

고효율 회전형 정전 나노 발전기의 기구학적 설계

이지현¹, 나성민¹, 최덕현^{1,2,3} 

¹ 성균관대학교 기계공학부

² 성균관대학교 미래에너지공학과

³ 성균관대학교 성균에너지과학기술원

Kinematic Design of High-Efficient Rotational Triboelectric Nanogenerator

Jihyun Lee¹, Seongmin Na¹, and Dukhyun Choi^{1,2,3}

¹ School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

² Department of Future Energy Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

³ SKKU Institute of Energy Science and Technology (SIEST), Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received October 4, 2023; Revised October 19, 2023; Accepted October 20, 2023)

Abstract: A triboelectric nanogenerator is a promising energy harvester operated by the combined mechanism of electrostatic induction and contact electrification. It has attracting attention as eco-friendly and sustainable energy generators by harvesting wasting mechanical energies. However, the power generated in the natural environment is accompanied by low frequencies, so that the output power under such input conditions is normally insufficient amount for a variety of industrial applications. In this study, we introduce a non-contact rotational triboelectric nanogenerator using pedaling and gear systems (called by P-TENG), which has a mechanism that produces high power by using rack gear and pinion gear when a large force by a pedal is given. We design the system can rotate the shaft to which the rotor is connected through the conversion of vertical motion to rotational motion between the rack gear and the pinion gear. Furthermore, the system controls the one directional rotation due to the engagement rotation of the two pinion gears and the one-way needle roller bearing. The TENG with a 2 mm gap between the rotor and the stator produces about the power of 200 μW and turns on 82 LEDs under the condition of 800 rpm. We expect that P-TENG can be used in a variety of applications such as operating portable electronics or sterilizing contaminated water.

Keywords: Triboelectric nanogenerator, Rotation, High-efficient, Kinematic, Gear, Pedal

우리나라는 세계 8위의 에너지 소비국이나 에너지 소비량의 약 94.8%를 수입에 의존하는 에너지 빈곤국이다 [1]. 에너지 공급에 대한 중요성이 높아지고, 그중 에너지 하베스팅은 탄소 중립을 요구하는 현대사회에서 주목받고 있

는 주제이다. 에너지 하베스팅을 이용한다면 친환경적인 에너지 공급이 가능하다. 정전 발전(triboelectric nanogenerator, TENG)은 정전기 유도과 접촉대전인 결합 메커니즘으로 작동하며, 이는 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하여 자가 동력을 실현할 수 있다는 점에서 큰 장점이 있다. 다른 에너지 하베스팅과는 달리 물결이나 바람의 형태와 같은 작은 주파수에서도 에너지 변환 효율이 높으며 낮은 생산비용, 휴대성, 높은 전압의 출력의 특징을 가진다 [2,3]. 하지만 자연환경에서 발생하는 대부분의

✉ Dukhyun Choi; bred96@skku.edu

Copyright ©2024 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.

기계적 에너지는 불규칙한 주파수를 갖고 있기 때문에 일괄적이고 고효율의 출력을 내기 어렵다. 최근 많은 연구팀은 이 문제를 해결하기 위해 다양한 기계적, 전기적 구조를 적용해 TENG의 출력을 높이고 있다 [4-11]. 또한, 안정적인 출력을 바탕으로 센서, 살균시스템 등 다양한 분야에 TENG를 적용하고 있다 [12-15]. 대부분의 TENG들은 낮은 주파수에서의 전기 에너지 생산이 가능하지만, 입력 조건이 없어지는 동시에 전기 에너지를 생산하지 못한다. 따라서 다양한 일상생활에 적용할 수 있는 양의 전기를 생산하기 위해서는 기계적 에너지의 효과적인 동력 전달 방식의 개선이 필수적이다.

본 연구에서는 랙 기어(rack gear)와 피니언 기어(pinion gear)의 비와 기어 간의 결합방식을 이용하여 페달을 통한 선형 운동으로부터 고속의 한 방향 회전 운동으로 변환하는 기구학적 시스템을 설계하였다. 이를 통해 낮은 주파수의 입력값으로부터 고효율의 고풍력 전력 생산이 가능한 메커니즘을 가진 페달링을 이용한 회전형 정전 발전(P-TENG) 시스템을 개발하였다. 정전 발전 소자는 비접촉 회전형 구조로 rotor의 외부에 음극 물질을 패터닝하고, stator의 내부에 전극이자 양극 물질을 패터닝하여 정전 발전이 가능하도록 설계하였으며, 고정자와 회전자의 간격을 조절하여 출력 거동을 분석하였다. P-TENG로부터 발생된 에너지를 통해 빠른 속도로 축전기(capacitor)를 충전하고 LED를 켤 수 있는 응용성을 검증하였다.

