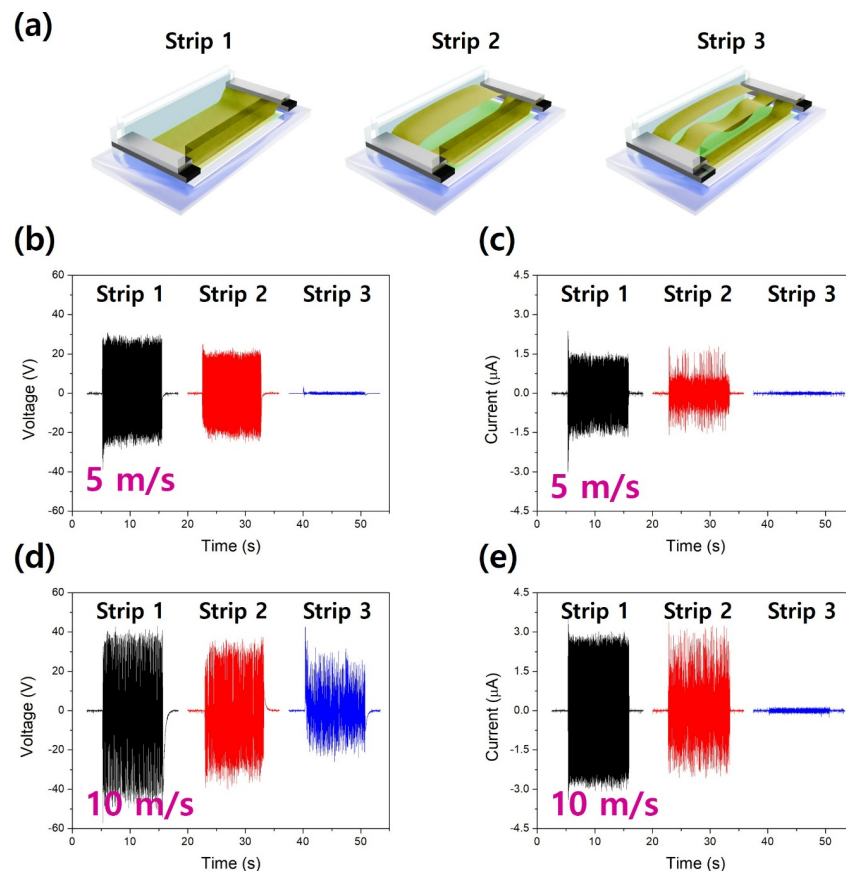


Fig. 3. (a) Photographs of the DFTEG with the PTFE film length 110 mm under different numbers of PTFE film strips, (b, c) comparison of V_{oc} and I_{sc} of the DFTEG under different numbers of PTFE film strips at the wind speed of 5 m/s, and (d, e) 10 m/s, respectively

하였다. 이론적으로 필름을 분할하면 각 구간의 접촉 횟수는 증가할 수 있으나, 분할된 각 구간의 단위 접촉 면적이 감소하므로 한 번의 접촉 시 알루미늄 전극과 형성되는 전하량이 감소하게 된다. 특히 3갈래로 분할한 경우, 구간의 너비가 원본 필름의 약 33% 수준으로 축소되어 각 접촉 지점에서의 전하 생성량 감소가 두드러졌다. 반면, 분할하지 않은 필름은 더 넓은 접촉 면적을 유지하면서 알루미늄 전극과 상대적으로 대면적 접촉을 형성한다. 이로 인해 한 번의 접촉·분리 주기에서 생성되는 전하량이 증가하므로, 비록 접촉 횟수 측면에서는 분할된 필름보다 적을 수 있으나 단위 접촉당 생성되는 전압 및 전류 값이 더 높으므로 전체 출력이 향상되는 결과로 나타난다. 또한, 분할된 필름의 플러터 진동 시 상·하부 전극에 동시에 접촉이 이루어질 경우, 동일한 필름을 매개로 각 전극에서 생성된 전하가 간섭받아 일부가 상쇄되고 그 결과 전극 간의 전위차가 줄어들게 된다. 이러한 상쇄·간섭 효과와 유효 접촉 면적 감소가 함께 작용하여 분할 구조보다 단일 필름 구조에서 더 높은 출력이 측정된 것으로 판단한다. 그림 3(d)와 (e)의 10 m/s 측정 데이터에서도 동일한 경향성이 관찰되었으며 원상태부터 차례대로 42.28 V, 34.20 V, 23.04 V의 전압과, 2.89 μ A, 2.39 μ A, 0.10 μ A의 전류가 발생하였다. 이러한 결과는 DFTEG에서 필름을

분할하여 접촉 횟수를 증가시키는 것보다 필름의 완전성을 유지하는 것이 더 효율적임을 입증한다.

