KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY
Vol. 29, No. 3 223~228 (2023)
https://doi.org/10.20909/kopast.2023.29.3.223

에너지 하베스팅 기술을 활용한 농산물 물류용 리턴어블 접이식 플라스틱 상자 RFID 모듈 개발

박종민[1] · 정현모[2*]

Development of a Returnable Folding Plastic Box RFID Module for Agricultural Logistics using Energy Harvesting Technology

Jong-Min Park[1] and Hyun-Mo Jung[2*]

[1]*Dept. of Bio-industrial Machinery Engineering, Pusan National University*
[2]*Dept. of Logistics Packaging, Kyongbuk Science College*

Abstract Sustainable energy supplies without the recharging and replacement of the charge storage device have become increasingly important. Among various energy harvesters, the triboelectric nanogenerator (TENG) has attracted considerable attention due to its high instantaneous output power, broad selection of available materials, eco-friendly and inexpensive fabrication process, and various working modes customized for target applications. In this study, the amount of voltage and current generated was measured by applying the PSD profile random vibration test of the electronic vibration tester and ISTA 3A according to the time of Anodized Aluminum Oxide (AAO) pore widening of the manufactured TENG device Teflon and AAO. The discharge and charging tests of the integrated module during the random simulated transport environment and the recognition distance of RFID were measured while agricultural products (onion) were loaded into the returnable folding plastic box. As a result, it was found that AAO alumina etching processing time to maximize TENG performance was optimal at 31 min in terms of voltage and current generation, and the integrated module applied with the TENG module showed a charging effect even during the continuous use of RFID, so the voltage was kept constant without discharge. In addition, the RFID recognition distance of the integrated module was measured as a maximum of 1.4 m. Therefore, it was found that the surface condition of AAO, a TENG element, has a great influence on the power generation of the integrated module, and due to the characteristics of TENG, the power generation increases as the surface dries, so it is judged that the power generation can be increased if the surface drying treatment (ozone treatment, etc.) of AAO is applied in the future.

Keywords: RFID, TENG, Plastic box, Energy harvesting, Transportation

서 론

IT 산업의 발전에 따른 새로운 형태의 발전소자의 수요는 지속적으로 높아지고 있다. 현재 에너지 하베스팅(Energy Harvesting)이라는 새로운 전력 소자에 대한 연구개발은 매우 활성화되고 있으며, 주변 환경에 존재하는 진동을 활용하여 전력을 생산할 수 있는 전력 소자는 기존의 태양전지, 풍력발전, 조력발전, 수력발전과 같은 신재생에너지와는 달리 주변 환경의 제약 및 특수성에 대한 제약을 받지 않는다. 거의 모든 동력을 부수적으로 발생되는 진동, 늘임 및 기계적 변형을 활용하여 에너지를 전기 에너지로 변환할 수 있는 장점을 지니고 있다[1].

에너지 하베스팅 소재는 과거 압전 현상을 활용한 방법 외에 마찰 전기를 대전 유기 유전체의 접촉에 따른 대전 전화의 생성 및 소멸을 통한 새로운 형태의 에너지 하베스팅 소재 및 구조의 개발을 통해 다양한 플랙서블 소자로의 활용가능성과 매우 경제적인 공정 처리가 가능하게 되었고, 이를 활용한 것이 마찰대전 나노발전기 (Triboelectric Nanogenerator, TENG) 소자라 하며, 다양한 환경에 최적화된 TENG의 개발 및 응용 기술에 대한 연구가 급격히 증가하였다[2].

*Corresponding Author: Hyun Mo Jung
Dept. of Logistics Packaging, Kyongbuk Science College, 634 Jinsan-ro, Kisan-myeon, Chilgok-gun, Gyeongbuk 39913, South Korea
Tel: +82-54-979-9558
E-mail: hmjung@kbsc.ac.kr

본 기술개발에서 TENG의 주기적 전위차를 발생하기 위해 물류화물의 수송 중 발생되는 진동과 충격을 이용하게 되며, 이러한 진동은 걷기, 목소리, 엔진 진동, 자동차, 기차, 항공기, 바람 등 거의 모든 동작을 통해 얻어질 수 있다.

