

마찰대전 나노발전기의 출력 및 안정성 향상을 위한 일렉트렛 개발

감동익*[‡], 장순민*[‡], 윤영철*[‡], 배홍은* · 이영진* · 리운상* · 조수민* · 서경덕** · 차경제***[†] · 최동휘*[†]

*경희대학교 기계공학과
 17104 경기도 용인시 덕영대로 1732
 **원광대학교 기계공학과
 54538 전북 익산시 익산대로 460
 ***한국생산기술연구원 스마트제조기술연구그룹
 42994 대구광역시 달성군 테크노순환로 320
 (2021년 9월 7일 접수, 2021년 10월 1일 채택)

Development of Electret to Improve Output and Stability of Triboelectric Nanogenerator

Dongik Kam*[‡], Sunmin Jang*[‡], Yeongcheol Yun*[‡], Hongeun Bae*, Youngjin Lee*, Yoonsang Ra*, Sumin Cho*,
 Kyoung Duck Seo**, Kyoung Je Cha***[†] and Dongwhi Choi*[†]

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

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

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

(Received 7 September 2021; Accepted 1 October 2021)

요 약

초소형, 웨어러블 기기 기술의 빠른 발전에 따라, 전자기기 구동을 위한 시공간적인 제한이 없는 지속적인 전기 공급을 필요로 한다. 이에 따라, 두 가지 다른 재료의 접촉과 분리로 만들어지는 정전기를 활용하는 마찰대전 나노발전기(Triboelectric nanogenerator, TENG)는 간단한 원리 덕분에, 복잡한 과정 및 설계 없이도 자연에서 버려지는 다양한 형태의 에너지를 효과적으로 수확하는 수단으로 활용되고 있다. 하지만, TENG의 실생활의 적용을 위해서는 전기적 출력의 증가가 필요하다. 또한, 전기적 출력의 증가뿐만 아니라 전기적 출력의 안정적인 발생은 TENG의 상용화를 위해서 해결해야 될 과제이다. 본 연구에서는 TENG의 출력을 향상시킬 뿐만 아니라, 향상된 출력을 안정적으로 나타낼 수 있는 방법을 제안하였다. 출력의 향상 및 안정성을 위해서 TENG 구성 요소 중 하나인 접촉층을 일렉트렛으로 사용하였다. 활용된 일렉트렛은 Fluorinated ethylene propylene (FEP) 필름에 코로나 차징과 열처리 과정을 순차적으로 진행함으로써 제작되었다. 코로나 차징으로 인해 인위적으로 주입된 전하가 열처리 과정에 의해서 깊은 트랩으로 들어가게 되어 전하의 이탈 현상이 최소화된 일렉트렛을 제작하고 이를 TENG 제작에 활용하였다. 제작된 일렉트렛의 출력 성능은 수직 접촉 분리 모드 TENG의 전압 출력을 측정함으로써 검증되었고, 코로나 차징 과정을 거친 일렉트렛은 어떠한 처리도 되지 않은 FEP 필름에 대비 12배 높은 출력 전압을 나타냈다. 일렉트렛의 시간 및 습도 안정성은 일반 외부 환경 및 극한의 습도 환경에 일렉트렛을 노출시킨 후, TENG의 출력 전압을 측정함으로써 확인되었다. 또한, 박수를 모티브로 한 Clap-TENG에 일렉트렛을 적용하여 LED를 작동시킴으로써 실생활에 적용할 수 있음을 보여주었다.

Abstract – With the rapid development of ultra-small and wearable device technology, continuous electricity supply without spatiotemporal limitations for driving electronic devices is required. Accordingly, Triboelectric nanogenerator (TENG), which utilizes static electricity generated by the contact and separation of two different materials, is being used as a means of effectively harvesting various types of energy dispersed without complex processes and designs due to its simple principle. However, to apply the TENG to real life, it is necessary to increase the electrical output. In addition, stable generation of electrical output, as well as increase in electrical output, is a task to be solved for the commercialization of TENG. In this study, we proposed a method to not only improve the output of TENG but also to stably represent the

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: dongwhi.choi@khu.ac.kr, kjcha@kitech.re.kr

[‡]D. K., S. J., and Y. Y. contributed equally to this work.

*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.

improved output. This was solved by using the contact layer, which is one of the components of TENG, as an electret for improved output and stability. The utilized electret was manufactured by sequentially performing corona charging-thermal annealing-corona charging on the Fluorinated ethylene propylene (FEP) film. Electric charges artificially injected due to corona charging enter a deep trap through the thermal annealing, so an electret that minimizes charge escape was fabricated and used in TENG. The output performance of the manufactured electret was verified by measuring the voltage output of the TENG in vertical contact separation mode, and the electret treated to the corona charging showed an output voltage 12 times higher than that of the pristine FEP film. The time and humidity stability of the electret was confirmed by measuring the output voltage of the TENG after exposing the electret to a general external environment and extreme humidity environment. In addition, it was shown that it can be applied to real-life by operating the LED by applying an electret to the clap-TENG with the motif of clap.