그림 1(a)는 P-TENG의 전체적인 구조를 나타낸다. P-TENG는 페달, 랙 기어 피니언 기어, 단방향 니들 롤러 베어링, 샤프트, 프레임, TENG로 구성된다. TENG는 다시 rotor와 stator로 나뉜다. 페달은 스프링의 압축으로 저장된 힘이 페달에서 발을 뺄 때 랙 기어로 전달된다. 페달을 밟았을 때 랙 기어와 피니언 기어 A가 맞물리는 랙 기어의 톱니의 수는 7개이고 피니언 기어 A와 기어 비는 7:10이며, 직선운동을 회전운동으로 바꾼다.

그림 1(b)는 서로 맞물린 두 개의 피니언 기어를 보여준다. 랙 기어에 연결된 피니언 기어 A와 샤프트와 연결된 피니언 기어 B가 5:2의 기어 비로 맞물리며 피니언 기어 A의 회전방향을 피니언 기어 B가 반대로 전환해 단방향 니들 롤러 베어링과 샤프트에 힘을 전달한다. 단방향 니들 롤러 베어링은 샤프트와 연결된 피니언 기어 B와 결합되어 있으며 샤프트가 시계방향으로만 회전할 수 있도록 한다. 페달을 밟으면 [그림 1(c) ii] 랙 기어가 전진하고 피니언 기어 A는 반시계방향으로, 피니언 기어 B는 시계방향으로 회전한다. 피니언 기어 B 내부에 단방향 니들 롤러 베어링과 샤프트가 결합되어 있으며 피니언 기어 B가 시계방향으로 회전할 때 피니언 기어 B, 단방향 니들 롤러 베어링, 샤프트

가 서로 고정된다. 즉 피니언 기어 B가 시계방향으로 회전할 때는 샤프트가 시계방향으로 회전하는 피니언 기어 B에 고정되며 함께 시계방향으로 회전한다. 페달에 발을 떼면 [그림 1(c) iii] 스프링에 의해 페달은 상승하고 랙 기어는 후퇴, 피니언 기어 A는 시계방향, 피니언 기어 B는 반시계방향으로 회전한다. 피니언 기어 B가 반시계방향으로 회전하면 피니언 기어 B와 단방향 니들 롤러 베어링 간의 결합이 끊어져 샤프트는 피니언 기어 B와 분리된다. 즉 피니언 기어 B가 반시계방향으로 회전할 때 샤프트는 아무런 힘을 받지 않게 되고 이전 과정에서 받은 힘으로 인해 발생한 시계방향의 회전 관성으로 인해 계속 시계방향으로 회전한다. 프레임은 stator와 나머지 구조를 연결하고 지지하는 역할을 한다. Stator에는 AI이 일정한 간격을 두고 배열되어 rotor에 있는 대전물질인 PTFE, PA와 접촉하지 않은 상태에서 전극 간의 상대적인 운동으로 전력을 생산한다.

그림 1(c)는 랙, 피니언 기어 그리고 단방향 니들 롤러 베어링에 의한 P-TENG의 회전원리이다. 페달을 눌러 스프링이 압축되고, 랙 기어가 앞으로 움직인다. 랙 기어는 피니언 기어를 반시계방향으로 회전시키고, 두 개의 피니언 기어가 서로 맞물리며 샤프트와 연결된 피니언 기어는 시계방향으로 회전한다. 샤프트와 피니언 기어를 연결하는 단방향 니들 롤러 베어링은 피니언 기어가 시계방향으로 움직일 때 샤프트가 힘을 받고, 반시계방향으로 움직일 때는 힘을 받지 않게 하는 역할을 한다. 즉 페달을 밟아 랙 기어가 앞으로 움직일 때 샤프트는 힘을 받아 시계방향으로 가속 회전하고, 발을 떼 스프링에 의해 페달이 제자리로 돌아가 랙 기어가 뒤로 움직이면 샤프트는 힘을 받지 않아 관성에 의해 회전한다. 시간이 지나면서 베어링, 공기 등에 의한 마찰에 의해 회전속도가 감소하다 정지한다.