진동은 지구상 어디에서나 동작하는 상황에서는 항상 존재하며, 진동을 통한 에너지 하베스팅 기술은 특히 보완적인 균형 잡힌 에너지 수확 기술과 함께 모바일 전자 기기에 전력을 공급할 수 있으며, 이는 상용화를 위한 수요에 매우 중요한 요인이다.

진동 및 충격 에너지를 수확하기 위한 마찰 전기 발전기의 기본 원리에 기반한 다양한 기술이 입증되었으며, 향후 이를 위한 세부적인 연구개발을 통해 각 진동에 최적화된 TENG를 개발될 것으로 예측된다. 과거에는 TENG를 활용하여 다양한 형태의 전력소자를 개발하고 소재 선정과 발전 특성을 최적화 하는 연구개발[3,4,5,6]이 주로 진행되었으나, 현재는 명확한 응용 분야 적용 가능성을 확인하는 연구개발을 다수의 연구 기관에서 진행하고 있는 추세이다.

TENG의 경우 새로운 소재를 적용하여 표면 전하 밀도를 극대화 할 수 있는 방안에 대한 제시와 차량 진동에 적절하게 반응할 수 있는 기계 구조를 제작해야만 최적의 발전 효과를 얻을 수 있다. 차량 진동에너지를 TENG 압력변화로 전환해야 하며, 이를 위해 다양한 실험을 수행하여 TENG 발전에 적합한 최적 압력변환의 구명이 필요하다. 아울러 변환된 압력변화는 TENG에 전달되어 다시 전기에너지로 변환되는 일렬의 변환과정이 필요하다. 단순히 TENG 소자의 최적화뿐만 아니라 진동을 압력으로 적적하게 변환 시킬 수 있는 장치의 고안 및 최적화 또한 매우 중요한 부분이다[7,8].

물류 수송의 대부분이 트럭에 의존하는 국내의 경우에는 수송중 발생되는 진동 및 충격을 이용한 TENG의 적용분야가 매우 다양해질 수 있다. 최근에는 물류의 효율을 위해 기존 사용되고 있는 농산물 포장용 골판지 상자를 대체하는 리턴어블 접이식 플라스틱 상자의 사용이 조금씩 증가하게 되었으며, 기존 플라스틱 상자에 사용되는 RFID 태그는 수동형(Passive type) RFID 태그로 리더기와 인식거리가 매우 짧은 단점을 가지고 있다. 이 경우에는 파렛트(pallet)을 사용하는 유니로드 시스템(Unit Load System, ULS)으로 물류의 흐름이 이루어지고 있는 현장에서 적용성이 떨어진다고 볼 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 사용되는 능동형(Active type) 및 반능동형(Semi-Active type) RFID 태그의 경우에는 인식거리가 수동형에 비해 증가 되었지만, 자체 운영 배터리 소모로 인해 장시간 사용이 힘들다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 기존 RFID의 물류시스템 적용의 문제를 해결하기 위하여 국내 물류 수송차량에 대한 진동/충격 수준에서 국내 물류 수송환경으로 구동시킬 수 있는 기존 개발 TENG 최적화 전력소자[9]를 이용하여 차량 이송중 전력소비를 필요로 하는 능동형(Active-type) RFID 태그와 통합된 모듈을 개발하고자 하였으며, 통합모듈을 물류용 플라스틱 상자에 장착하여 국내 진동 및 충격의 물리적 환경에 의해 자체 충전으로 구동할 수 있는 통합모듈의 발전 특성을 분석하고자 하였다.

재료 및 방법

1. TENG 제작

본 연구에서는 차량 진동에 반응 하여 충전 소자를 구동시킬 수 있는 전력을 얻기 위해서 수직 접합 분리 구조로 제작된 최적의 재료로 제시[9]된 TENG 소재인 125 μm의 두께를 갖는 Teflon 소재인 PTFE (Polytetrafluoroethylene) 위에 알루미나 에칭 공정(Pore widening)이 적용된 양극산화 알루미늄(Anodized Aluminum Oxide, AAO) 전극을 50 nm의 두께로 증착한 뒤, 유기 유전체 부품($30 \times 20\ mm^2$)을 제작(Fig. 1)하였다.