Key words: Electret, Triboelectric Nanogenerator, Stability, Fluorinated ethylene propylene

1. 서 론

초소형, 웨어러블 기기 기술의 빠른 발전은 IoT (Internet of Things) 기술이 우리의 삶에 한걸음 더 가까워지도록 하였다. IoT 기술의 발전 및 상용화에 따라, 전자기기 구동을 위한 시공간적인 제한이 없는 지속적인 전기 공급을 필요로 한다. 위에서 언급했던 요구사항들을 만족시키기 위해, 최근에는 태양광 발전기, 압전 나노 발전기, 열전 나노 발전기, 그리고 마찰대전 나노 발전기(Triboelectric nanogenerator, TENG) 같은 신재생 에너지 수확 기술들이 주목받고 있다[1-7]. 이러한 기술 중에서도, 두 가지 다른 재료의 접촉과 분리로 만들어지는 정전기를 활용하는 TENG는 자연에서 버려지는 다양한 형태의 에너지들을 효과적으로 수확하는 수단으로 활용되고 있다[8]. 또한 TENG는 비용효율이 높으며, 다양한 재료를 사용할 수 있다는 점, 그리고 제작하기 쉽다는 장점을 가진다.

서로 다른 물질 표면의 접촉은 물질간 일함수 차이에 의해 계면에 전하쌍을 만들어내며, 두 표면의 분리는 만들어진 전하쌍을 분리시킨다. 전하쌍이 분리되며, 각 표면에 서로 다른 알짜 전하가 만들어지는데, 이 현상을 마찰대전이라고 한다. 알짜 전하는 근처에 전기장을 만들며, 근처에 있는 전도체 내에 전하를 유도시키는데 이 현상을 정전기유도 현상이라고 한다. TENG는 두 표면에서 일어나는 마찰대전 현상과 전도체 내부의 정전기유도 현상에 의해서 구동된다[8]. 2012년에 처음으로 TENG가 제안된 후, 관련된 대부분의 연구들은 다른 에너지 수확기술들이 추구하던 것과 같이 출력을 높이는 것에 초점을 맞추어서 진행되고 있다. 기존의 TENG 출력을 높이는 방법은 접촉하는 두 표면의 마찰대전 현상을 향상시키는데 기반을 두고 있다. TENG의 출력이 두 표면의 접촉에 의존한다는 것을 감안할 때, 표면 구조는 출력 향상에 중요한 역할을 한다. 마찰대전에 의한 전하량을 높이는 방법에는 접촉 표면에 마이크로/나노 스케일의 표면 구조를 넣는 방법이 있다. 이는 국소 면압의 발생과 효율적인 접촉 면적으로 인해서 생성되는 알짜 전하의 양을 증가시키는 방법이다. 이미 많은 연구들에서 마이크로/나노 스케일의 표면 구조를 TENG에 도입하여 실험을 진행했고, 표면 구조의 도입이 효과적으로 출력을 향상시키는 방법이라는 것을 증명했다[9-13]. 하지만, 표면 구조의 도입에 따라 계면에서의 마찰이 증가하여 TENG를 구동할수록 표면이 더 빠르게 마모된다. 표면 구조의 마모로 인해 TENG의 출력 저하가 발생하고, 지속적이고 안정적인 출력에 문제가 된다. 따라서 표면 구조가 도입된 TENG는 표면 구조의 마모로 인해서 실생활 적용에 어려움이 있다.

앞서 언급되었던 마찰대전에 의한 전하량을 높여 TENG의 출력을 높이는 방법과는 달리, TENG의 또 다른 메커니즘인 정전기유도

현상에 의한 전하량을 높이는 방법이 있다. 유도 전하량을 높이는 가장 쉬운 방법은 TENG의 접촉층으로 사용되는 고분자에 인위적으로 많은 양의 전하를 주입하여 전기장을 강화하고, 그에 따라 유도되는 전하량을 증가시키는 방법이다. 이처럼 고분자에 인위적으로 많은 양의 전하를 주입한 것을 일렉트렛 (Electret)이라고 한다. 이전의 연구에서는 고압 주위의 공기가 이온화되어 전하를 고분자에 주입하는 방법을 통하여 인위적으로 전하를 삽입하는 기술인 코로나 차징(Corona charging)을 활용하여 제작된 일렉트렛을 TENG에 적용하여 출력을 향상시켰다[14-16]. 하지만 코로나 차징으로 제작된 일렉트렛을 활용한 TENG의 출력이 긴 시간 동안 유지되는 것을 확인한 바는 없다. 위의 방법으로 제작된 일렉트렛의 표면에 대부분의 전하가 존재하는데, 일렉트렛을 외부 환경에 직접 노출시켰을 때 습도에 의해서 표면의 전하를 오랜 기간 유지하기 어렵다[17]. 이러한 관점에서 TENG의 실용화를 위해서는 안정적인 출력성능을 필요로 하고, 이를 위해서 일렉트렛 표면 전하의 안정성과 관련된 문제를 해결해야 한다.

본 연구에서는 TENG의 구동원인인 정전기 유도현상에 영향을 미치는 전하의 양을 극대화하면서 인위적으로 주입된 전하의 이탈 현상이 최소화된 일렉트렛을 제작하고 이를 TENG 제작에 활용하였다. 일렉트렛은 순차적인 코로나 차징과 열처리(Thermal annealing) 과정을 통해 만들어지는데, 순차적인 코로나 차징과 열처리 과정의 반복은 고분자 표면에 형성된 전하를 고분자 내부의 더 깊은 트랩으로 밀어 넣음으로써 전하의 이탈을 방해하는 역할을 한다. 제작된 일렉트렛의 성능은 수직 접촉 분리 모드 TENG의 전압 출력을 측정함으로써 검증되었다. 일렉트렛의 시간 및 습도 안정성은 일반 외부 환경 및 극한의 습도 환경에 일렉트렛을 노출시킨 후, TENG의 출력 전압을 측정함으로써 확인되었다. 또한, 박수를 모티브로 한 Clap-TENG (C-TENG)에 일렉트렛을 적용하여 LED를 작동시킴으로써 실생활에 적용할 수 있음을 보여주었다.