그림 2(a)는 non-contact TENG의 stator, rotor의 모양과 각 구조에 부착된 전극을 나타낸다. Rotor에 부착된 3.8 cm × 5 cm PTFE와 PA가 각각 8개씩 총 16개가 번갈아 부착되어 있다. 각 전극이 stator에 부착된 16개의 AI 전극과 마주 보며 정전기를 유도하는데 AI과 비교해 상대적으로 음극인 PTFE와 양극인 PA는 마주보는 AI 전극을 각각 음전하와 양전하로 정전기를 유도한다. 정전기 유도를 통해 AI에 모인 전하는 Rotor의 회전과 함께 움직이고 이 전하의 이동으로 교류전원이 발생한다.

그림 2(b)는 rotor와 stator 간의 간격이 2 mm인 구조에서 페달을 한 번 밟아 rotor를 회전시켰을 때 발생하는 교류전압을 나타낸다. 페달을 밟는 0.8초 동안 정지해 있던 rotor의 회전속도가 증가하며 전압이 30 V까지 상승한다. 페달에서 발을 떼면 관성에 의해 5.5초 동안 회전하며 베어링, 공기 등에 의한 마찰에 의해 rotor의 회전속도가

감소하며 전압과 전류가 감소한다. 그림 2(c)는 페달을 여러 번 밟았을 때의 교류전압을 나타내며, rotor의 회전속도가 빨라지며 이로 인해 출력이 증가한다. 페달을 연속해서 밟을 때의 회전속도는 400 rpm에서 800 rpm까지 밟는 힘과 횟수에 따라 다르다.

그림 3은 rotor와 stator 간의 간격과 rotor의 회전속도에 따른 전압과 전류를 나타낸다. 그림 3(a)는 rotor와

stator 간의 간격이 5 mm이고 rotor의 회전속도가 200 rpm에서 800 rpm으로 증가할 때의 전압과 전류를 나타내며 그림 3(b)는 간격이 2 mm일 때의 결과를 나타낸다. 두 결과 모두 rotor의 회전속도가 증가함에 따라 출력이 증가함을 확인할 수 있다. 간격이 5 mm일 때 전압의 최대값은 회전속도가 200 rpm에서 800 rpm으로 증가함에 따라 각각 13.6 V, 21.0 V, 27.9 V, 34.4 V로 증가하며, 전류