3.2 환경 조건에 따른 출력 및 안정성 평가

DFTEG의 환경 조건에 따른 성능을 평가하기 위해 상대습도를 제어할 수 있는 챔버를 제작하고 상대습도를 30%, 50%, 70%로 설정하면서 일정한 풍속 조건에서 출력 특성을 비교하였다. 습도는 마찰전기 현상에서 재료 표면에 축적되는 전하의 양과 유지시간에 영향을 미치는 중요한 환경 인자로, 특히 PTFE 같은 절연체의 절연 특성에 영향을 준다. 일반적으로 건조한 환경에서는 표면이 상대적으로 절연 상태를 유지하여 마찰대전이 잘 일어나지만, 습도가 높아질수록 표면에 형성되는 수분층이 전하의 누설 경로로 작용하여 마찰전기 효율을 저하시킨다. 그림 4(a)와 (b)는 5 m/s 풍속에서의 상대습도에 따른 전압 및 전류 출력으로 각각 13.75 V, 6.46 V, 3.11 V의 전압과, 0.79 μ A, 0.51 μ A, 0.38 μ A의 전류가 발생하였다. 상대습도 30%의 저습 환경에서는 PTFE 필름과 알루미늄 전극 표면이 상대적으로 건조한 상태를 유지하여 접촉·분리 과정이 효율적으로 이루어진다. 이 조건에서는 한

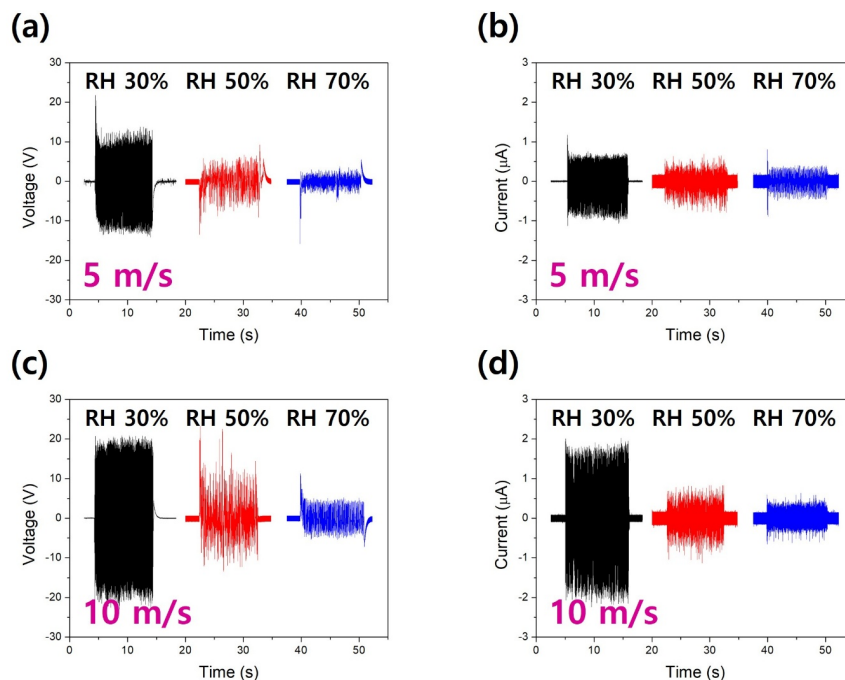


Fig. 4. (a, b) Comparison of V_{oc} and I_{sc} of the DFTEG with the PTFE film length 110 mm and a single strip at various relative humidity at the wind speed of 5 m/s and (c, d) 10 m/s, respectively

