

전하 분리와 축적을 통한 물의 슬로싱 현상 기반 전기에너지 발생 장치

차경환, 허덕재, 이상민 

중앙대학교 기계공학부

Water-Sloshing-Based Electricity Generating Device via Charge Separation and Accumulation

Kyunghwan Cha, Deokjae Heo, and Sangmin Lee

School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 06974, Korea

(Received September 24, 2021; Revised October 1, 2021; Accepted October 1, 2021)

Abstract: Liquid-based Triboelectric nanogenerator (L-TENG) is one of the alternatives to solid-based Triboelectric nanogenerator (S-TENG) because of the absence of surface damage which can decrease the durability of the generator. However, the L-TENG also has an obvious drawback of significantly lower output than that of S-TENG. This article produces water-sloshing-based electricity generating device (W-ED) with a new design of L-TENG that improves electrical output in portable form. The dual-electrode system, consisting of closed-loop circuit and inner electrode which enables water to contact directly in the bottle, can generate the open-circuit voltage and the short-circuit current of up to 348 V and 5.1 mA, respectively. By investigating the motion of water for each frequency, we propose that W-ED is suitable device for a variety of human motions. We expect that W-ED can be applied in small electrical devices or sensors in daily-use items.

Keywords: Energy harvesting, Triboelectric nanogenerator, Mechanical energy, Portable device

지난 몇 년간 기존 에너지원들의 환경오염 및 유한성 등의 문제가 대두되면서, 대체 에너지원에 대한 수요 역시 증가하고 있다. 이런 측면에서 열에너지, 태양에너지 등과 더불어 기계적 에너지는 일상 속에서 주로 버려지고 있어 이들을 사용 가능한 에너지로 변환하기 위한 하베스팅 연구들이 진행되고 있다 [1-3]. 마찰대전을 활용한 정전소자 (triboelectric nanogenerator, TENG)들은 이 중 기계적 에너지를 효과적으로 수확하는데, 이를 활용한 작은 전원 용량의 IoT (internet of things) 장비 또는 센서들의 전원

공급원의 사용도 보여주고 있다 [4-7]. 하지만 정전소자의 접촉과 분리라는 기본 메커니즘은 부득이하게 소자의 마모를 일으키고, 이는 장치 본연의 내구성과 전기 발전 신뢰성 두 측면 모두에서도 부정적인 영향을 가져온다 [8]. 이러한 단점을 극복하고자 액체 기반의 정전소자(liquid-based triboelectric nanogenerator, L-TENG)가 제시되었고, 고체기반의 정전소자에 비교하여 재료의 마모는 크게 감소시킬 수 있었지만 출력 역시 현저히 떨어지는 문제점을 보였다. L-TENG의 실제 활용을 위해서는 높은 수준의 출력 향상과 휴대성 확보가 필요하다. 특히 액체가 직접적으로 전도성 물질에 닿는 설계를 통해 출력은 나노 와트 대역에서 마이크로 와트 대역까지 크게 증가하였고 [9-11], freestanding-type의 정전소자는 외부의 접지 (grounding)가 필요없이, 기기 자체로 폐회로(closed-

✉ Sangmin Lee; slee98@cau.ac.kr

Copyright ©2022 KIEEME. All rights reserved.
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.

loop circuit)를 구성하여 휴대 가능한 에너지 하베스팅 장비를 제작할 가능성을 보여주었다 [12]. 본 연구에서는 다양한 물의 거동에 따른 각각의 출력 메커니즘을 확보함으로써, 다양한 물의 움직임에서 에너지를 수확할 수 있는 간단한 설계를 확보하였다. 또한 freestanding-type의 정전소자를 기반으로 한 폐회로 설계로 휴대성을 확보하고, 물의 sloshing 현상에서 일어나는 전하 분리(charge separation)과 축적(accumulation)을 활용하는 water-sloshing-based electricity generation device (W-ED)를 소개한다.

