

## 정전발전 기반 바람에너지 수확장치의 최적화 및 고전압 생성을 위한 활용 방안

장순민\*<sup>‡</sup> · 라윤상\*<sup>‡</sup> · 조수민\* · 감동익\* · 신동진\* · 이희규\* · 최부희\* · 이세혁\* · 차경제\*\* ·  
서경덕\*\*\* · 김형우\*\*\*\*<sup>†</sup> · 최동휘\*<sup>†</sup>

\*경희대학교 기계공학과  
17104 경기도 용인시 덕영대로 1732  
\*\*한국생산기술연구원 스마트제조기술연구그룹  
42994 대구광역시 달성군 테크노순환로 320  
\*\*\*원광대학교 기계공학과  
54538 전북 익산시 익산대로 460  
\*\*\*\*원광대학교 기계설계공학과  
54538 전북 익산시 익산대로 460

(2021년 9월 1일 접수, 2021년 9월 24일 수정본 접수, 2021년 10월 1일 채택)

## Optimization and Application Research on Triboelectric Nanogenerator for Wind Energy Based High Voltage Generation

Sunmin Jang\*<sup>‡</sup>, Yoonsang Ra\*<sup>‡</sup>, Sumin Cho\*, Dongik Kam\*, Dongjin Shin\*, Heegyu Lee\*, Buhee Choi\*, Sae Hyuk Lee\*,  
Kyoung Je Cha\*\*, Kyoung Duck Seo\*\*\*, Hyung Woo Kim\*\*\*\*<sup>†</sup> and Dongwhi Choi\*<sup>†</sup>

\*Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deogyong-daero, Yongin, Gyeonggi, 17104, Korea

\*\*Smart Manufacturing Technology R&D Group, KITECH, 320 Techno sunhwan-ro, Dalseong-gun, Daegu, 42994, Korea

\*\*\*Department of Mechanical Engineering, Wonkwang University, 460 Iksan-daero, Iksan-si, Jeollabuk-do, 54538, Korea

\*\*\*\*Department of Mechanical Design Engineering, Wonkwang University, 460 Iksan-daero, Iksan-si, Jeollabuk-do, 54538, Korea

(Received 1 September 2021; Received in revised from 24 September 2021; Accepted 1 October 2021)

### 요 약

휴대형, 착용형 전자기기의 활용범위가 넓어지면서, 무겁고 부피가 큰 고체 배터리의 한계점이 드러나고 있으며, 배터리의 역할을 일부 분담할 수 있는 소형 에너지 수확 장치의 개발이 시급한 가운데, 일상 생활 속에서 버려지는 에너지원에 대한 활용도가 중요해지고 있다. 정전발전 기술은 두 물질 표면의 접촉과 분리에 의해 발생하는 마찰대전 효과와 전하유도 현상에 기반해 전기를 생산할 수 있기 때문에, 주변환경에 존재하는 역학적, 기계적 에너지를 복잡한 중간과정을 거치지 않고도 효과적으로 수확할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 인간의 주변환경에 존재하는 에너지원 중에서도 바람에너지는 자연환경에 존재하는 무한한 친환경 에너지원으로써, 그 수확과 활용에 대한 관심이 높은 신재생 에너지원이다. 본 연구에서는 정전발전 기술을 기반으로 하여 이러한 바람에너지의 효과적 수확을 위한 에너지 수확 장치의 최적화와 정전발전 기술의 활용도를 극대화할 수 있는 활용 방안에 대해 분석하였다. Fluttering film을 이용한 Natural wind based Fluttering TENG (NF-TENG)를 개발하였으며, 바람에너지의 효과적 수확을 위해 설계 최적화를 진행하였다. 또한 낮은 전류와 높은 전압을 발생시키는 TENG의 고유 특징을 부각하여 안전한 고전압 발생 시스템을 개발하여 고전압을 요구하는 분야에서의 활용 방안을 제안하였다. 따라서 본 연구에서 도출한 연구 결과는 정전발전 기술을 기반으로 하는 소형 에너지 수확장치를 이용해 일상생활 속에서 버려지는 바람에너지를 수확하여 고전압이 필요한 분야에서 폭넓게 활용할 수 있는 방법으로써 큰 잠재력을 보여줄을 시사한다.

**Abstract** – As the scope of use of portable and wearable electronic devices is expanding, the limitations of heavy and bulky solid-state batteries are being revealed. Given that, it is urgent to develop a small energy harvesting device that can partially share the role of a battery and the utilization of energy sources that are thrown away in daily life is becoming

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: dongwhi.choi@khu.ac.kr, kimhw1203@wku.ac.kr

<sup>‡</sup>S. J., and Y. R. contributed equally to this work.