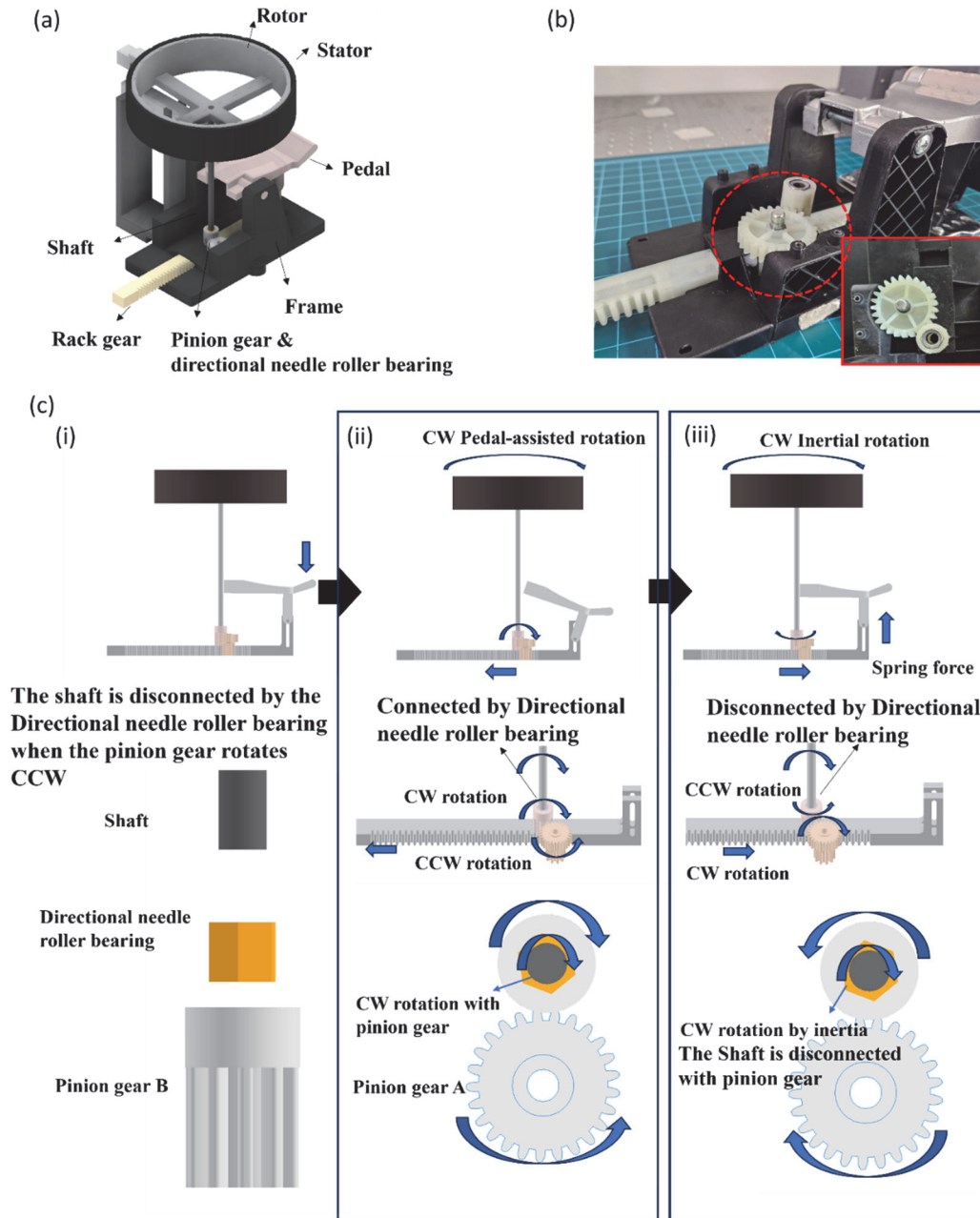


Fig. 1. Design of one directional rotation system with pedal control for high-speed rotation: (a) assembled schematic of P-TENG, (b) photograph of two pinion gears, and (c) principle of one-directional shaft rotating.

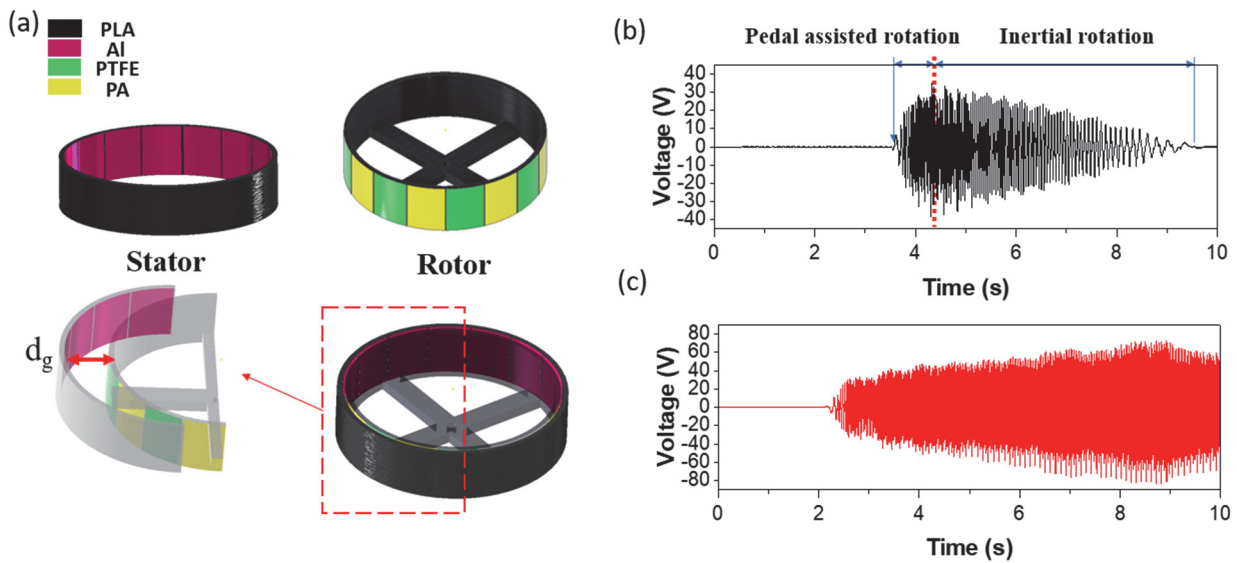


Fig. 2. Design and behavior of non-contact rotational TENG with one directional rotational system: (a) structure of rotor and stator, (b) alternating voltage generated by a single pedal stroke, and (c) alternating voltage generated by a multiple pedal stroke.