그림 1은 W-ED의 디자인을 그림으로 표현한 것이다. W-ED는 PFA 용기, DI water, 그리고 2개의 전극으로 구성되어 있다. PFA는 음의 표면전하(negative surface charge)를 가지고 있어 강한 전기장을 생성하고, 이 전기장은 물의 자가 이온화(self-ionization)에 의해 발생한 이온에 영향을 끼친다. 또한 물의 이온농도가 증가하면 표면 전하가 차단되어 전기적 출력은 급감하기 때문에 DI water (KCW-PW3, 3차 증류수, 코리아클린업캡)가 사용되었으며 [9], 중앙부에 위치한 내부전극은 병 외부의 전극과 연결되어 freestanding-type의 TENG로 접지가 필요 없이 휴대가 가능한 폐회로를 구성한다. 기계적 진동이 vibration tester (ET-126B-4, Labworks Co.), amplifier (pa-151, Labworks Co.), 그리고 function generator (AFG3021C, Tektronix Co.)를 사용하여 6 hz의 진동수와 9 mm의 진폭으로 수직방향으로 가해질 때 open-circuit voltage (V_{oc})와, short-circuit current (I_{sc})의 그래프는 그림 2

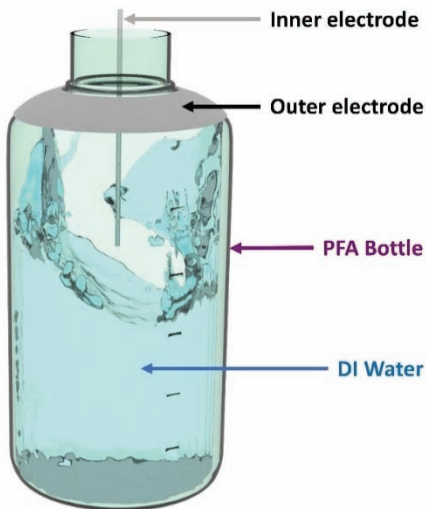


Fig. 1. Schematic illustration of water-sloshing-based electricity generation device based on freestanding triboelectric nanogenerator.

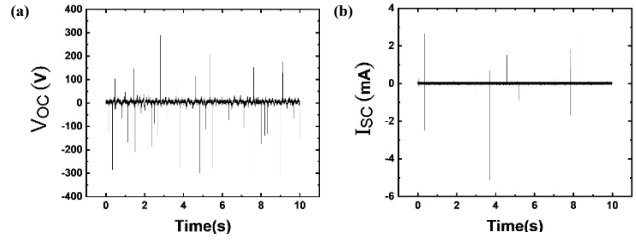


Fig. 2. (a) Open-circuit voltage and (b) short-circuit current of W-ED.

의 (a)와 (b)에서 볼 수 있다. V_{oc} 를 측정하기 위해서 내, 외부 전극을 각각 oscilloscope (MDO 3014, Tektronix Co.)의 1, 2번에 연결하였고, I_{sc} 측정 시에는 current probe (TCP0030A, Tektronix Co.)가 사용되었으며, 이때 peak 형태의 V_{oc} 와 I_{sc} 는 최대 348 V, 5.1 mA로 관찰되었다. W-ED의 출력의 파형은 날카로운 피크 형태의 출력으로 발생한다. 특히 소형 전기장치나 센서 등에 꾸준한 전력을 공급하기 위해선 RMS (root-mean-square) 값이 중요한 출력의 지표이며, V_{RMS} , I_{RMS} 를 구하기 위한 식은 아래와 같다.

$$V_{RMS} = \sqrt{\int \frac{V(t)^2}{T} dt}, \quad I_{RMS} = \sqrt{\int \frac{I(t)^2}{T} dt} \quad (1)$$

이 식에서 $V(t)$ 와 $I(t)$ 는 측정된 피크 전압, 전류를, T 는 측정 시간을 의미하며, 그림 2를 다음과 같이 변환한 V_{RMS} 와 I_{RMS} 는 각각 14.37 V, 19.70 μ A의 출력을 생성한다는 것을 보여준다.