외부 물리적 환경에 따른 TENG의 발전 특성을 비교하기 위하여, Fig. 2와 같이 전자식 진동시험기(LS-100, LING Electronics Inc. USA) 위에 양 전극이 부착된 TENG 구조

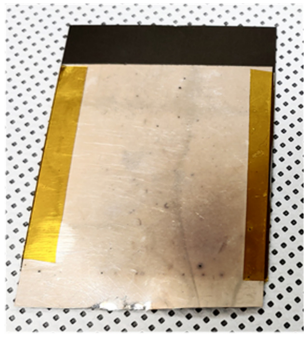


Fig. 1. TENG (AAO+Teflon).

Fig. 2. Electrical Vibration Tester.

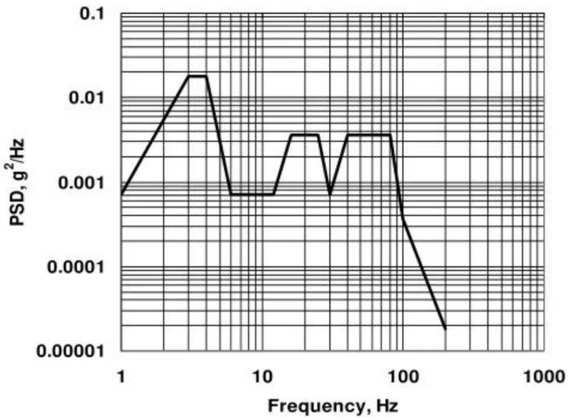


Fig. 3. PSD (Power Spectral Density) profile by ISTA 3A.

물을 부착하여 트럭 수송중 발생되는 진동 및 충격 PSD 프로파일(Fig. 3, ISTA 3A[10]) 랜덤 진동시험 및 10 Hz, 0.5 G의 정현파 진동시험을 적용하여 TENG에서 발생되는 개방 전압을 측정하였다.

2. TENG 및 RFID 통합모듈 제작

본 연구에서는 제작된 TENG와 기존 능동형(Active-type) RFID 태그(2.4 GHz, ISO18000-4, 3.3 V) 및 NFC가 통합된 모듈을 제작하였으나, 본 연구에서는 TENG 및 RFID 태그의 통합모듈에 대한 분석 시험으로 한정하였다. Fig. 4은 RFID, TENG+리튬배터리 및 NFC 통합모듈의 개략도이며, Fig. 5와 같이 3가지 기능의 통합 모듈(A-type, 80 × 25 × 15 mm, 85 g)과 TENG이 적용되지 않은 모듈(B-type, 50 × 30 × 15 mm, 70 g)을 제작하였다.

3. TENG 및 RFID 통합모듈의 충전 시험평가

본 연구에서는 제작된 통합모듈에 대한 랜덤 진동 및 충격시험을 수행하였으며, Fig. 6에서 보는 바와 같이 전자식 진동시험기(CA-150, FarmTECH, Korea)에 올려진 농산물 물류용 리턴어블 접이식 플라스틱 상자(540 × 360 × 200 mm) 내부에 장착된 A와 B 형식의 모듈을 설치하였으며, Fig. 3의 ISTA 3A의 PSD 프로파일을 적용한 트럭 수송환경 모의 랜덤시험을 수행하였다. 두 형식의 통합모듈에 대한 능동형 RFID 태그의 계속적인 사용에 따른 리튬배터리의 충전 및 방전에 대한 평가 시험을 수행하였다. 또한, Fig. 7와 같이 농산물(양파)이 적입된 상태에서 리더기(2.4 GHz)를 통한 RFID의 인식거리를 계측하였다.