<sup>‡</sup>이 논문은 포항공과대학교 강인석 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

more important. Contact electrification, which generates electricity based on the coupling of the triboelectric effect and electrical induction when the two material surfaces are in contact and separated, can effectively harvest the physical and mechanical energy sources existing in the surrounding environment without going through a complicated intermediate process. Recently, the interest in the harvest and utilization of wind energy is growing since the wind is an infinitely eco-friendly energy source among the various environmental energy sources that exist in human surroundings. In this study, the optimization of the energy harvesting device for the effective harvest of wind energy based on the contact electrification was analyzed and then, the utilization strategy to maximize the utilization of the generated electricity was investigated. Natural wind based Fluttering TENG (NF-TENG) using fluttering film was developed, and design optimization was conducted. Moreover, the safe high voltage generation system was developed and a plan for application in the field requiring high voltage was proposed by highlighting the unique characteristics of TENG that generates low current and high voltage. In this respect, the result of this study demonstrates that a portable energy harvesting device based on the contact electrification shows great potential as a strategy to harvest wind energy thrown away in daily life and use it widely in fields requiring high voltage.

Key words: Energy harvesting, High voltage, Contact electrification, Triboelectricity

## 1. 서 론

최근 국제 에너지 위기 및 환경 오염 등에 대한 문제가 부각되면서 각국의 정부 및 전세계 기업들이 탄소 배출 절감 등의 정책, 경영방침 등을 시행하며 환경 문제와 에너지 문제를 해결하기 위한 노력을 강화하고 있다. 여러 연구결과에 의해 근현대 산업에서 가장 널리 사용되는 화석연료가 환경오염의 주 원인으로 지목되면서, 화석연료의 사용량을 절감할 수 있는 방안들에 대한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 그 중에서도 에너지 소비량을 일부 절충할 수 있는 신재생 에너지 수확 및 활용에 대한 관심이 높아지고 있다. 신재생 에너지는 기존의 화석연료와 달리, 버려지는 에너지 및 자연환경에서 스스로 발생하는 에너지를 수확함으로써 오염물질의 배출을 최소화하는 친환경 기술이다. 이러한 신재생 에너지 수확 기술로는 태양광 발전, 태양열 발전, 열전발전, 압전발전, 그리고 정전발전 기술 등이 활발하게 연구되어지고 있으며[1-5], 특히 정전발전 기술은 비교적 최근에 개발되기 시작한 신기술로서, 간단한 작동 원리 및 다양한 재료의 적용 가능성 등 기존의 다른 신재생 에너지 수확 기술들과 차별되는 특유의 장점들로 인해 전세계 연구진들의 주목도가 높아지고 있는 기술이다.

정전발전기술을 기반으로 하는 마찰전기 나노 발전기(Triboelectric nanogenerator, TENG)는 2012년 처음 학계에 보고되었으며, 두 물질의 접촉과 분리에 의해 자연 발생하는 접촉대전현상과 전하유도 현상을 기본적인 작동 원리로 한다[6]. 서로 다른 두 물질이 접촉할 때 두 물질의 접촉 표면은 두 물질간 일함수 차이에 의해 서로 다른 전하로 대전되게 되며, 두 물질이 외력에 의해 분리되면 각 물질의 접촉 표면에는 순전하가 남게 된다. 이때 두 물질의 인접하게 위치한 전극이 존재한다면 전극에는 각 순전하의 반대전하가 유도되게 된다. 이 후 다시 두 물질이 접촉하게 되면 반대전하를 띠고 있는 서로의 순전하를 상쇄하는 효과가 발생하면서 전극은 전기적 중립 상태가 된다. 이처럼 비교적 간단한 원리에 의해 작동되며 서로 다른 두 물질의 접촉 및 분리가 핵심 요소이기 때문에, 특정 재료만을 사용해야 하는 다른 발전 기술들과 달리 다양한 재료를 적용할 수 있으며 이러한 특징으로 인해 파생되는 다양한 장점들이 존재한다. 또한 TENG는 서로 다른 두 물질의 접촉/분리로부터 전기에너지를 생산하므로, 다양한 역학적, 기계적 에너지를 수확하는데 효과적이다[7-10]. 특히 주변환경에서 자연발생 하였던가 스스로 소산되어 사라지는 에너지를 전기에너지로 변환하여 활용 및 저장할 수 있다는 점에서 친환경 신재생 에너지 수확을 위한 신기술로서

부각되고 있다[11].