그림 3은 W-ED의 메커니즘을 도식화한 것이다. 용기에 기계적 수직 에너지가 주어질 경우 내부 액체(DI water)가 PFA 벽면을 타고 올라가고 이는 종종 '슬로싱 모션(sloshing motion)'이라 불리는 형태로 움직이게 된다 [13,14]. 이 모션 움직임 동안, 물의 자가 이온화로 인해 양전하(H^+/H_3O^+)와 음전하(OH^-)로 전하가 분리되고 축적되게 된다 [15]. 이후 축적된 전하들이 용기 가운데에 위치한 내부전극에 닿으면, 전기가 발생한다. 이 과정은 물의 거동에 따라 다른 메커니즘을 갖게 되는데, 가진기를 통해 생성된 6 Hz의 수직 진동으로 발생하는 거동은 매우 불규칙하고 복잡하지만 크게 wave motion, wall impact, droplet separation으로 3가지 유형으로 분리할 수 있다 [9]. 그림 3(a)는 wave motion으로 전기가 생성되는 과정을 보여준다. 물이 용기 벽면과 부딪히면서 PFA의 표면전하로 인해 벽면 부근의 물은 양전하가 축적된다. 이로 인해 벽면에서 떨어진 중심부의 물은 음전하가 축적되고, 이

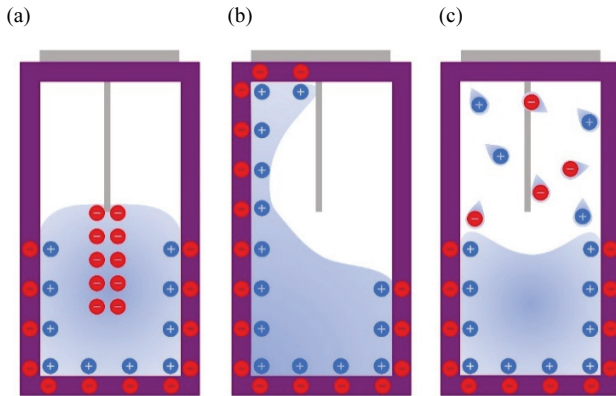


Fig. 3. Working mechanism of W-ED depending on movement of water. (a) The wave motion, (b) wall impact motion, and (c) droplet separation motion.

중심부의 물이 상승해 내부전극과 닿게 되면 음의 출력 값이 발생한다. 그림 3(b)는 wall impact에서의 전기 생성 메커니즘을 표현한 것이다. 물이 용기의 벽면과 충돌하여 이동할 때, 인근의 물은 양전하가 유도되고 stern layer와 diffuse layer로 구성된 전기 이중층(electrical double layer)을 형성한다 [16,17]. Stern layer는 물의 양이온이 용기의 음이온에 부착되는 부동 영역이며, 물이 PFA 표면에서 미끄러져도 이 층은 변하지 않는다. 바로 옆에 존재하는 diffuse layer에서는 양이온과 음이온이 자유롭게 이동할 수 있는 층이며, PFA의 음의 표면전하가 완전히 차단되는 Debye length에 도달할 때까지 이온은 끌어당겨지게 된다. 물이 PFA 용기에 충돌하고 이동하게 되면서 물의 양전하가 지속적으로 벽면 근처에 유도되고 축적된다. 이렇게 축적된 양전하가 내부전극에 접촉하면 높은 양의 전기적 출력이 발생한다. 그림 3(c)는 droplet separation으로 인한 전기생성 메커니즘을 표현한 것이다. 용기의 진동, 물의 벽면 충돌 과정에서, 물방울은 표면으로부터 분리될 수 있는데, 이때 물방울들은 poisson 모델에 따라 무작위로 양전하 또는 음전하를 갖는다 [18]. 이 전하를 갖게 된 물방울들이 내부전극과 직접적으로 접촉하며 양 또는 음의 피크출력을 생성한다. W-ED에서는 wall impact와 droplet separation으로 전기가 생성될 때 wave motion으로 생성될 때, 보다 큰 출력을 발생함을 확인하였다. 특히 이 장치는 벽과의 충돌과 분리되는 물방울들이 잦았기 때문에, 그림 2에서 보여준 높은 출력들은 주로 이 두 모션으로 인한 결과라고 볼 수 있다.