2. 실험

2-1. 실험 장치 및 재료

일렉트렛의 재료 및 TENG의 접촉층으로는 Fluorinated ethylene propylene (FEP) 필름이 사용되었다. FEP의 구조는 탄소 사슬의 양쪽으로 전기음성도가 높은 플루오린이 존재하는데, 전기음성도가 높을수록 전자를 가지려는 경향이 강하기 때문에 코로나 차징 과정에서 많은 양의 음전하를 가지므로 사용되었다. 또한, TENG의 전극으로는 알루미늄 테이프가 사용되었다.

일렉트렛 제작 과정 중 코로나 차징을 위해서 고전압 파워 서플

라이(High voltage supplier)가 사용되었고, 열처리를 위해서 가열 교반기(Hot plate)가 사용되었다. 또한, 열처리 과정 중 전하의 이탈을 방지하기 위해서 Kapton 필름이 사용되었다.

TENG의 출력 평가를 위해서 가진기(Vibration generator)와 아크릴 챔버가 활용되었고, TENG의 전압 출력은 오실로스코프(Oscilloscope)로 측정되었다.

일렉트렛을 극한의 습도(Relative humidity, RH) 환경에 노출시키기 위해 챔버를 활용하였다.

2-2. 일렉트렛 제작 방법

일렉트렛의 재료로 사용된 FEP 필름과 열처리 과정에서 사용되는 Kapton 필름은 Acetone, DI water, IPA 순으로 세척되었고, 이후 60 °C의 오븐에서 건조되었다.

코로나 차징 시스템은 Fig. 1(a)와 같이 알루미늄 전극, 고전압 파워 서플라이와 핀을 이용하여 구성하였다. 먼저 알루미늄 전극을 접지하고, 접지한 알루미늄 전극 위에 FEP 필름을 올린다. 전체적으로 균일하게 음전하를 주입하기 위해 고전압 파워 서플라이에서 나온 핀 전극을 FEP 필름의 중심부에 맞춰 위치시킨다. 핀과 FEP 필름 사이의 거리가 너무 크면, 전기장의 세기가 약해서, 이온화된 음전하의 가속이 약하므로 전하가 일렉트렛에 제대로 주입되지 않으며, 거리가 너무 가까워도 일렉트렛에 음전하가 편향되게 주입되어, 고르게 분포되지 않는다. 따라서 핀과 FEP 필름 사이의 거리를 3 cm로 설정하였다. 고전압 전원을 -8 kV 이하로 가하여 실험하면, FEP 필름에 음전하가 주입되는 양이 충분하지 않아, 일렉트렛으로써의 역할을 수행하지 못한다. 이와 달리, -12 kV 이상으로 가하면 재료에 절연파괴가 발생한다. 따라서 절연파괴가 발생하지 않는 범위 내에서 최대 전압인 -11 kV를 고전압 파워 서플라이를 통해 가해주었다. 코로나 차징은 5분동안 진행되었다.

열처리 과정은 Fig. 1(b)와 같이 진행되었다. 가열 교반기 위에 Kapton 필름을 준비하고, 코로나 차징 처리된 FEP 필름을 Kapton 필름 위에 놓고 다시 그 위에 Kapton 필름을 위치시킨다. 가열 교반기를 230 °C로 가열한다. 가열 온도를 더 올리면 FEP의 녹는점(260 °C)에 근접하여 FEP 필름에 변형 및 주름이 생길 수 있으므로

230 °C로 가열하며 추가적으로 압력을 가한다. 이 과정 또한 5분동안 진행한다.

본 연구에서 사용되는 일렉트렛은 앞선 코로나 차징과 열처리 과정을 Fig. 1(c)와 같이, 코로나 차징 - 열처리 - 코로나 차징 순으로 진행하여 제작되었다.

2-3. 실험 방법

출력 전압을 확인하기 위해 수직 접촉 분리 모드 TENG를 Fig. 2(a)와 같이 제작하였다. 알루미늄 전극을 가진기 위(Electrode)와 시스템 상자(Acrylic chamber) 뒷면(Counter layer)에 부착한다. 가진기 위의 알루미늄 전극 위에 FEP 필름 또는 일렉트렛(Contact layer)을 위치시킨 뒤, 가진기로 수직 운동(Power = 0.1N 이하, Frequency = 10 Hz)을 발생시킨다. FEP 필름 또는 일렉트렛과 시스템 상자(Acrylic chamber)에 부착된 알루미늄 전극이 접촉 분리되며 출력이 발생하고, 오실로스코프에 두 알루미늄 전극을 연결하여 출력을 측정한다.

극한의 습도 환경을 조성하기 위해 Fig. 2(b)와 같이 시스템을 제작하였다. 챔버(Chamber) 내에 존재하는 Chamber floor 밑에 물을 충분히 넣어주어 습도를 높이고 이를 유지하기 위해 외부로부터 고립하였다. 일렉트렛을 최대한 Free Standing 상태로 만들기 위해 Chamber floor 위에 받침대를 두고 그 위에 위치시킨다. 습도를 측정하기 위해 챔버 내에 습도계를 넣어 습도를 측정하였고, 습도 99.9%를 유지하도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 일렉트렛을 활용한 TENG의 메커니즘