바람은 자연환경에서 공해 물질의 발생 없이 생성되는 무한한 에너지원으로, 활용도와 지속성이 높은 친환경 신재생 에너지원으로써 주목받고 있으며 오랜 기간 바람에너지 수확을 위한 다양한 연구들이 진행되어 오고 있다. 뿐만 아니라 현대사회 들어 전자기기들의 소형화, 착용형 기기들의 개발이 눈에 띄게 발전하면서 기존과 같이 대량의 전력을 생산하여 각 전자기기에 분배하여 사용하는 방식은 버려지는 에너지의 양이 많고 배터리의 사용으로 인한 시간적, 공간적 제약으로 인한 한계점이 드러나고 있다. 이러한 제한점은 세계 에너지 위기 등 외부적 요인과 맞물리며 기존 방식의 단점으로써 더욱 부각되고 있다. 이로 인해 최근 일상생활 속에서 버려지는 에너지를 수확하여 각 기기에 적절한 전력을 공급하기 위한 시도가 이루어지고 있다. 이러한 추세로 말미암아 앞서 설명한 TENG를 이용한 바람 에너지 수확에 대한 연구가 활발하다[9,10]. 본 연구에서는 역학적 에너지원으로써의 바람의 특징에 재료 선택의 다양성과 같은 TENG 고유의 특징을 결합하여 Natural wind based Fluttering TENG (NF-TENG)를 개발하였으며, 다양한 제작 조건 및 환경 변수에 의한 전기 에너지 수확량을 비교하였다. 또한 고전압 저전류 생성의 TENG 자체 특징을 이용하여 고전압 활용 분야에서의 신재생 에너지 활용을 위한 방안을 제안하였다.

## 2. 실 험

### 2-1. 실험 장치 및 재료

Fig. 1은 본 연구에서 제작된 NF-TENG의 개략도 및 작동 원리를 보여준다. 외부 case 및 Wind shield는 3D printer를 이용하여 열가소성 수지 적층 제조방식으로 제작되었다. 직육면체 형태의 case 내부에 윗면과 아랫면은 전기적 전도도가 우수한 알루미늄(Al)을 이용해 코팅되어 있으며, 중앙에는 바람에 의해 자유롭게 펄럭일 수 있는 Kapton 재질의 Dielectric film이 위치한다. Wind shield를 통해 바람이 유입되면 Kapton film이 바람에 의해 펄럭이며 위, 아래 Al 전극과 접촉/분리가 발생한다. 앞서 언급한 바와 같이, Kapton과 Al의 접촉/분리에 의해 접촉대전현상과 전하유도현상이 발생하며 두 Al 전극 사이에는 교류형 전류가 흐르게 된다. 전류는 오실로스코프를 이용하여 측정되었으며, 일정하게 유지되는 오실로스코프의 내부저항에 기반하여 전압으로 표현되었다. 또한 오실로스코프의 한계전압을 초과하는 출력에 대해서는 고전압 프로브를 이용하여 보다 정확한 결과값을 도출하였다. 바람의 특성과

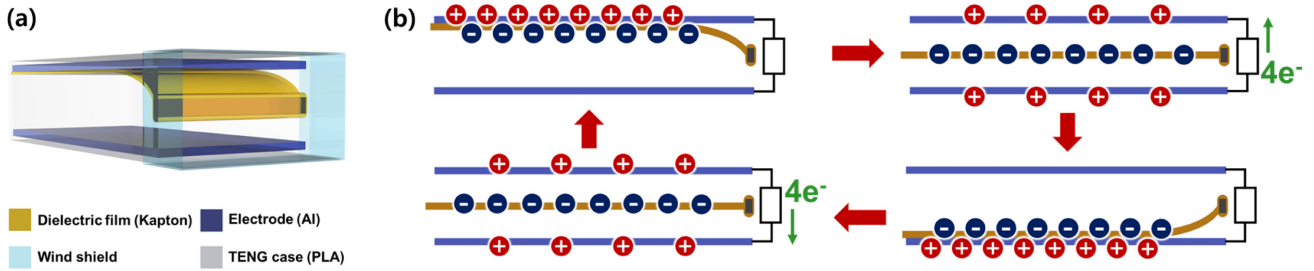


Fig. 1. (a) Schematic, used material, and (b) working mechanism of the developed NF-TENG.

fluttering film에 의해 높은 주파수의 교류전류를 발생시킬 수 있고 높은 내부저항을 갖는 TENG의 특성으로 인해 저전류 고전압의 전기를 발생시킬 수 있다.

2-2. 실험 방법

바람에너지의 수확에 대한 단일 NF-TENG의 성능 평가를 위하여, 다양한 parameter에 대한 NF-TENG의 출력 변화를 비교 분석하였으며, NF-TENG의 길이, 높이, 폭, 그리고 내부에 삽입되는 Kapton film의 두께에 대한 출력시험이 이루어졌다. 또한 자연풍(풍속 3~5 m/s)의 효과적 수확을 위해 자연풍이 발생하는 환경과 유사한 실험 조건에서 실험을 진행하였다. 단일 NF-TENG에 대한 평가 후 가장 높은 출력을 보이는 NF-TENG을 선정하여 병렬화를 통해 시스템의 출력을 1차적으로 증폭하였다.