변의 접촉 주기에서 생성되는 전하량이 많고 전하 누설도 상대적으로 적어 가장 높은 전압과 전류값을 보여준다. 반면, 습도가 50%, 70%로 증가함에 따라 공기 중의 수분이 필름 표면과 알루미늄 전극 표면에 흡착되어 얇은 수분막을 형성하게 된다. 이 수분막은 전하가 이동할 수 있는 경로를 제공하여, 접촉·분리 과정에서 생성된 전하가 주변 환경으로 빠르게 누설되어 전하 밀도가 감소하게 되고 최종적으로 출력이 감소하게 된다. 그림 4(c)와 (d)의 10 m/s 측정 데이터에서도 상대습도에 따라 20.64 V, 12.59 V, 5.24 V의 전압과, 1.88 μ A, 0.68 μ A, 0.41 μ A의 전류로 상대습도가 증가할수록 출력이 낮아짐을 확인할 수 있다. 본 실험에서는 상대습도가 증가함에도 마찰전기 발전기가 지속적으로 전력을 생성함을 확인하였으며 습도의 변화에 따른 성능을 관찰할 수 있었다. 이는 DFTEG의 습도 대응성을 입증하며 다양한 습도 조건에서 안정적으로 에너지 하베스팅을 수행할 수 있음을 보여준다.

그림 5는 환경 조건 중 온도에 변화를 주어 소자의 온도를 -20°C, 4°C, 40°C로 설정한 후, 제작한 챔버 내 상온에서 일정한 풍속 조건으로 측정한 출력 특성을 비교하였다. 그림 5(a)와 (b)는 5 m/s 풍속에서의 온도에 따른 전압 및 전류 출력으로 온도가 상승함에 따라 1.84 V, 2.79 V, 16.73 V의 전압과,

0.13 μ A, 0.44 μ A, 0.60 μ A의 전류를 생성하였다. PTFE 기반 마찰전기 발전기는 고온에서 PTFE 표면이 전자를 붙잡아두는 능력이 약해져 표면의 전하가 더 쉽게 소실되어 출력이 감소하는 반면, 저온에서는 표면 전하가 더 잘 보존되어 출력이 증가한다 [31]. 그러나 본 실험에서는 주변 공기와의 온도 차이로 인해 PTFE 필름과 알루미늄 전극의 표면 온도가 낮은 조건에서 표면에 수분이 응결되고 서리가 형성되어 수분막이 생성되는 현상이 관찰되었다. 이 수분막은 표면 전하를 빠르게 누설시켜 PTFE 필름과 알루미늄 전극 간의 전하 전달을 방해한다. 반면, 온도가 증가함에 따라 표면의 결로 현상이 점차 완화되어 수분막의 영향이 줄어들고 동일한 풍속에서 표면에 유지되는 전하량이 증가하게 된다. 이는 결로 및 서리 현상에 의한 전하 누설이 더 지배적으로 작용한 결과라고 볼 수 있다. 그림 5(c)와 (d)의 10 m/s 측정 데이터에서도 2.53 V, 8.42 V, 16.89 V의 전압과, 0.32 μ A, 0.77 μ A, 0.94 μ A의 전류가 측정되어 소자 온도에 따른 출력 경향성을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 DFTEG가 결로 현상에도 불구하고 저온부터 고온까지 넓은 온도 범위에서 전기 출력을 생성할 수 있음을 나타낸다.