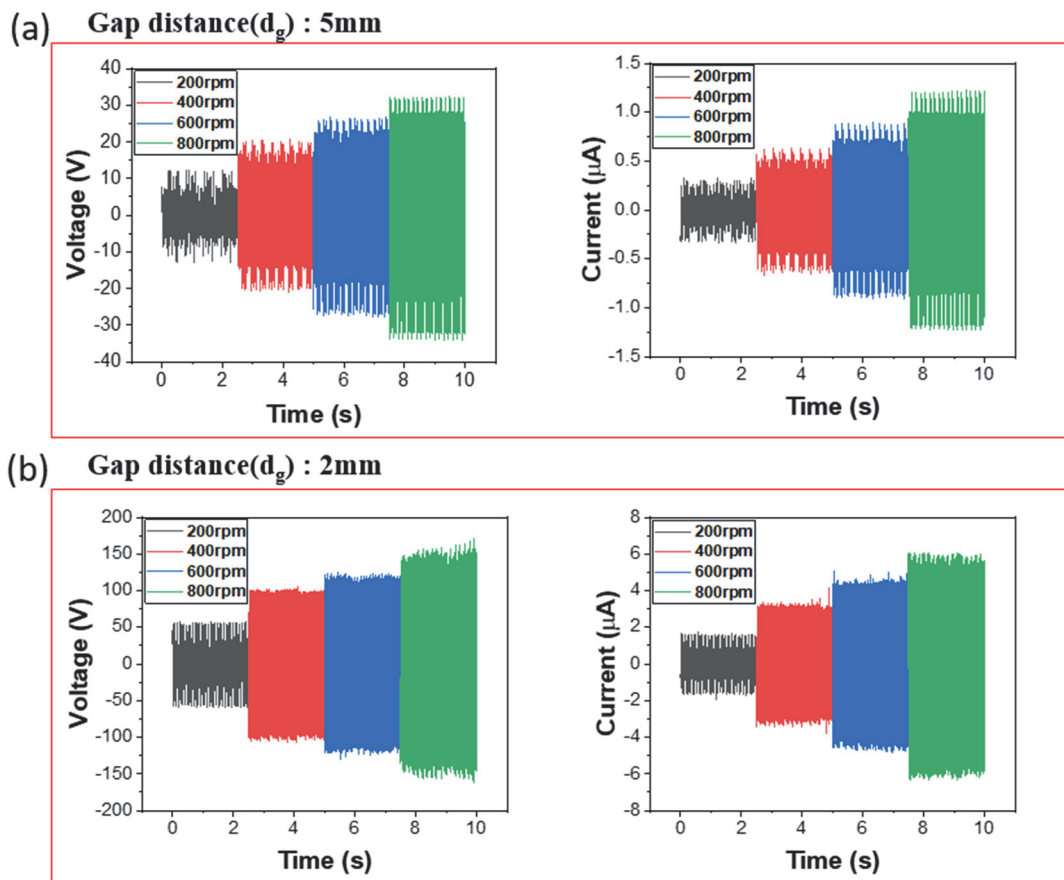


Fig. 3. Effects of gap distance and frequency for TENG output performance: (a) output of a TENG with a 5 mm gap between rotor and stator and (b) output of a TENG with a 2 mm gap between rotor and stator.