2-3. 고전압 생성

전기 집진, 코로나 방전, 마이크로 플라즈마, 그리고 전기방사 등 고전압을 필요로 하는 분야에서 일반적으로 최소 전압이 수 kV를 필요로 한다는 점을 감안하여[11-14], 본 연구에서는 기존의 TENG를 이용한 고전압 생성에 더불어 전압 증폭 회로(Voltage Multiple Circuit, VMC)를 적용함으로써 충분한 고전압을 형성함과 동시에 각 분야에서 각기 다르게 요구되는 필요전압의 크기를 충족할 수

있도록 전압 조절 시스템을 구축하였다. 또한 출력이 높은 주파수의 교류형태로 발생하는 TENG의 특성을 고려하여 전류가 교류에서 직류로 변환되도록 하였다. VMC는 다이오드와 축전기로 구성되어 있으며, 입력되는 전력을 동일하게 유지하면서 전류의 크기를 감소시키고 전압의 크기를 증가시키는 방식으로 작동된다. 이때 전압 증폭 과정 중 회로 자체에서 전력 손실이 발생할 수 있는데, 높은 주파수의 고전압 교류 전류가 입력될수록 손실이 감소하고 전압 증폭 효율은 증가한다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 단일 NF-TENG에 대한 출력시험

개발된 NF-TENG에 대하여 자연풍 조건 하에서 각 parameter에 대한 출력 비교 시험이 이루어졌다. Fig. 2(a)는 NF-TENG의 출력에 영향을 줄 수 있는 parameter들을 나타낸 개략도이다. L, W, H, t는 각각 NF-TENG의 길이, 폭, 높이, 그리고 Kapton film의 두께를 의미한다. 앞서 설명한 바와 같이, Wind shield를 통해 바람이 유입되면 바람의 세기에 따라 NF-TENG 중앙에 위치한 Kapton film이 움직이며 NF-TENG의 위, 아래에 코팅되어 있는 Al과 접촉/분리가 발생한다. 이때 발생하는 출력 전압은 Fig. 2(b)와 같은 개형으로 측정될 수 있다. 이후 분석에서는 NF-TENG의 출력에 대한 정량적

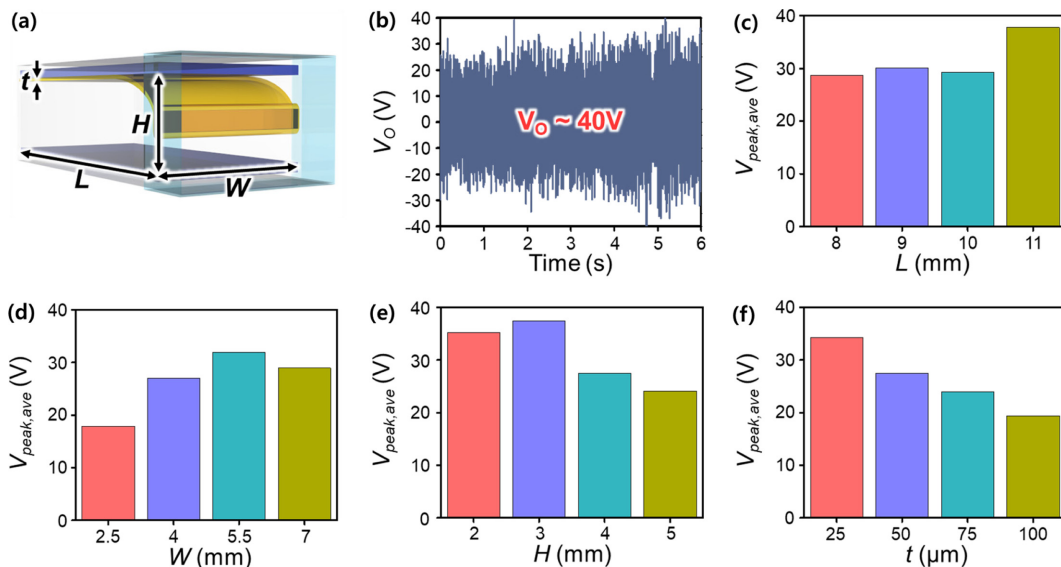


Fig. 2. (a) Schematic and (b) output voltage ( $V_o$ ) of the fabricated NF-TENG. Comparative analysis of output performance depending on the (c) L, (d) W, (e) H, and (f) t.