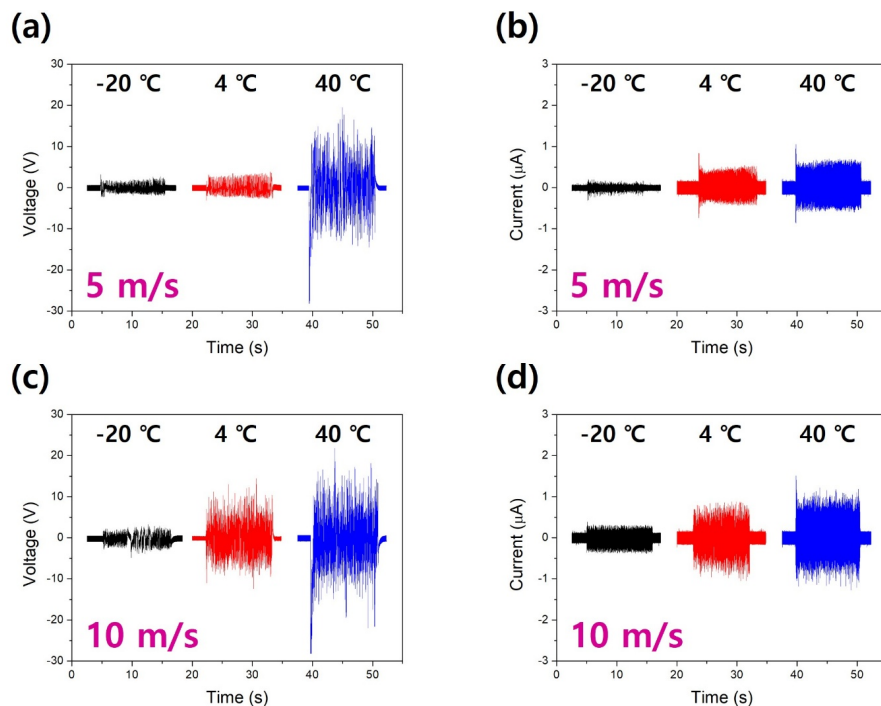


Fig. 5. (a, b) Comparison of V_{oc} and I_{sc} of the DFTEG with the PTFE film length 110 mm and a single strip at various temperatures at the wind speed of 5 m/s and (c, d) 10 m/s, respectively

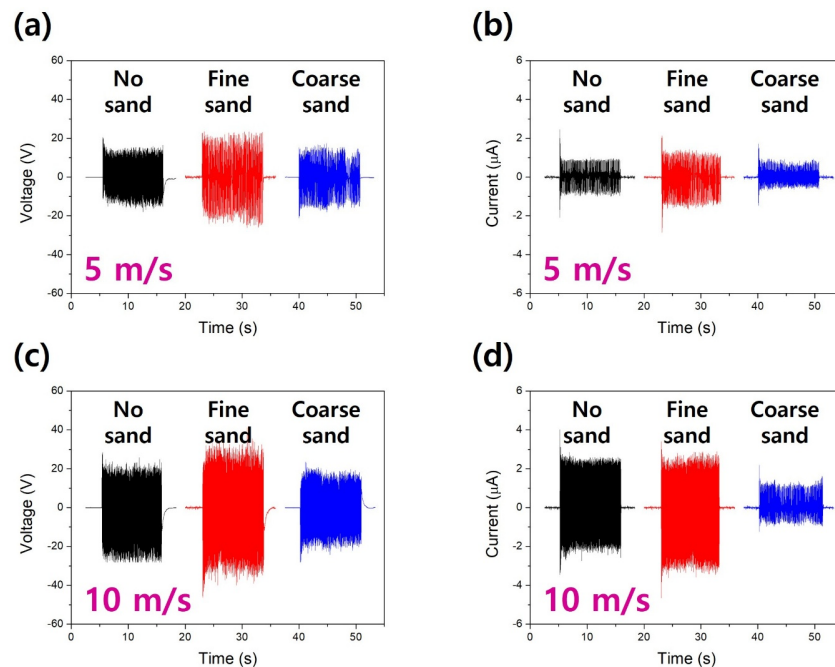


Fig. 6. (a, b) Comparison of V_{oc} and I_{sc} of the DFTEG with the PTFE film length 110 mm and a single strip under various sand-blown conditions including no sand, fine sand, coarse sand at the wind speed of 5 m/s and (c, d) 10 m/s, respectively

DFTEG의 모래바람 환경에 대한 성능을 평가하기 위해 순수한 바람, 고운 모래가 포함된 바람, 굵은 모래가 포함된 바람 조건에서 일정한 풍속 조건으로 출력 특성을 비교하였다. 그림 6(a)와 (b)는 5 m/s 풍속에서의 전압 및 전류 출력으로 전압은 각각 15.77 V, 23.46 V, 16.23 V가 발생했으며, 전류는 각각 0.95 μ A, 1.45 μ A, 0.71 μ A가 발생했다. 그림 6(c)와 (d)의 10 m/s 풍속에서는 각각 25.16 V, 34.79 V, 21.32 V의 전압이 생성되고, 전류는 각각 2.49 μ A, 3.02 μ A, 1.04 μ A가 생성되었다. 실험 결과, 서로 다른 모래 입자 크기는 마찰 과정에서 서로 다른 기계적 특성을 일으키며 이는 출력 특성에 직접적으로 반영된다. 순수한 바람만 부는 조건에서는 PTFE 필름과 알루미늄 전극이 직접 접촉하여 출력은 두 재료 간의 마찰대전 특성에만 의존한다. 고운 모래가 포함된 바람 환경에서는 모래 입자들이 PTFE 필름과 알루미늄 전극 사이에 개입되면서 필름-모래, 모래-전극 사이의 추가적인 마찰 기회가 형성된다. 이러한 다중 접촉 과정은 마찰을 더 잘 일어나게 하고 한 번의 진동 주기에서 생성되는 전하량을 증가시킨다. 굵은 모래가 포함된 바람 환경에서는 큰 입자들이 플러터 운동 과정에서 필름과 전극 사이에 안정적으로 머무르기보다는 쉽게 튀어 나가거나 굴러 떨어지는 경향을 보인다. 이에 따라 실제 마찰에 참여하는 입자 수가 줄어들고 남