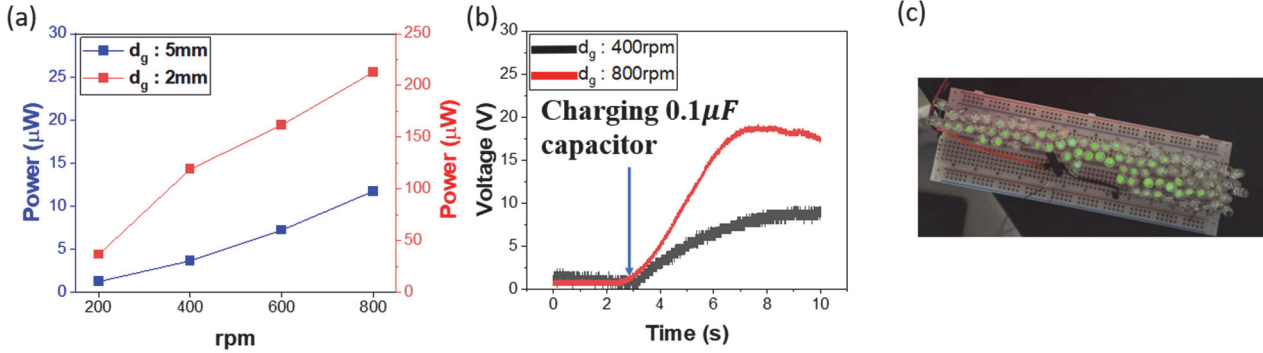


Fig. 4. (a) Power comparison between gap distance 5 mm and 2 mm, (b) the result of using capacitors, and (c) green LEDs powered by power generated through P-TENG.

의 최대값은 각각 0.35 μA, 0.66 μA, 0.92 μA, 1.23 μA이다. 간격이 2 mm일 때의 전압의 최대값은 회전속도가 200 rpm에서 800 rpm으로 증가함에 따라 각각 62.5 V, 111.5 V, 133.6 V 170.9 V이며, 전류의 최대값은 각각 3.07 μA, 4.95 μA, 5.79 μA, 6.34 μA이다. 두 실험의 결과를 통해 전압과 전류는 간격이 2 mm일 때가 5 mm일 때보다 크며, 회전속도가 빠를수록 증가함을 알 수 있다. 이는 거리가 가까울수록 증가하는 전자기력의 특성으로 설명할 수 있다. Rotor와 stator에 부착된 두 전극 사이가 가까울 때 전자기력이 증가하고 이로 인해 유도되는 전하 역시 증가해 전압과 전류가 상승한 것이며, 회전속도가 빠를수록 한 전극에 모이는 전하가 다른 전극으로 이동하는 시간이 짧아져 단위시간당 전하의 이동하는 양이 증가해($I = dQ/dt$) 회전속도의 증가에 따른 측정값의 상승을 설명할 수 있다.

그림 4(a)는 P-TENG의 전력을 나타낸다. 전력은 $Power = (V_{rms})^2 / R$ 을 이용해 계산했으며 회전속도 200, 400, 600, 800 rpm에 대해 간격이 5 mm일 때의 전력은 1.23 μW, 3.64 μW, 7.20 μW, 11.72 μW이고, 2 mm일 때는 36.31 μW, 118.93 μW, 161.75 μW, 212.89 μW였다. 전력은 rotor의 회전이 증가하며, 간격이 2 mm일 때 간격이 5 mm인 P-TENG보다 출력이 크게 측정되었다.

그림 4(b)는 rotor의 회전속도가 400 rpm과 800 rpm일 때의 교류전원을 브릿지 다이오드와 0.1 μF의 세라믹 축전기를 이용해 직류전원으로 변환한 결과를 나타낸다. 800 rpm의 회전속도에서 3초 동안 축전기를 충전해 15 V 이상의 전압을 안정적으로 낼 수 있음을 확인할 수 있으며 400 rpm에서는 충전속도가 낮지만 5 V 이상의 전압을 유지할 수 있다. Rotor의 회전속도가 빠를 때 더 높은 전압과 빠른 충전속도를 보인 것은 교류전원에서의 더 높은 전압과 전류의 측정값이 직류전원에서의 높은 전력으로 나타난 것이다. 그림 4(c)는 rotor가 800 rpm의 회전속도에