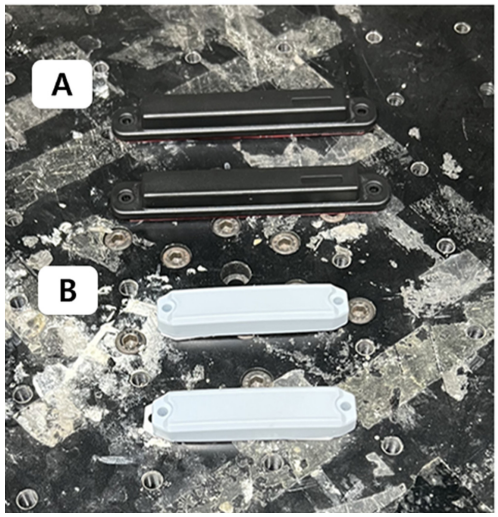


Fig. 5. Integrated modules of RFID, TENG and NFC.

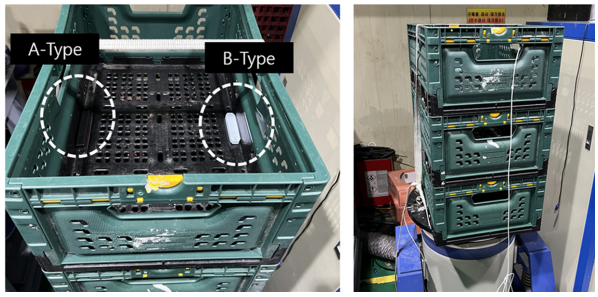
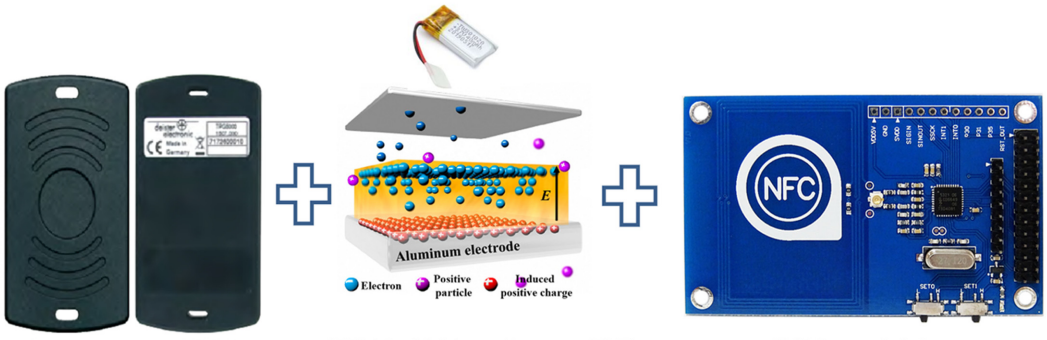


Fig. 6. Testing of type A and B integrated modules by random vibration.



[Semi-active RFID] [TENG+Lithium Battery(5V)] [NFC module]

Fig. 4. Schematic view of RFID, TENG and NFC integrated module.

Fig. 7. Vibration and RFID recognition test of onion plastic boxes.

결과 및 고찰

1. TENG의 발전특성

본 연구에서는 제작된 TENG 소자인 Teflon과 양극산화 알루미늄(AAO)중 AAO의 알루미나 에칭 공정처리(pore widening) 시간(25~35분, 1분 간격)에 따른 전자식 진동시험기 및 ISTA 3A의 PSD 프로파일 랜덤 진동시험과 10 Hz 및 0.5 G의 정현파 진동시험이 적용된 전압 및 전류 발생량을 Fig. 8에 보여주고 있다. 랜덤 진동시험에 비해 10 Hz의 주파수에 고정된 정현파 시험에서 더 큰 전압 및 전류가 발생되었다.

이는 10 Hz의 낮은 주파수는 고주파수에 비해 진동 및 충격의 상하 수직 변위가 다양한 주파수가 분포되는 랜덤 시험에 비해 상대적으로 커서 TENG의 발전량을 증가시키는 효과를 가져오는 것으로 평가되었다. 본 시험을 통해 전압 및 전류 발생량 측면에서 31분이 최적의 에칭 공정처리 시간으로 평가되었으며, Fig. 9는 전자식 진동시험기에서 계측된 전압 및 전류 발생량을 보여주고 있다.