아 있는 입자들 역시 부분적인 접촉만을 유도하여 진동 주기마다 접촉 위치와 강도가 달라지는 불균일한 접촉 상태가 형성된다. 이러한 결과를 통해 모래 입자의 유무와 입자 크기에 따라 DFTEG의 출력 특성이 달라짐을 알 수 있다. 따라서 모래바람 환경은 DFTEG에 대해 단순한 성능 저하 요인이 아니며 조건에 따라서 출력 향상을 기대할 수 있는 작동 환경이 될 수 있다. 이는 본 구조가 사막과 같은 모래바람이 존재하는 환경에서도 안정적으로 에너지 하베스팅을 수행할 수 있음을 보여주며 환경 적응형 발전 소자로서의 가능성을 입증한다.

4 결론

본 연구에서는 풍력 에너지를 기반으로 작동되는 DFTEG를 제작하고 구조 최적화와 더불어 다양한 환경 조건에서의 에너지 하베스팅 성능을 평가하였다. PTFE 필름의 길이와 분할 구조를 변화시키며 풍속에 따른 출력을 비교한 결과, 길이 110 mm의 단일 필름 구조에서 가장 안정적인 플러터 진동과 넓은 유효 접촉 면적을 형성하여 42.28 V의 개방전압과

2.89 μA 의 단락전류를 발생하는 최적 조건임을 확인하였다. 상대습도, 온도, 모래바람과 같은 환경 인자를 변화시키며 DFTEG의 출력을 측정한 결과 상대습도가 증가할수록 PTFE 필름 및 전극 표면에 형성되는 수분막이 전하 누설 경로로 작용하여 출력이 감소하지만, 지속적으로 전압 및 전류를 생성함을 확인하였다. 또한, 저온에서의 표면 결로 및 서리로 인해 출력이 저하되다가 온도가 상승함에 따라 결로가 사라지며 출력이 증가하는 특성을 보였다. 모래바람 환경에서는 모래 입자에 의한 불균일한 다중 접촉이 출력에 영향을 주는 것을 통해 극한 환경의 활용 가능성을 확인하였다. 이러한 결과는 DFTEG가 단순히 특정 조건에서만 높은 출력을 내는 소자가 아니라 상대습도, 온도, 모래 입자 등 실제 환경에서 빈번히 발생하는 복합적인 환경 요인 하에서도 구조적 안정성과 전기적 출력을 유지할 수 있는 환경 적응형 전력 마찰전기 구조임을 의미한다. 나아가 복잡한 회전부 없이 자석 기반 고정 방식을 통해 필름과 전극을 손쉽게 교체할 수 있으므로 유지보수가 어려운 가혹 환경에서도 비교적 간편하게 활용할 수 있는 저전력 에너지 하베스팅 전원으로서의 발전 가능성을 제시한다.

ORCID

Chang Kyu Jeong <https://orcid.org/0000-0001-5843-7609>

Acknowledgement

It is supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) and the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) grant funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT) (RS-2025-22932983 and RS-2023-00304743). This work was supported by the Technology Innovation Program (or Industrial Strategic Technology Development Program-Industrial Technology Alchemist Project) (RS-2024-00432143, Artificial Humans with Enhancing Embodied AI through Accumulated Experiential Interaction and Sharing) funded by the Ministry of Trade Industry and Resources (MOTIR, Korea). Additionally, this research was supported by the Regional Innovation System & Education (RISE) program through the Jeonbuk RISE Center, funded by the Ministry of Education (MOE) and the Jeonbuk State, Republic of Korea (2025-RISE-13-JBU).