TENG의 주요한 작동원리는 서로 다른 두 물질을 마찰함으로써 각각 양전하와 음전하로 대전되는 마찰대전 현상과 두 물질의 상대적인 운동에 의해서 발생하는 전기적 힘에 의한 정전기 유도 현상이다. TENG는 두 재료의 상대적인 움직임과 구성요소의 형태에 따라 여러 가지 모드가 있는데, 그 중 수직 접촉 분리 모드는 가장 기본적으로 간단한 메커니즘을 가지고 있다. Fig. 3(a)는 기존의 수직 접촉 분리 모드 TENG의 메커니즘을 나타낸 그림이다. 상대충

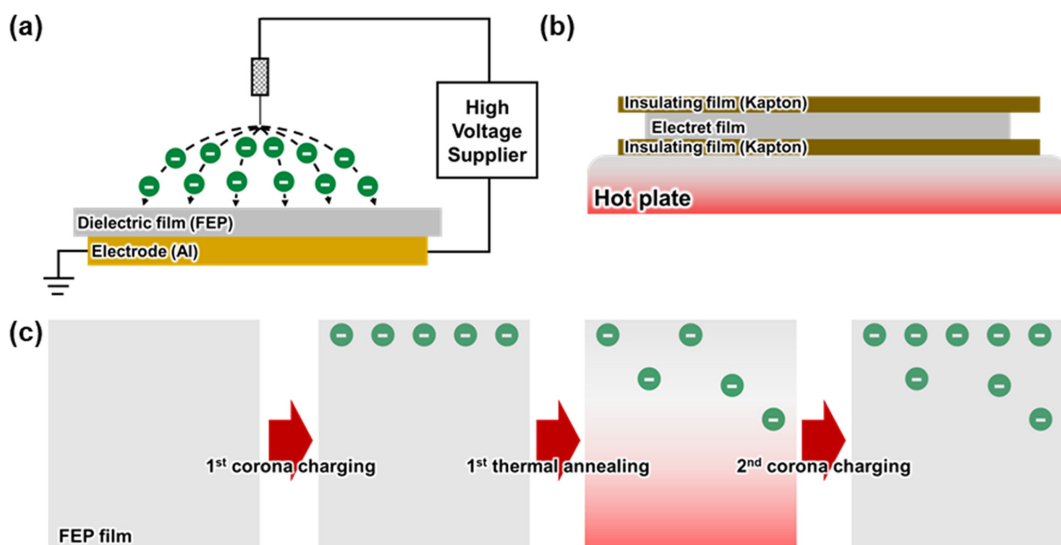


Fig. 1. Schematic diagram of electret fabrication. (a) Set up for corona charging. (b) Set up for thermal annealing. (c) Electret fabrication process sequence.

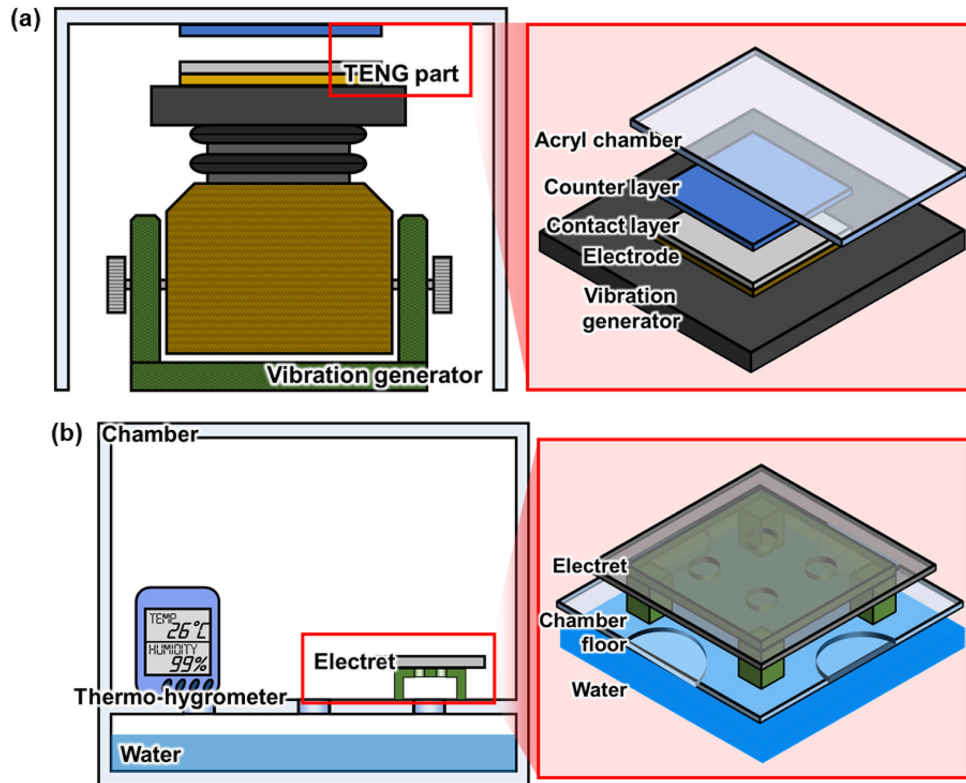


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup. (a) Measurement of output voltage of TENG in vertical contact separation mode. (b) Extreme humidity environment.