그림 4(a)는 실제 제작된 W-ED의 사진을 보여준다. 앞에서 언급한 바와 같이 강한 음의 표면전하를 가진 PFA 용기(a body diameter, body height, neck diameter, and

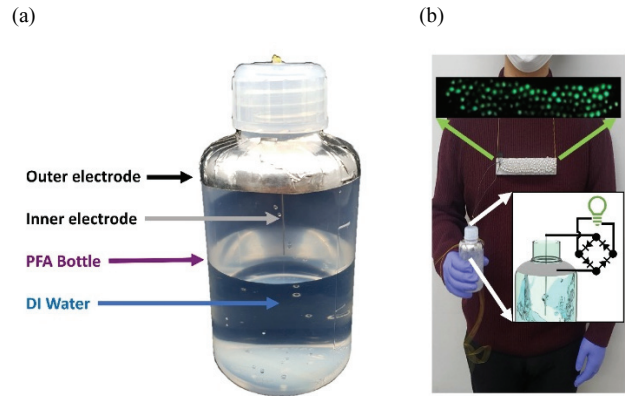


Fig. 4. (a) The photograph of W-ED and component and (b) the photograph of 100 LEDs powered by W-ED and circuit schematic.

neck height of 6, 10, 2.5, and 2.5 cm, AS ONE Co.)가 사용되었으며, 뚜껑의 중심부는 전선이 들어갈 수 있게끔 뚫은 뒤, parafilm (PM-996, Bemis Company Inc.)을 통해 밀봉하였다. DI water의 경우, 양이 적을 경우 물이 움직일 공간이 부족하여 전하 분리 현상을 유도하는데 불리하고 반대로 물의 부피가 적을 경우 축적된 이온들의 총량이 줄어들기 때문에 병 용량의 절반인 150 ml가 사용되었다 [9]. 병목의 중심부를 관통하는 내부 전극으로는 PVC (polyvinyl chloride)로 코팅된 전선(22 AWG, WISHER Co.) 중 용기의 내부에 들어가는 부분은 피복되어 이온화된 물들이 직접적으로 전극에 닿을 수 있도록 설계하였으며, 정지된 상태의 물의 표면에서 1 mm 떨어진 곳에 피복된 내부전극이 시작되어 병 목의 1 mm 아래에서 피복이 끝나게끔 위치되었다. 외부 전극의 경우 2 cm 길이의 알루미늄 테이프(thickness of 0.05 mm, DUCKSUNG Co.)가 사용되었으며, 수직으로 진동하는 물의 기계적 에너지를 충분히 흡수하기에 유리하게끔 하고, 물로 인해 표면전하가 스크리닝(screening) 되는 외부 전극 표면을 줄이기 위해, 용기의 목을 제외한 최상단부에 위치하게끔 부착되었다.

W-ED는 일상생활에서 다양한 활용이 가능하다. 그림 4(b)는 LED가 부착된 형태의 사용을 보여주는 사진이다. 텀블러 내부의 빨대에 내부전극을 설치하고, 걸는 등의 W-ED에 기계적 에너지를 줄 수 있는 움직임이 있다면 물이 전극에 닿을 때 100개의 LED가 점등이 된다. 폐쇄 회로를 구성하여 별다른 접지가 필요 없어 손으로 잡거나, 가방에 넣거나, 자전거에 부착하는 등, 다양한 일상 속 환경에서 에너지를 수확할 수 있다. 이를 통해 야간 휴대용 안전 램프로 사용될 수 있으며, 이 외에도 캐패시터 충전 회로를 구성하여 소형전자제품이나 센서 등을 위한 보조전력원으로

로 활용 가능하다.