Conflict of Interest

The author (Chang Kyu Jeong) currently serves on the editorial board of JEEM, but was not involved in any part of the publication process. Other than this, the authors declare that they have no relevant potential conflicts of interest.

Author Contributions

Jimin Kang: Methodology, Visualization, Investigation, Data Curation, Writing - Original Draft.

Jihun Choi: Investigation, Data Curation.

Yebin Lee: Validation, Writing - Review & Editing.

Chang Kyu Jeong: Investigation, Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing, Supervision, Project administration, Funding acquisition.

Data Availability

Data available on request from the authors

References

- [1] A. Ahmed, I. Hassan, M. F. El-Kady, A. Radhi, C. K. Jeong, P. R. Selvaganapathy, J. Zu, S. Ren, Q. Wang, and R. B. Kaner, *Adv. Sci.*, **6**, 1802230 (2019). doi: <https://doi.org/10.1002/advs.201802230>
- [2] D. Choi, Y. Lee, Z. H. Lin, S. Cho, M. Kim, C. K. Ao, S. Soh, C. Sohn, C. K. Jeong, J. Lee, M. Lee, S. Lee, J. Ryu, P. Parashar, Y. Cho, J. Ahn, I. D. Kim, F. Jiang, P. S. Lee, G. Khandelwal, S. J. Kim, H. S. Kim, H. C. Song, M. Kim, J. Nah, W. Kim, H. G. Menge, Y. T. Park, W. Xu, J. Hao, H. Park, J. H. Lee, D. M. Lee, S. W. Kim, J. Y. Park, H. Zhang, Y. Zi, R. Guo, J. Cheng, Z. Yang, Y. Xie, S. Lee, J. Chung, I. K. Oh, J. S. Kim, T. Cheng, Q. Gao, G. Cheng, G. Gu, M. Shim, J. Jung, C. Yun, C. Zhang, G. Liu, Y. Chen, S. Kim, X. Chen, J. Hu, X. Pu, Z. H. Guo, X. Wang, J. Chen, X. Xiao, X. Xie, M. Jarin, H. Zhang, Y. C. Lai, T. He, H. Kim, I. Park, J. Ahn, N. D. Huynh, Y. Yang, Z. L. Wang, J. M. Baik, and D. Choi, *ACS Nano*, **17**, 11087 (2023). doi: <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c12458>
- [3] X. Tang, X. Wang, R. Cattley, F. Gu, and A. D. Ball, *Sensors*, **18**, 4113 (2018). doi: <https://doi.org/10.3390/s18124113>