2. 통합모듈의 충전 특성 및 인식거리

본 연구에서는 제작된 TENG 및 RFID 통합모듈을 Fig. 6와 같이 농산물 물류용 리턴어블 접이식 플라스틱 상자 내부에 부착하여 수송중 발생되는 랜덤 진동 및 충격 모의시험(ISTA 3A, Overall G_{rms} : 0.54, Max. stroke : 45.13 mm)에 의한 방전 및 충전 특성에 대한 시험을 수행하였으며, Fig. 10은 TENG이 적용된 A 형식의 통합모듈과 TENG이 적용되지 않은 B 형식 모듈의 RFID의 계속적인 사용에 따

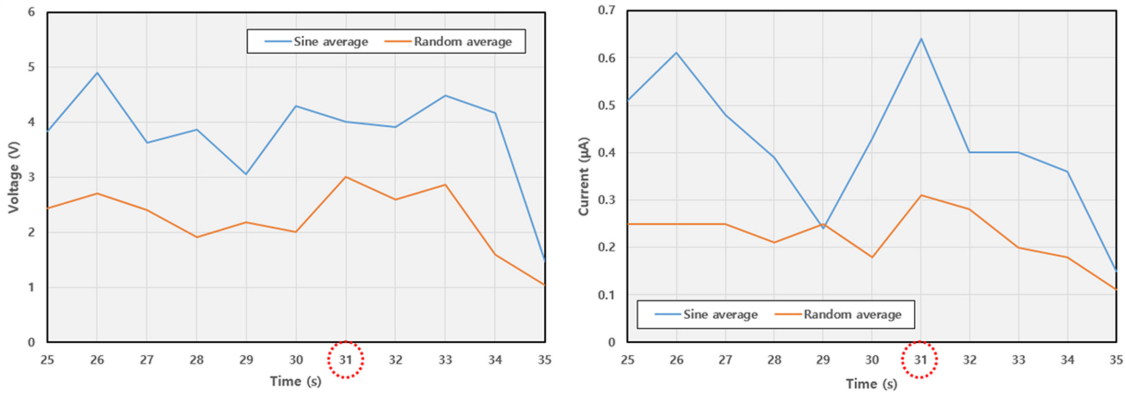


Fig. 8. Generating voltage and current of TENG according to pore widening process time.

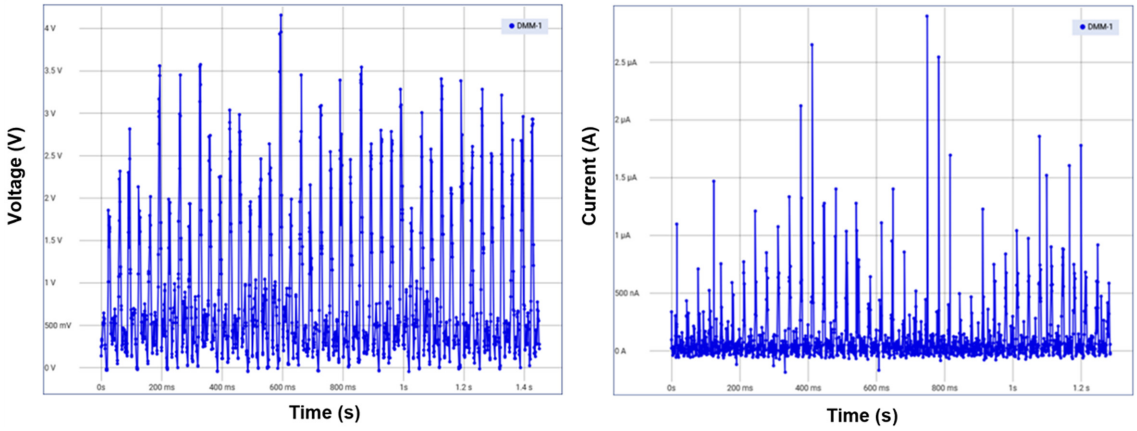


Fig. 9. Generating voltage and current of TENG by 31 min of pore widening process time.