성능 평가를 위해 얻어진 데이터에서 출력 값 중 양의 값으로 발생하는 최대 전압만을 선별하여 분석하였다. Fig. 2(c-f)는 각 파라미터 L, W, H, t의 변화에 대한 NF-TENG의 출력을 비교한 결과이다. 두 물질의 표면에서의 접촉/분리를 기본 원리로 하는 정전발전의 특성 상 시스템의 크기가 크고 접촉/분리가 발생하는 면적이 넓을수록 전기적 성능은 증가하게 된다. 하지만 최근 부각되고 있는 전자기기의 소형화, 유연화 등의 트렌드를 고려했을 때, 시스템의 크기가 커지는 점은 분명한 단점으로 작용할 수 있다. 때문에 본 연구에서는 시스템의 크기와 성능 간의 연관 관계를 분석하여 최적점을 도출하고자 하였다. 그 결과, Fig. 2(c)에서 확인할 수 있듯이 L은 증가할수록 NF-TENG의 출력도 향상되었다. 하지만 W와 H는 각각 5.5 cm와 3 mm일 때 최대의 출력이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 W와 H가 바람이 유입되는 경로와 직결되는 parameter로 작용하여 바람에 의한 fluttering film의 움직임에 영향을 주기 때문인 것으로 보인다. NF-TENG의 중앙에 위치하면서 fluttering film으로써 작용하는 Kapton film의 두께로 인한 영향도 조사되었으며, 그 결과는 Fig. 2(f)에서 확인할 수 있다. 위의 비교 실험을 통하여 L=11 cm, W=5.5 cm, H=3 cm, 그리고 t=25  $\mu$ m인 NF-TENG가 최적 디자인임을 확인하였으며, 해당 NF-TENG의 출력 성능은 Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 최대 40V까지 전압을 발생시킬 수 있다.

**3-2. NF-TENG의 병렬화를 통한 출력 향상 및 전자기기 전력 공급 방안**

앞서 진행된 단일 NF-TENG의 각 parameter에 대한 성능평가를 기반으로 선정된 L=11 cm, W=5.5 cm, H=3 cm, 그리고 t=25  $\mu$ m로 제작된 NF-TENG를 병렬화 하여 1차적 출력 향상에 대한 최적화를 진행하였다. Fig. 3(a)는 병렬화 된 NF-TENG의 수 n에 대하여 향상된 출력을 비교한 그래프이다. n=1의 경우 단일 NF-TENG와 동일한 구성을 가지고 있으며, Fig. 3(a)에서 볼 수 있듯이 최대 40 V의 출력 전압을 발생시킬 수 있다. n이 1에서 8까지 증가할 때, 병렬화 된 NF-TENG의 출력은 증가하는 경향성을 보이며, n이 4일 때와 8일 때를 비교했을 때, 시스템의 크기는 n=4 보다 n=8일 때 두배로 증가하지만 출력에 있어서는 큰 차이점이 보이지 않음을 알

수 있다. 바람 에너지원의 특성과 NF-TENG의 출력이 교류 형태로 발생하는 점을 고려했을 때, 각 NF-TENG에서 Kapton film과 Al 전극의 접촉/분리가 이루어지는 시간적 Synchronization에서 불일치가 발생할 수 있으며, 이로 인해 서로 다른 방향의 전류가 동일한 순간에 발생할 때 출력이 상쇄되는 현상이 발생할 수 있다. 이러한 문제점은 기존에 TENG의 병렬화를 추구한 여러 연구 결과에서 확인할 수 있는 부분이며, 바람 에너지 수확에 있어 피할 수 없는 한계점으로 여겨지고 있다. 이러한 현상을 극복하기 위해 본 연구에서는 Fig. 3(b)와 같이 NF-TENG의 병렬화를 진행하였으며, 시스템의 소형화를 고려했을 때 n=4인 시스템을 최적 병렬화 시스템인 것으로 확인할 수 있었다. Fig. 3(c)는 제작된 병렬화 NF-TENG를 이용해 자체 제작한 Light-Emitting Diode (LED) panel에 직접적으로 전력을 공급한 사진이다. 3~5 m/s의 풍속을 갖는 자연풍으로부터 바람에너지를 수확하여 약 15 cm×5 cm 크기의 LED panel을 작동시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(d)는 병렬화 된 NF-TENG를 이용해 수확한 바람에너지를 이용하여 축전기(220  $\mu$ F)를 충전한 그래프이다. 자연풍만으로 기본적인 전자기기를 구동하기 위한 필요전압인 1.5 V의 전기를 5분 이내에 축전기에 저장할 수 있는 것을 확인하였다. Fig. 3(e), 3(f)는 NF-TENG를 이용해 충전한 축전기를 이용하여 다른 전자기기들을 구동한 모습이다.