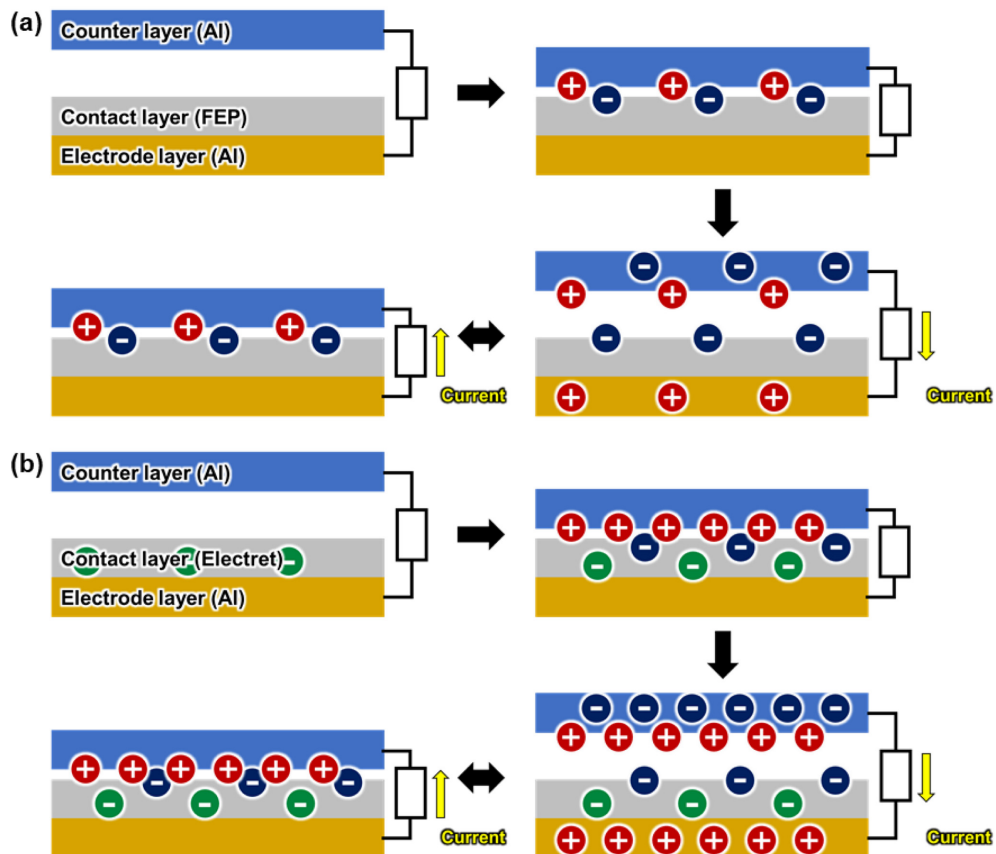


Fig. 3. Schematic of TENG operation mechanisms. (a) Mechanism of conventional vertical contact separation mode TENG. (b) Mechanism of TENG using electret.

(Counter Layer)과 접촉층(Contact Layer)을 접촉시키면, 마찰로 인한 마찰대전 현상으로 인해 상대층과 접촉층에 각각 양전하와 음전하가 생성된다. 접촉 후 상대층을 접촉층으로부터 멀리하면, 두 층의 상대적인 움직임으로 인해 두 층에 존재하는 양전하와 음전하 간의 전기적 중립이 깨지게 된다. 두 층의 양전하와 음전하는 전기적 중립을 유지하기 위해서 접촉층과 붙어있는 전극층(Electrode layer)으로부터 상대층으로 자유전자들이 이동하게 되고, 그 결과 자유전자의 흐름과 반대 방향으로 전류가 흐른다. 다시 떨어진 상대층을 접촉층에 가까이하면, 자유전자는 전과 반대로 유도되고, 전류 또한 반대로 흐르게 된다. 이와 같은 사이클을 반복하면 교류전류를 얻을 수 있다.

접촉층에 일렉트렛을 활용한다면, Fig. 3(b)와 같이 TENG는 구동한다. 일렉트렛 내 음전하의 영향으로 인해서 마찰 후 유도되는 자유전자의 양은 기존의 TENG에서 유도되는 자유전자의 양보다 크다. 따라서 기존의 TENG의 출력보다는 훨씬 높은 전압 및 전류의 출력을 얻을 수 있다.

3-2. TENG 출력 전압에 대한 일렉트렛의 영향

앞서 설명된 TENG 메커니즘에 대한 일렉트렛의 영향을 실험적으로 증명하기 위해서, 코로나 차징을 하지 않은 FEP 필름과 코로나 차징을 거친 FEP 필름을 TENG의 접촉층으로 사용하여 출력 전압을 비교하였다. Fig. 4(a)에서 확인할 수 있듯이, 코로나 차징 과정을 거치지 않은 FEP 필름에 비하여 코로나 차징을 거친 FEP 필름, 즉 일렉트렛을 사용한 TENG의 출력 전압이 약 12배 정도 높게 나타났다. 이는 앞서 설명된 바와 같이, 어떠한 처리도 되지 않은 FEP 필름을 사용한 TENG는 단순히 FEP 필름과 알루미늄 전극의 마찰 대전에 의한 전하만 생성되어 전기적 에너지가 출력되지만, 일렉트

렛을 사용한 TENG에서는 마찰대전에 의해 생성된 전하뿐만 아니라 코로나 차징에 의해서 인위적으로 주입된 전하 또한 전기적 에너지를 생성하는데 관여하기 때문이다. 즉, Fig. 4(a)에서 나타나는 출력 차이는 FEP 필름의 표면 및 내부에 있는 전하들에 의해 TENG에서 유도되는 전하량의 차이이다. 이는 FEP 필름이 가진 전하량이 많을수록 많은 양의 전하가 TENG에서 유도되고, 그에 따라 출력 전압이 결정되기 때문이다.

3-3. 일렉트렛의 시간습도 안정성 평가 및 실생활 적용 가능성

코로나 차징 과정에 의해서 제작된 일렉트렛은 TENG의 출력을 향상시킬 수 있지만, 시간 및 습도 안정성에 대해서 개선되어야 한다. 따라서, 어떠한 처리도 되지 않은 FEP 필름, 코로나 차징 과정만 거친 일렉트렛과 코로나 차징 - 열처리 - 코로나 차징을 거친 일렉트렛을 각각 TENG의 접촉층으로 사용하여, 출력을 비교하였다.