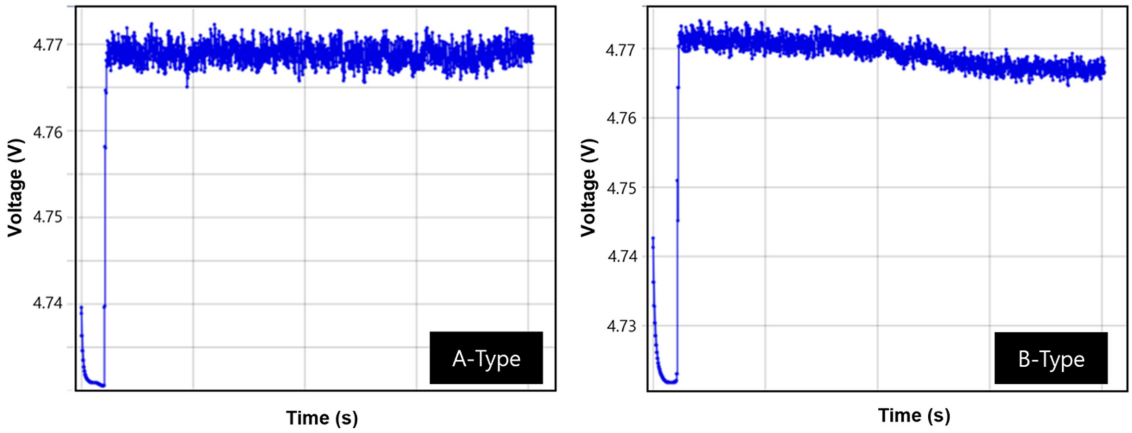


Fig. 10. Voltage drop characteristics of TENG and RFID integrated module by vibration test.

Table 1. Recognition distance of TENG and RFID integrated module

Distance (m)	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
Recognition Status	○	○	○	○	○	×

른 리튬배터리(5 V)의 방전 및 충전 특성을 보여주고 있다.

TENG이 적용된 A 형식의 경우에는 수송중 진동 및충격 모의시험에서 리튬배터리의 방전 및 충전으로 지속적으로 동일한 전압(평균 4.78 V)을 보여주고 있으며, B 형식의 경우에는 리튬배터리의 방전으로 인해 전압 강화가 발생되는 것을 알 수가 있었다. 이러한 결과로 인해 TENG 및 RFID 통합모듈의 농산물 물류 리턴어블 접이식 플라스틱 상자에 실제 적용 가능한 것으로 평가되었다.

또한, TENG 및 RFID 통합모듈을 농산물(양파) 적입된 리턴어블 접이식 플라스틱 상자 내부 바닥 측면 모서리에 부착하였으며, 수송 진동 및 충격 모의시험중 RFID의 인식거리를 계측하였다. Table 1은 각 거리별(0.6 m 이상) 인식여부를 보여주고 있으며, 최대 1.4 m의 거리까지 RFID의 인식이 가능하였다.

본 연구에서는 휴대용 저출력의 RFID 리더기를 사용하였지만, 현장에서 실제 적용되고 있는 산업용 고출력의 RFID 리더기를 사용한다면, 인식거리는 더 증가할 것으로 평가되었다. 또한, 기존 물류용 플라스틱 상자에 적용되는 수동형(Passive-type) RFID 태그의 인식거리(0.1 m)와 비교한다면 능동형(Active-type) RFID 태그의 적용으로 인식거리가 증가하게 되고 능동형 RFID가 가지고 있는 배터리 방전 문제를 해결할 수 있는 기술이라고 평가되었으며, 차후 사용기한에 대한 물류효율화 측면에서 반능동형(Semi-Active type) RFID 태그에 대한 활용이 가능할 것으로 평가된다.