**3-3. VMC 적용을 통한 고전압 생성과 활용방안**

일반적으로 고전압을 요구하는 분야에서는 최소한 수 kV의 전압을 필요로 한다는 점을 고려했을 때, 위에서 제안된 NF-TENG의 성능은 충분하지 않을 수 있다. 이에 본 연구에서는 병렬화 된 NF-TENG에 VMC를 적용하여 전압을 증폭함으로써 충분한 고전압을 달성하였다. VMC를 통해 증폭되는 전압의 크기를 사용자의 필요에 맞게 조절할 수 있다는 점으로 인해 NF-TENG와 VMC가 결합된 시스템은 각 분야에서 각기 다르게 요구되는 필요전압의 크기를 충족할 수 있도록 설계되었다. 또한 위의 실험 결과들에서 확인할 수 있듯이 TENG의 출력 특성은 높은 주파수의 교류형태로 발생된다. 이러한 점을 고려하여 전류가 교류에서 직류로 변환되도록 VMC 회로를 구성하였다. VMC는 각각 12개의 다이오드와 축전기로 구

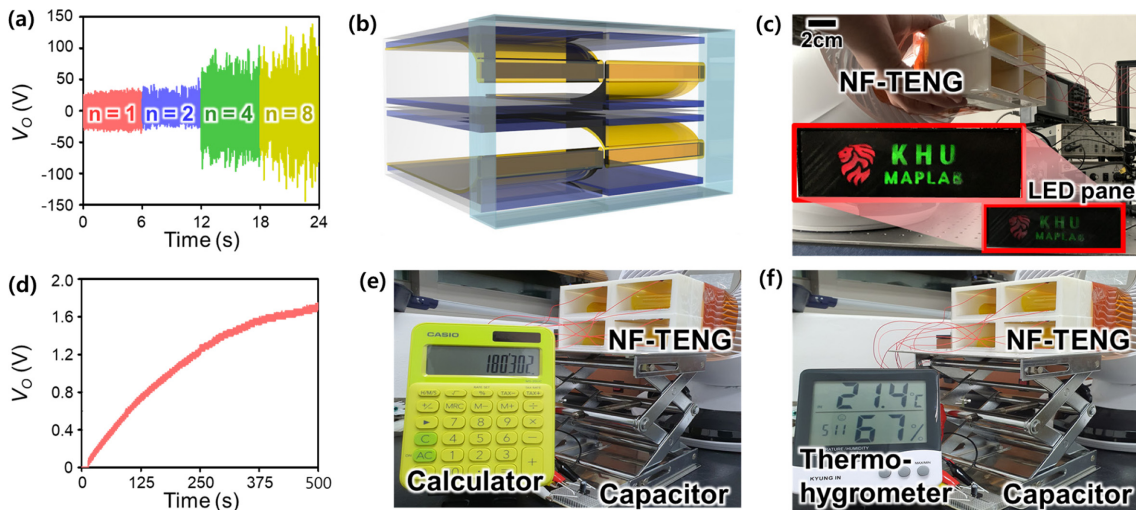


Fig. 3. (a) Output performance by varying n. (b) Parallel Connection of NF-TENGs with 4 of n. (c) Operation of LED panel and (d) capacitor charging by parallel connected NF-TENGs. Operation of (e) the calculator and (f) the thermo-hygrometer using the charged capacitor.

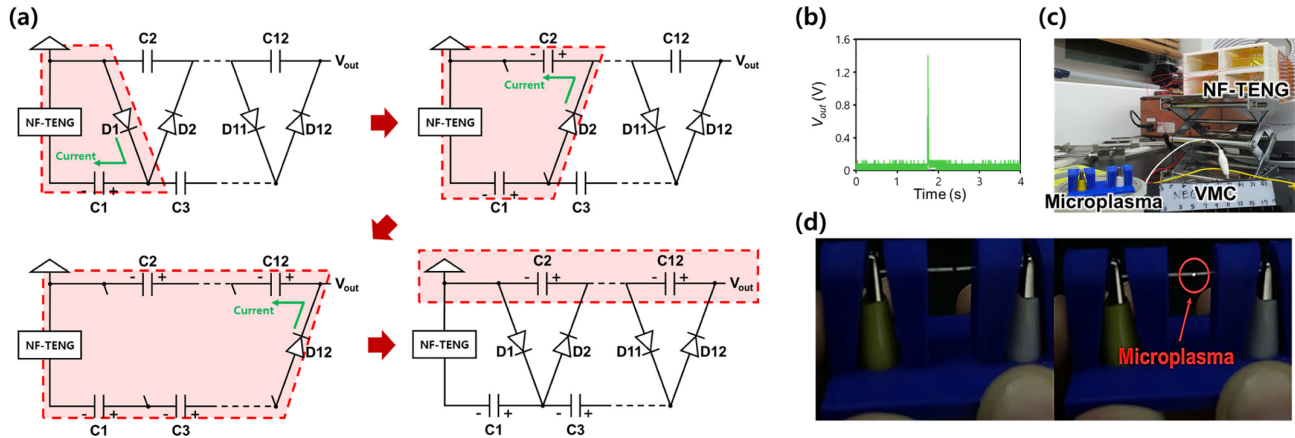


Fig. 4. (a) Working mechanism of VMC. (b) Peak type output voltage of NF-TENG with VMC. Photograph of the (c) set up and (d) generation of micro-plasma using the NF-TENG with VMC.