먼저, 일렉트렛의 시간 안정성과 관련하여 확인하였다. 접촉층으로 사용된 각각의 샘플들은 실험기간 동안 일반적인 실내 환경(RH = 25%)에서 보관되었고, 24일 동안 진행되었다. 실험 결과는 Fig. 4(b)와 같은데, 코로나 차징 과정만 거친 일렉트렛(Corona)과 코로나 차징 - 열처리 - 코로나 차징을 거친 일렉트렛(Annealing)은 초반 5일까지는 뚜렷한 출력 전압의 감소가 발생하였다. 또한, 두 경우 모두 제작 후 24시간이 지난 후에 가장 큰 출력 전압의 감소가 나타났는데, 이 현상에 대해서는 후에 설명할 것이다. 이후에는 출력 전압이 안정적으로 유지되었다.

Fig. 4(b)를 보면, 실험기간 동안 Annealing의 경우가 나머지 두 경우보다 가장 우수한 출력 전압을 나타낸 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 코로나 차징 과정 동안 FEP 필름에 주입된 전하들이 열처리 과정을 통해서 깊은 트랩으로 들어가게 됨으로써 전하의 이탈이

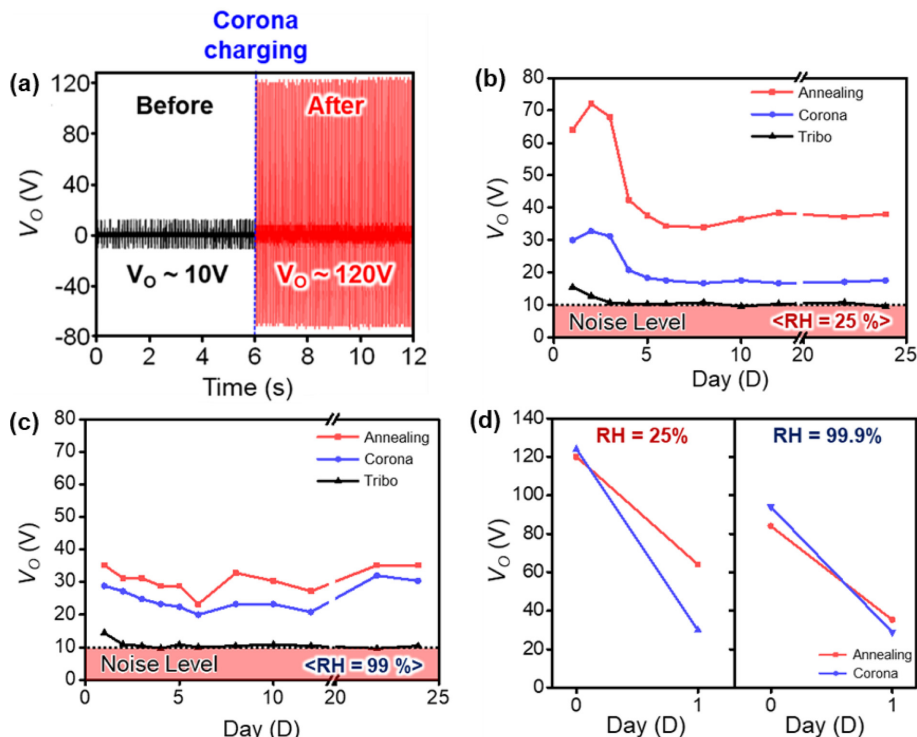


Fig. 4. Effect and stability of electret. (a) Effect of corona charging. (b) Reduced initial output voltage in evaluating time and humidity stability of electret. (c) Evaluation of the time stability of electret (RH = 25%). (d) Evaluation of the humidity stability of electret (RH = 99.9%).