- [4] D. Müller, E. Jiang, P. Rivas-Lazaro, C. Baretzky, G. Loukeris, S. Bogati, S. Paetel, S. J. C. Irvine, O. Oklobia, S. Jones, D. Lamb, A. Richter, G. Siefer, D. Lackner, H. Helmers, C. Teixeira, D. Forgács, M. Freitag, D. Bradford, Z. Shen, B. Zimmermann, and U. Würfel, *ACS Appl. Energy Mater.*, **6**, 10404 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.aem.3c01274>
- [5] C. Wu, X. P. Zhang, and M. Sterling, *Sci. Rep.*, **12**, 1363 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05247-2>
- [6] D. Tong, D. J. Farnham, L. Duan, Q. Zhang, N. S. Lewis, K. Caldeira, and S. J. Davis, *Nat. Commun.*, **12**, 6146 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26355-z>
- [7] H. Polinder, J. A. Ferreira, B. B. Jensen, A. B. Abrahamsen, K. Atallah, and R. A. McMahon, *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, **1**, 174 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2013.2280428>
- [8] E. Hart, B. Clarke, G. Nicholas, A. Kazemi Amiri, J. Stirling, J. Carroll, R. Dwyer-Joyce, A. McDonald, and H. Long, *Wind Energy Sci.*, **5**, 105 (2020).
doi: <https://doi.org/10.5194/wes-5-105-2020>
- [9] M. Liu, G. Bayer, M. Reimers, W. Schünemann, F. König, G. Jacobs, R. Schelenz, N. Bader, G. Poll, and M. Marian, *Wear*, **571**, 205760 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205760>
- [10] M. Mehta, M. Zaaier, and D. von Terzi, *Wind Energy Sci.*, **9**, 141 (2024).
doi: <https://doi.org/10.5194/wes-9-141-2024>
- [11] G. Zhu, B. Peng, J. Chen, Q. Jing, and Z. L. Wang, *Nano Energy*, **14**, 126 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.11.050>
- [12] Y. Wang, Y. Yang, and Z. L. Wang, *npj Flexible Electron.*, **1**, 10 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41528-017-0007-8>
- [13] A. A. A. Shateri, F. Zhuo, N. S. Shuaibu, R. Wan, L. Xu, D. Hazarika, B. Gyawali, and X. Wang, *Micromachines*, **16**, 11 (2024).
doi: <https://doi.org/10.3390/mi16010011>
- [14] U. G. Musa, S. D. Cezan, B. Baytekin, and H. T. Baytekin, *Sci. Rep.*, **8**, 2472 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20413-1>
- [15] J. Bae, J. Lee, S. Kim, J. Ha, B. S. Lee, Y. Park, C. Choong, J. B. Kim, Z. L. Wang, H. Y. Kim, J. J. Park, and U. I. Chung, *Nat. Commun.*, **5**, 4929 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1038/ncomms5929>
- [16] H. Wang, S. Huang, H. Kuang, C. Zhang, Y. Liu, K. Zhang, X. Cai, X. Wang, J. Luo, and Z. L. Wang, *Adv. Energy Mater.*, **13**, 2300529 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.202300529>
- [17] H. Zhang, S. Sundaresan, and M. A. Webb, *Nat. Commun.*, **15**, 2616 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46932-2>
- [18] S. M. Kang, J. H. Shin, J. H. Kim, H. S. Kang, C. K. Jeong, H. E. Lee, and B. S. Bae, *Nano Energy*, **127**, 109742 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.109742>
- [19] C. Wu, A. C. Wang, W. Ding, H. Guo, and Z. L. Wang, *Adv. Energy Mater.*, **9**, 1802906 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.201802906>
- [20] Z. L. Wang, *ACS Nano*, **7**, 9533 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1021/nn404614z>
- [21] F. R. Fan, Z. Q. Tian, and Z. L. Wang, *Nano Energy*, **1**, 328 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.01.004>
- [22] X. Li, Q. Yang, D. Ren, Q. Li, H. Yang, X. Zhang, and Y. Xi, *Nanoscale Adv.*, **6**, 4522 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1039/D4NA00340C>
- [23] F. R. Fan, L. Lin, G. Zhu, W. Wu, R. Zhang, and Z. L. Wang, *Nano Lett.*, **12**, 3109 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1021/nl300988z>
- [24] H. Kim, H. Kim, and C. K. Jeong, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 292 (2023).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.3.13>
- [25] X. Zhang, J. Hu, Q. Yang, H. Yang, H. Yang, Q. Li, X. Li, C. Hu, Y. Xi, and Z. L. Wang, *Adv. Funct. Mater.*, **31**, 2106527 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202106527>
- [26] Y. Nurmakanov, G. Kalimuldina, G. Naurzybayev, D. Adair, and Z. Bakenov, *Nanoscale Res. Lett.*, **16**, 122 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1186/s11671-021-03578-z>
- [27] X. Dong, Z. Liu, P. Yang, and X. Chen, *Nano Energy Adv.*, **2**, 245 (2022).
doi: <https://doi.org/10.3390/nanoenergyadv2030013>
- [28] Y. Xie, S. Wang, L. Lin, Q. Jing, Z. H. Lin, S. Niu, Z. Wu, and Z. L. Wang, *ACS Nano*, **7**, 7119 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1021/nn402477h>
- [29] J. Zhao and Y. Shi, *Adv. Funct. Mater.*, **33**, 2213407 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202213407>
- [30] Z. Quan, C. B. Han, T. Jiang, and Z. L. Wang, *Adv. Energy Mater.*, **6**, 1501799 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.201501799>
- [31] C. X. Lu, C. B. Han, G. Q. Gu, J. Chen, Z. W. Yang, T. Jiang, C. He, and Z. L. Wang, *Adv. Eng. Mater.*, **19**, 1700275 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1002/adem.201700275>