성되어 있으며, 입력되는 전력의 크기를 동일하게 유지하면서 전류의 크기를 감소시키고 전압의 크기를 증가시키는 방식으로 작동된다. Fig. 4(a)는 이러한 VMC의 간략한 회로 구성과 작동 원리를 보여주고 있다. Fig. 4(b)는  $n=4$ 로 병렬화 된 NF-TENG와 VMC가 결합된 시스템의 최종 출력 전압을 나타내고 있다. 그래프에서 확인할 수 있듯이, 최대 1.35 kV의 고전압을 발생시킬 수 있으며, 이는 고전압 활용 분야에서 요구하는 성능을 충분히 충족할 수 있는 수준이다. 본 연구에서는 고전압을 필요로 하는 대표적인 기술의 한 가지 예시로, 대기압 조건에서의 micro-plasma 형성을 보여주고 있다. Plasma는 기체 원자 또는 분자에 인가되는 전압에 의해 전자가 분리되어 전기가 흐르며 빛을 발하는 상태로, 동일한 물질의 다른 상태(고체, 액체, 기체) 보다도 월등히 높은 에너지 밀도를 갖는 등의 특징으로 인해 반도체, 우주, 의료, 바이오, 광산업 등에 널리 이용되어지고 있다. 하지만 일반적으로 Plasma는 진공환경에서의 생성이 용이하기 때문에 그 응용과 활용에 있어 분명한 한계점이 존재하며, 이를 극복하기 위해 대기압 조건에서의 Plasma 생성에 대한 연구가 전세계적으로 활발하게 이루어지고 있다. 특히 Micro-plasma는 미세한 간격을 두고 떨어져 있는 두 도체 간에 인가된 전압차가 특정 수준 이상일 때 두 도체 사이에 존재하는 기체가 이온화 되면서 plasma가 발생하는 현상으로, 대기압 조건에서도 비교적 쉽게 plasma를 형성할 수 있고 바이오 및 의료 분야에서의 응용 가능성이 높은 것으로 알려져 있다. Fig. 4(c)는 본 연구에서 개발된 시스템을 이용하여 micro-plasma를 발생시키기 위한 setup이며, Fig. 4(d)는 상온, 상압 환경에서 발생하는 micro-plasma이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 자연풍의 효과적 수확을 위한 에너지 수확 장치의 최적화와 이를 이용해 고전압을 발생시키는 방법을 제안하였다. 정전발전 기반의 친환경 신재생 에너지 수확장치로써 Fluttering film이 포함된 Natural wind based Fluttering TENG (NF-TENG)를 개발하였으며, 단일 에너지 수확 장치의 설계적 요소에 따른 바람 에너지 기반 전기 생산 능력을 비교 분석하였다.  $11\text{ cm} \times 5.5\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ 의 크기를 갖는 단일 NF-TENG를 이용해 3~5 m/s의 풍속을 갖는 자연풍으로부터 최대 40 V의 전기를 생산하였다. 설계 최적화

를 통해 얻어진 단일 NF-TENG에 대하여 병렬화를 진행하여 출력 성능을 1차적으로 향상시켰으며,  $11\text{ cm} \times 11\text{ cm} \times 6\text{ cm}$  크기의 병렬 NF-TENG를 이용해 일상생활에서 빈번히 사용되는 전자기기를 구동하였으며, 상용 축전기를 짧은 시간동안 일반적인 전자기기가 요구하는 수준까지 충전하였다. 한단계 더 나아가서, 은 전류와 높은 전압을 생산할 수 있는 TENG 고유의 특성을 부각하기 위하여, 전압 증폭회로를 구성하여 NF-TENG에 적용함으로써 최대 1.3 kV의 고전압 전기를 생산하였다. 휴대형 에너지 수확장치를 이용해 자연 풍으로부터 생산된 고전압의 전기를 이용해 micro-plasma를 쉽게 발생시킬 수 있었으며, 본 연구 결과를 기반으로 정전발전 기술을 이용한 신재생 에너지 수확 기술은 향후 다양한 분야에서 적용할 수 있을 것으로 시사된다.

#### 감 사

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. NRF-2019R1C1C1005846, 2020R111A1A01073785).

#### References

- Singh, G. K., "Solar Power Generation by PV (photovoltaic) Technology: A Review," *Energy*, **53**, 1-13(2013).
- Selvakumar, N., Manikandanath, N., Biswas, A. and Barshilia, H. C., "Design and Fabrication of Highly Thermally Stable HfMoN/HfON/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Tandem Absorber for Solar Thermal Power Generation Applications," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **102**, 86-92(2012).
- He, W., Zhang, G., Zhang, X., Ji, J., Li, G. and Zhao, X., "Recent Development and Application of Thermoelectric Generator and Cooler," *Appl. Energy*, **143**, 1-25(2015).
- Gu, L., Liu, J., Cui, N., Xu, Q., Du, T., Zhang, L., Wang, Z., Long, C. and Qin, Y., "Enhancing the Current Density of a Piezoelectric Nanogenerator Using a Three-dimensional Intercalation Electrode," *Nat. Commun.*, **11**(1), 1-9(2020).
- Chen, G., Tang, L., Yang, Z., Tao, K. and Yu, Z., "An Electret-based Thermoacoustic-electrostatic Power Generator," *Int. J. Energy Res.*, **44**(3), 2298-2305(2020).