결론적으로 본 연구는 물의 움직임을 통해 높은 전기 출력을 생성할 수 있는 W-ED를 개발하였다. 장치는 PFA 용기와 물 그리고 두 개의 전극으로 구성된 단순한 디자인을 가지고 있으며, PFA 벽면에 닿은 물이 전극과 부딪히거나, 물방울이 튀면서 전하가 분리되고 축적된다. 이러한 물이 용기 중심부의 내부전극과 직접적으로 닿으면 높은 전기적 출력이 발생한다. 다양한 물의 움직임에서도 전기적 에너지를 수확할 수 있었고, 특히 freestanding TENG로 폐회로를 구성하면서 휴대용 사용이 가능하게 디자인되었다. 이 W-ED는 안전램프, 소형전자제품, 센서 등 일상 속 다양한 제품의 보조 전원장치로 사용될 수 있다.

ORCID

Sangmin Lee

<https://orcid.org/0000-0002-6713-4797>

감사의 글

본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINC+) 육성사업의 연구 결과입니다.

REFERENCES

- [1] C. A. Howells, *Energy Convers. Manage.*, **50**, 1847 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.02.020>]
- [2] S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. White, *Meas. Sci. Technol.*, **17**, R175 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/12/R01>]
- [3] C. R. Saha, T. O'Donnell, N. Wang, and P. McCloskey, *Sens. Actuators, A*, **147**, 248 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.03.008>]
- [4] 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>]
- [5] Y. Su, G. Xie, S. Wang, H. Tai, Q. Zhang, H. Du, H. Zhang, X. Du, and Y. Jiang, *Sens. Actuators, B*, **251**, 144 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.04.039>]
- [6] S. Wang, L. Lin, and Z. L. Wang, *Nano Energy*, **11**, 436 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.10.034>]
- [7] 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>]
- [8] S. H. Chung, J. Chung, M. Song, S. Kim, D. Shin, Z. H. Lin, B. Koo, D. Kim, J. Hong, and S. Lee, *Adv. Energy Mater.*, **11**, 2100936 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.202100936>]
- [9] J. Chung, D. Heo, G. Shin, S. H. Chung, J. Hong, and S. Lee, *Nano Energy*, **82**, 105687 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105687>]
- [10] W. Xu, H. Zheng, Y. Liu, X. Zhou, C. Zhang, Y. Song, X. Deng, M. Leung, Z. Yang, R. X. Xu, Z. L. Wang, X. C. Zeng, and Z. Wang, *Nature*, **578**, 392 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-1985-6>]
- [11] N. Zhang, H. Gu, H. Zheng, S. Ye, L. Kang, C. Huang, K. Lu, W. Xu, Q. Miao, Z. Wang, J. Zhang, and X. Zhou, *Nano Energy*, **73**, 104748 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104748>]
- [12] S. Wang, Y. Xie, S. Niu, L. Lin, and Z. L. Wang, *Adv. Mater.*, **26**, 2818 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201305303>]
- [13] H. Hashimoto and S. Sudo, *Exp. Therm Fluid Sci.*, **1**, 159 (1988). [DOI: [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(88\)90033-7](https://doi.org/10.1016/0894-1777(88)90033-7)]
- [14] R. A. Ibrahim, V. N. Pilipchuk, and T. Ikeda, *Appl. Mech. Rev.*, **54**, 133 (2001). [DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3097293>]
- [15] K. S. Pitzer, *J. Phys. Chem.*, **86**, 4704 (1982). [DOI: <https://doi.org/10.1021/j100221a013>]
- [16] D. L. Chapman, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, **25**, 475 (1913). [DOI: <https://doi.org/10.1080/14786440408634187>]
- [17] C. Hughes, L. H. Yeh, and S. Qian, *J. Phys. Chem. C*, **117**, 9322 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1021/jp402018u>]
- [18] F. Wiederschein, E. Vöhringer-Martinez, A. Beinsen, F. Postberg, J. Schmidt, R. Srama, F. Stolz, H. Grubmüller, and B. Abel, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **17**, 6858 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C4CP05618C>]