서 낸 출력과 브릿지 다이오드를 통해 82개의 작동전압 3 V의 녹색 LED를 작동시킨 모습을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 페달을 통해 저주파수의 버려지는 에너지로부터 고효율의 고풍력을 생산할 수 있는 P-TENG를 설계하고 분석한 결과를 보여주었다. P-TENG는 랙 기어와 피니언 기어 간의 직선운동을 고속의 회전운동으로의 변환하고 피니언 기어 간의 맞물림으로 회전방향을 반대로 전환할 수 있었다. 샤프트와 피니언 기어를 단방향 니들 롤러 베어링으로 연결해 샤프트가 오직 시계방향으로만 힘을 받고 회전하도록 설계하였다. 페달을 한 번 밟았을 때 0.8초간 힘을 받아 시계방향으로 회전 가속운동을 하며 전압이 약 30 V까지 증가했다. 페달에서 발을 떼면 5초 동안 관성에 의한 회전운동을 하며 회전속도가 점점 감소함에 따라 전압 역시 감소하였다. Rotor와 stator 간의 간격에 따른 출력을 비교해 본 결과, 2 mm 간격의 P-TENG의 전압과 전류가 5 mm의 P-TENG보다 약 5배 정도 크다는 것을 확인할 수 있었다. P-TENG를 통해 생산된 교류출력을 브릿지 다이오드와 0.1 μF의 세라믹 축전기 통해 안정적인 직류 출력으로 변환할 수 있음을 확인했으며, 다이오드 브릿지를 통과한 출력으로 82개의 녹색 LED를 켤 수 있었다. 이 구조는 페달을 밟는 단순한 기계적 운동을 고풍력의 전기로 변환할 수 있으며 브릿지 다이오드와 축전기를 이용한 간단한 회로를 이용해 전력 인프라가 부족한 장소에서 배터리를 충전해 소형 전자기기와 센서를 작동시키는 등 유용하게 사용할 수 있다. 향후 연구를 통해 구조의 기계적 회전 운동과 부착된 전극과 회로의 고유진동수를 최적화하고 다양한 전극 물질을 사용해 좀 더 좋은 출력을 얻을 것으로 기대된다. 또한 이 구조의 출력으로 살균 전극을 통해 박테리아를 살균하는 독립전원 물 살균 시스템을 제작할 계획이다.

ORCID

Dukhyun Choi

<https://orcid.org/0000-0002-4788-0215>

감사의 글

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가
관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20013794, 복합
재료 및 동시설계 산업기술거점센터).

REFERENCES

- [1] Department of Energy Science and Diplomacy, Foreign Affairs, https://www.mofa.go.kr/www/wpge/m_4000/contents.do (2023).
- [2] Q. Jiang, Y. Jie, Y. Han, C. Gao, H. Zhu, M. Willander, X. Zhang, and X. Cao, *Nano Energy*, **18**, 81 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.09.017>
- [3] Y. Jung, J. Yu, H. J. Hwang, D. Bhatia, K. B. Chung, and D. Choi, *Nano Energy*, **71**, 104615 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104615>
- [4] K. D. Pham, D. Bhatia, N. D. Huynh, H. Kim, J. M. Baik, Z. H. Lin, and D. Choi, *Nano Energy*, **89**, 106350 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106350>
- [5] K. W. Han, J. N. Kim, A. Rajabi-Abhari, V. T. Bui, J. S. Kim, D. Choi, and I. K. Oh, *Adv. Energy Mater.*, **11**, 2002929 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.202002929>
- [6] N. D. Huynh and D. Choi, *Nanoenergy Adv.*, **2**, 29 (2022).
doi: <https://doi.org/10.3390/nanoenergyadv2010002>
- [7] B. Cao, P. Wang, P. Rui, X. Wei, Z. Wang, Y. Yang, X. Tu, C. Chen, Z. Wang, Z. Yang, T. Jiang, J. Cheng, and Z. L. Wang, *Adv. Energy Mater.*, **12**, 2202627 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.202202627>
- [8] N. D. Huynh, Z. H. Lin, and D. Choi, *Nano Energy*, **85**, 105983 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105983>
- [9] W. Kim, H. J. Hwang, D. Bhatia, Y. Lee, J. M. Baik, and D. Choi, *Nano Energy*, **21**, 19 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.12.017>
- [10] W. Kim, K. D. Pham, and D. Choi, *Nano Energy*, **106**, 108088 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.108088>
- [11] J. Yu, W. Kim, S. Oh, D. Bhatia, J. G. Kim, and D. Choi, *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Green Technol.*, **10**, 409 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1007/s40684-022-00442-y>
- [12] W. Ding, J. Zhou, J. Cheng, Z. Wang, H. Guo, C. Wu, S. Xu, Z. Wu, X. Xie, and Z. L. Wang, *Adv. Energy Mater.*, **9**, 1901320 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.201901320>
- [13] A. Li, H. H. Ho, S. R. Barman, S. Lee, F. Gao, and Z. H. Lin, *Nano Energy*, **93**, 106826 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106826>
- [14] Z. Y. Huo, D. M. Lee, J. M. Jeong, Y. J. Kim, J. Kim, I. Y. Suh, P. Xiong, and S. W. Kim, *Adv. Energy Mater.*, **12**, 2103680 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.202103680>
- [15] 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>