6. Fan, F.-R., Tian, Z.-Q. and Wang, Z. L., "Flexible Triboelectric Generator;" *Nano energy*, **1**(2), 328-334(2012).
7. Yun, Y., Jang, S., Cho, S., Lee, S. H., Hwang, H. J. and Choi, D., "Exo-shoe Triboelectric Nanogenerator: Toward High-performance Wearable Biomechanical Energy Harvester;" *Nano Energy*, **80**, 105525(2021).
8. Choi, S., Cho, S., Yun, Y., Jang, S., Choi, J. H., Ra, Y., La, M., Park, S. J. and Choi, D., "Development of a High-Performance Handheld Triboelectric Nanogenerator with a Lightweight Power Transmission Unit;" *Adv. Mater. Technol.*, **5**(4), 2000003(2020).
9. Wang, Y., Wang, J., Xiao, X., Wang, S., Kien, P.T., Dong, J., Mi, J., Pan, X., Wang, H. and Xu, M., "Multi-functional Wind Barrier Based on Triboelectric Nanogenerator for Power Generation, Self-powered Wind Speed Sensing and Highly Efficient Wind-shield;" *Nano Energy*, **73**, 104736(2020).
10. Chen, S., Gao, C., Tang, W., Zhu, H., Han, Y., Jiang, Q., Li, T., Cao, X. and Wang, Z., "Self-powered Cleaning of Air Pollution by Wind Driven Triboelectric Nanogenerator;" *Nano Energy*, **14**, 217-225(2015).
11. Yun, Y., La, M., Cho, S., Jang, S., Choi, J. H., Ra, Y., Kam, D., Park, S. J. and Choi, D., "High Quality Electret Based Triboelectric Nanogenerator for Boosted and Reliable Electrical Output Performance;" *Int. J. of Precis. Eng. Manuf.-Green Technol.*, **8**(1), 125-137(2021).
12. Leung, W. W. F. and Sun, Q., "Electrostatic Charged Nanofiber Filter for Filtering Airborne Novel Coronavirus (COVID-19) and Nano-aerosols;" *Sep. Purif. Technol.*, **250**, 116886(2020).
13. Shimizu, K., Fukunaga, H. and Blajan, M., "Biomedical Applications of Atmospheric Microplasma;" *Curr. Appl. Phys.*, **14**, S154-S161(2014).
14. Giacometti, J., Ferreira, G. L. and Gross, B., *A Summary of Corona Charging Methods*. in *6th International Symposium on Electrets (ISE 6)*, Proceedings. 1988. IEEE.

## Authors

**Sunmin Jang:** Ph.D. candidate, Department of mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi, 17104, Korea; jsm2962@khu.ac.kr

**Yoonsang Ra:** Ph.D. candidate, Department of mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi, 17104, Korea; fkdbst-kd8745@khu.ac.kr

**Sumin Cho:** Ph.D. candidate, Department of mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi, 17104, Korea; tnals1404@khu.ac.kr

**Dongik Kam:** M.S. course, Department of mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi, 17104, Korea; kamdi012@khu.ac.kr

**Dongjin Shin:** undergraduate student, Department of mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi, 17104, Korea; ehdwls4178@naver.com

**Heegyul Lee:** undergraduate student, Department of mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi, 17104, Korea; dokdo0502@naver.com

**Buhee Choi:** undergraduate student, Department of mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi, 17104, Korea; chlqngml123@naver.com

**Sae Hyuk Lee:** M.S. course, Department of mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi, 17104, Korea; lsh940515@khu.ac.kr

**Kyoung Je Cha:** Senior Researcher, KITECH, 320 Techno sunhwan-ro, Dalseong-gun, Daegu, 42994, Korea; kjcha@kitech.re.kr

**Kyoung Duck Seo:** Professor, Department of Mechanical Engineering, Wonkwang University, 460 Iksan-daero, Iksan-si, Jeollabuk-do, 54538, Korea; kdseo85@wku.ac.kr

**Hyung Woo Kim:** Professor, Department of Mechanical Design Engineering, Wonkwang University, 460 Iksan-daero, Iksan-si, Jeollabuk-do, 54538, Korea; kimhw1203@wku.ac.kr

**Dongwhi Choi:** Professor, Department of mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi, 17104, Korea; dongwhi.choi@khu.ac.kr