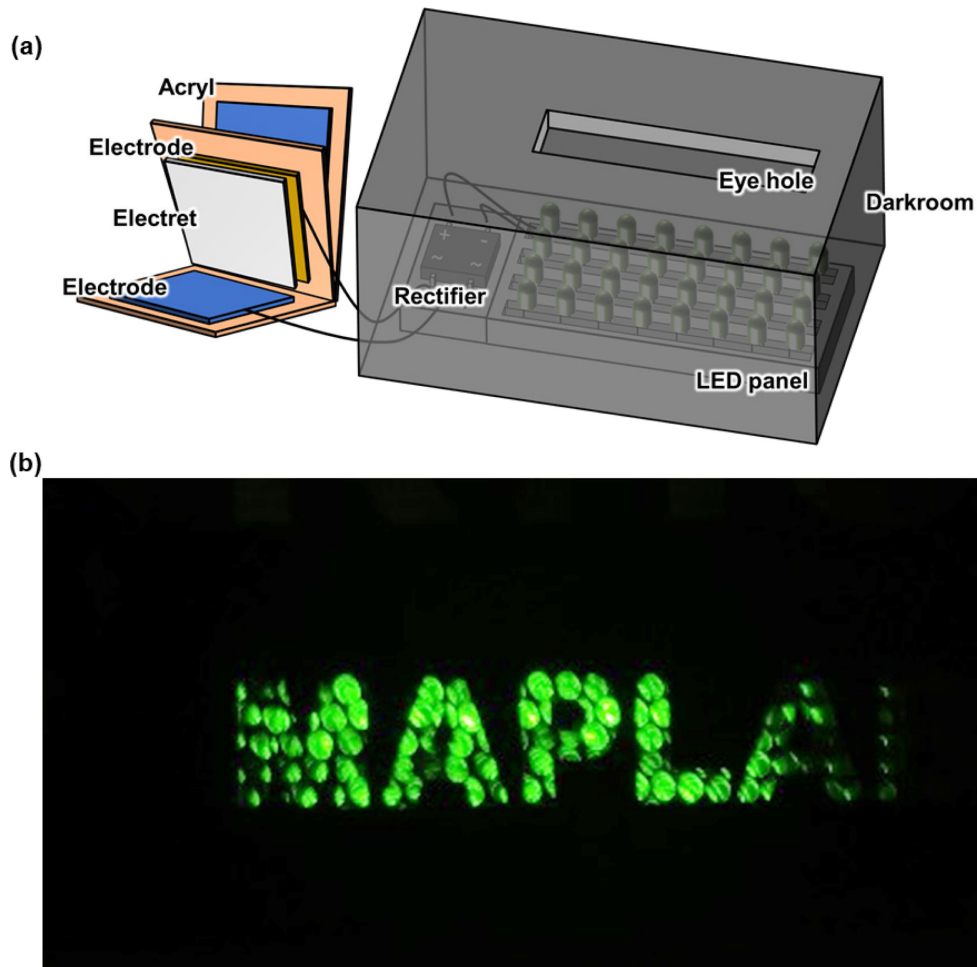


Fig. 5. Application of TENG using electret. (a) Schematic diagram of Clap-TENG, circuit and LED. (b) 150 LEDs powered by Clap-TENG.

잘 일어나지 않게 되기 때문이다.

일렉트렛의 시간 안정성뿐만 아니라 습도 안정성을 확인하기 위해서 샘플들을 실험기간 동안 극한의 습도 환경($RH = 99.9\%$)에 보관하면서 실험을 진행하였다. 실험 결과는 Fig. 4(c)와 같다. 앞선 실험과 유사하게, Corona와 Annealing의 경우 모두 하루 만에 급격한 출력 전압의 감소를 보였지만, 그 후에는 안정적인 출력 전압이 나타났다. 극한의 습도 환경에서도 Annealing의 경우가 전하의 이탈이 잘 일어나지 않아서, 가장 우수한 출력 전압이 나타난다. 또한, Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)를 비교했을 때, Annealing의 경우 $RH = 25\%$ 인 환경과 $RH = 99.9\%$ 인 환경에서의 출력이 큰 차이가 나지 않는데, 이는 습한 환경이 일렉트렛에 주입된 전하의 이탈에 큰 영향을 주지 않는다고 할 수 있다.

Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)에서 생략된 Corona와 Annealing의 일렉트렛 제작 후 24시간 후의 출력 전압 감소는 Fig. 4(d)와 같다. 일렉트렛 제작 직후 측정된 TENG의 출력이 높은 현상은 코로나 차징 과정 직후 FEP 필름에 주입되지 않고, 표면에 머무는 전하들이 전하유도현상을 증폭시킴으로써 나타나는 현상이다. 하지만 이 전하들은 시간이 지남에 따라 표면에서 이탈하게 되고, 그 결과 전하유도현상이 상대적으로 감소하게 됨으로써 TENG의 출력이 현저히 감소하게 된다.

Fig. 5(a)와 같이 박수를 모티브로 한 Clap-TENG (C-TENG)에 일렉트렛을 활용하여 실생활에서의 적용 가능성 확인하였다. 동일한 디자인의 C-TENG에 순수 FEP 필름을 활용한 경우에는 약 20개의 다이오드가 작동하지만, 일렉트렛을 사용한 C-TENG의 경우에는 Fig. 5(b)와 같이 약 150개의 다이오드가 작동되었다.

안정적으로 TENG의 출력을 향상시킬 수 있는 일렉트렛을 활용한다면, 약한 힘에 의한 에너지를 수확하는데 큰 기여를 할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 TENG의 출력을 향상시킬 뿐만 아니라, 향상된 출력을 안정적으로 나타낼 수 있는 방법을 제안하였다. TENG의 주요 메커니즘 중 하나인 정전기 유도 현상을 극대화하는 전략을 채택하였고, 출력의 향상 및 안정성을 위한 일렉트렛을 제작하는 공정을 개발하였다. TENG의 출력을 향상시키기 위해서 FEP 필름에 코로나 차징 과정을 활용하여 일렉트렛을 만들었고, 열처리 과정과 코로나 차징을 순차적으로 진행함으로써 안정적인 출력을 유지할 수 있도록 일렉트렛을 제작하였다. 코로나 차징으로 인해 인위적으로 주입된 전하가 열처리 과정에 의해서 깊은 트랩으로 들어

가게 되어 전하의 이탈 현상이 최소화된 일렉트렛을 제작하고 이를 TENG 제작에 활용하였다. 제작된 일렉트렛의 출력 성능은 수직 접촉 분리 모드 TENG의 전압 출력을 측정함으로써 검증되었고, 코로나 충전 과정을 거친 일렉트렛은 어떠한 처리도 되지 않은 FEP 필름에 대비 12배 높은 출력 전압을 나타냈다. 일렉트렛의 시간 및 습도 안정성은 일반 외부 환경 및 극한의 습도 환경에 일렉트렛을 노출시킨 후, TENG의 출력 전압을 측정함으로써 확인되었고 본 연구에서 제안한 공정에 의해서 제작된 일렉트렛이 가장 우수한 안정성을 나타내었다. 또한, 박수를 모티브로 한 C-TENG에 일렉트렛을 적용하여 LED를 작동시킴으로써 실생활에 적용할 수 있음을 보여주었고, 본 연구 결과는 에너지를 수확할 수 있는 다양한 에너지원 중에서 약한 힘과 관련된 에너지를 수확하는데 활용될 수 있음을 시사한다.