결 론

본 연구에서는 제작된 TENG 소자인 Teflon과 양극산화 알루미늄(AAO)중 AAO의 알루미나 에칭 공정처리(pore widening) 시간에 따른 전압 발생량을 계측하기 위하여 전자식 진동시험기 및 ISTA 3A의 PSD 프로파일 랜덤 진동시험과 10 Hz 및 0.5 G의 정현파 진동시험을 적용하였으며, 최적의 전압발생 공정처리 시간을 도출하였다. 이러한 최적화된 TENG 구조를 RFID 태그와 통합된 모듈을 제작하였으며, 제작된 통합모듈을 농산물(양파)가 적입된 리턴어블 접이식 플라스틱 상자에 내부에 설치하여 랜덤 모의 수송 환경중 통합모듈의 방전 및 충전 시험과 RFID의 인식거리를 계측하였다.

그 결과 TENG의 성능을 최대화하기 위한 AAO의 알루미나 에칭 공정처리 시간은 전압 및 전류발생 측면에서 31분이 최적인 것을 알 수가 있었으며, TENG 모듈이 적용된 통합모듈에서 RFID의 계속적인 사용중에도 충전효과를 보여 전압이 방전되지 않고 일정하게 유지되었다. 또한, 통합모듈의 RFID 인식거리는 최대 1.4 m로 계측되었다. 본 연구를 통해 TENG 소자인 AAO의 표면상태가 통합모듈의 발전량에 미치는 영향이 큰 것을 알수 있었으며, TENG의 특성상 표면이 건조할수록 발전량이 증가하게 되므로 차후 AAO의 표면 건조 처리(오존처리 등) 방법을 적용하게 된다면 발전량을 증가시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

감사의 글

이 연구는 농촌진흥청 공동연구사업 농축산물 수확 후 관리 데이터 활용 기술개발 (과제번호 : PJ017050042023)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. Lee, J.H., Kim, J., Kim, T.Y., Hossanin, M.S., Kim, S.W. and Kim, J.H. 2016. All-in-one energy harvesting and storage devices, Journal of Materials Chemistry A, 4, 7983-7999.

2. Niu, S., Liu, Y., Wang, S., Lin, L., Zhou, Y.S., Hu, Y. and Wang, Z.I. 2013. Theory of sliding-mode triboelectric nano-generators, Advanced Materials, 25, 6183-6193.
3. Wang, Z.I., Chen, J. and Lin, L. 2012. Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors, Engergy & Environmental Science, 8, 328-334.
4. Wang, Z.I. 2015. Triboelectric nanogenerators as new energy technology and selfpowered sensors - principles, problems and perspectives, Faraday Discuss, 176, 447-458.
5. Byun, K.E., Lee, M.H., Cho, Y., Nam S.G., Shin, H.J. and Park, S. 2017. Potential role of motion for enhancing maximum ouput energy of triboelectric nanogenerator, APL Materials, 5, 74-107.
6. Badatya, S., Bhowal, R., Mandal, K., Srivastava, A.K., Gupta, M.K. and Chopra, D. 2022. Poling-Polarization-Mediated Centrosymmetric Charge Transfer Organic Cocrysta Based Flexible Triboelectric Nanogenerator. ACS Applied Electronic Materials, 4(7), 3665-3678.
7. Shi, Q., Zhang, Z., Yang, Y., Shan, X., Salam, B. and Lee, C. 2021. Artificial Intelligence of Things (AIoT) Enabled Floor Monitoring System for Smart Home Applications. ACS Nano, 15(11), 18312-18326.
8. Kim, W.G., Kim D.W., Cho, I.W., Kim, J.K., Kim, M.S. and Choi, Y.K. 2021. Triboelectric Nanogenerator: Structure, Mechanism, and Applications. ACS Nano, 15(1), 258-287.
9. 박종민, 정현모. 2022. 국내 수송환경에 적합한 마찰전기 나노발전기의 발전특성 분석. 한국포장학회지 28(3), 193-199.
10. ISTA 3A. 2022. ISTA Steel Spring Truck Random Vibration Spectrum. International Safe Transit Association. USA.