감 사

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “지역특화 산업육성사업”(과제번호 S2913296)으로 수행된 연구결과입니다.

References

- Lee, D.-Y., Kim, H., Li, H.-M., Jang, A.-R., Lim, Y.-D., Cha, S. N., Park, Y. J., Kang, D. J. and Yoo, W. J., “Hybrid Energy Harvester Based on Nanopillar Solar Cells and PVDF Nanogenerator,” *Nanotechnology*, **24**, 175402(2013).
- Wu, H., Tang, L., Yang, Y. and Soh, C. K., “A Novel Two-degrees-of-freedom Piezoelectric Energy Harvester,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **24**, 357-368(2013).
- Choi, D., Yoo, D. and Kim, D. S., “One-step Fabrication of Transparent and Flexible Nanotopographical-triboelectric Nanogenerators via Thermal Nanoimprinting of Thermoplastic Fluoropolymers,” *Adv. Mater.*, **27**, 7386-7394(2015).
- Wang, Z. L., “Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology and Self-powered Sensors-principles, Problems and Perspectives,” *Faraday Discuss.*, **176**, 447-458(2015).
- Pietrzyk, K., Soares, J., Ohara, B. and Lee, H., “Power Generation Modeling for a Wearable Thermoelectric Energy Harvester with Practical Limitations,” *Appl. Energy*, **183**, 218-228(2016).
- Proto, A., Penhaker, M., Conforto, S. and Schmid, M., “Nanogenerators for Human Body Energy Harvesting,” *Trends Biotechnol.*, **35**, 610-624(2017).
- Yoo, D., Park, S.-C., Lee, S., Sim, J.-Y., Song, I., Choi, D., Lim, H. and Kim, D. S., “Biomimetic Anti-reflective Triboelectric Nanogenerator for Concurrent Harvesting of Solar and Raindrop Energies,” *Nano Energy*, **57**, 424-431(2019).
- Fan, F.-R., Tian, Z.-Q. and Wang, Z. L., “Flexible Triboelectric Generator,” *Nano energy*, **1**, 328-334(2012).
- Lee, K. Y., Chun, J., Lee, J. H., Kim, K. N., Kang, N. R., Kim, J. Y., Kim, M. H., Shin, K. S., Gupta, M. K. and Baik, J. M., “Hydrophobic Sponge Structure-based Triboelectric Nanogenerator,” *Adv. Mater.*, **26**, 5037-5042(2014).
- Lin, L., Xie, Y., Niu, S., Wang, S., Yang, P.-K. and Wang, Z. L., “Robust Triboelectric Nanogenerator Based on Rolling Electrification and Electrostatic Induction at An Instantaneous Energy Conversion Efficiency of ~ 55%,” *ACS Nano*, **9**, 922-930(2015).
- Park, J. H., Park, K. J., Jiang, T., Sun, Q., Huh, J.-H., Wang, Z. L., Lee, S. and Cho, J. H., “Light-transformable And-healable Triboelectric Nanogenerators,” *Nano energy*, **38**, 412-418(2017).
- La, M., Choi, J. H., Choi, J.-Y., Hwang, T. Y., Kang, J. and Choi, D., “Development of the Triboelectric Nanogenerator Using a Metal-to-metal Imprinting Process for Improved Electrical Output,” *Micromachines*, **9**, 551(2018).
- Bui, V. T., Zhou, Q., Kim, J. N., Oh, J. H., Han, K. W., Choi, H. S., Kim, S. W. and Oh, I. K., “Treefrog Toe Pad-inspired Micro-patterning for High-power Triboelectric Nanogenerator,” *Adv. Funct. Mater.*, **29**, 1901638(2019).
- Stark, W., “Electret Formation by Electrical Discharge in Air,” *J. Electrostat.*, **22**, 329-339(1989).
- Tsai, P. P., Schreuder-Gibson, H. and Gibson, P., “Different Electrostatic Methods for Making Electret Filters,” *J. Electrostat.*, **54**, 333-341(2002).
- Zhou, T., Zhang, L., Xue, F., Tang, W., Zhang, C. and Wang, Z. L., “Multilayered Electret Films Based Triboelectric Nanogenerator,” *Nano Res.*, **9**, 1442-1451(2016).
- Jian, J. and Zhongfu, X., *Influence of Environment Humidity on Properties of FEP, PTFE, PCTFE and PI Film Electrets*. in *Proceedings of 8th International Symposium on Electrets (ISE 8)*. 1994. IEEE.

Authors

Dongik Kam: Master’s course, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; kamdi012@khu.ac.kr

Sunmin Jang: Ph.d candidate, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; jsm2962@khu.ac.kr

Yeongcheol Yun: Master’s degree, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; etm024@khu.ac.kr

Hongun Bae: Bachelor’s degree, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; 2016100734@khu.ac.kr

Youngjin Lee: Bachelor’s degree, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; zerojin@khu.ac.kr

Yoonsang Ra: Ph.d candidate, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; fkdbskd8745@khu.ac.kr

Sumin Cho: Ph.d candidate, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea; tnals1404@khu.ac.kr

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

Kyoung Je Cha: Senior Researcher, Smart Manufacturing Technology R&D Group, KITECH, Daegu, 42994, Korea; kjcha@kitech.re.kr

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