

## AAO 두께 및 표면 형상에 따른 고체-고체 마찰 대전 기반 에너지 하베스팅 발전 성능에 관한 연구

이광석\* · 황운봉\*<sup>†</sup>

### A Study on the Output Performance of Solid-solid Triboelectric Energy Harvesting Depending on the Surface Morphology and Thickness of AAO

Kwangseok Lee\*, Woonbong Hwang\*<sup>†</sup>

**ABSTRACT:** Due to the increasing demand for wearable devices and miniaturization of various electronic devices, the trend of nanofabrication in IT devices is underway. In order to overcome the limitations of battery size and capacity, there has been a lot of research interest in energy harvesting technology, also known as triboelectric nanogenerator. AAO(Anodic Aluminum oxide) coated with fluoride is a structure that includes an anode layer with high properties in the triboelectric series, an dielectric layer that helps transfer the triboelectrically generated charges to the electrode without loss, and the electrode. For these reasons, AAO has been a lot of research on its application to frictional energy harvesting nanogenerators. In this work, we analyzed the correlation of AAO between the surface morphology and thickness of the insulating layer by utilizing aluminum oxide, which is advantageous for the application of triboelectric nanogenerators, and adjusting the thickness of the insulating layer.

**초 록:** 최근 각종 전자기기의 소형화와 웨어러블 디바이스의 수요가 증가함에 따라 IT 기기들의 나노화가 진행 되는 추세이며, 이에 따른 배터리의 크기 및 용량 등의 한계를 극복하기 위하여 에너지 하베스팅 기술인 마찰 대전에 대한 연구가 많은 관심을 받고 있다. 불소계 코팅을 진행한 양극산화 알루미늄은 대전 서열에서 음극 성향이 높은 대전층과 대전된 전하가 전극으로 손실없이 전달되도록 도와주는 절연층 그리고 전극을 모두 포함하고 있는 구조로서 마찰 대전 나노발전기의 적용에 있어 많은 연구가 진행되어 왔다. 본 연구에서는 마찰대전 나노발전기 적용에 유리한 양극산화 알루미늄을 활용하여 마찰대전 나노발전기에 영향을 미치는 표면 형상 및 절연층의 두께를 조절하여 발전량과의 상관관계에 대하여 분석하였다. 이러한 분석을 통하여 향후 마찰대전 나노발전기 제작에 있어 면적 대비 발전량을 증가시킬 수 있는 방향을 제시할 수 있었다.

**Key Words:** 마찰대전 나노발전기(Triboelectric nanogenerator), 양극산화 알루미늄(Anodic aluminum oxide), 나노구조(Nanostructures), 수직 접촉-분리 모드(Vertical contact-separation mode), 유전층(Dielectric layer)

## 1. 서 론

에너지 하베스팅(Energy Harvesting)은 버려지는 에너지를 수확(Harvesting) 또는 이용(Scavenge)하여 에너지를 재 생산하는 기술이다. 최근 각종 전자기기의 소형화와 웨어러블 디바이스의 수요가 증가함에 따라 IT 기기들의 나노화가 진행되는 추세이며, 이에 따른 배터리의 크기 및 용량 등의 한계를 극복하기 위한 기술로 에너지 하베스팅이 주목 받고 있다. 그 중에서도 마찰 대전(Triboelectrification)은 서로 다른 재료의 접촉 및 분리라는 간단한 정전기 원리로 에너지 수확이 가능하므로 최근 몇 년간 기술 급성장을 이루고 있는 기술이다. 하지만 비연속적인 에너지의 공급과 낮은 에너지 밀도로 인하여 실질적으로 활용되기에 어려움이 있다는 점은 마찰대전 뿐 아니라 에너지 하베스팅의 전체적인 가장 큰 과제라고 볼 수 있다.

이를 해결하기 위하여 마찰대전 나노발전기의 수확 에너지의 밀도를 높이고자 표면 거칠기의 도입[1-5], 전극과 접촉층 사이의 저장층의 역할을 하는 유전층 도입[5-8], 젖음성 개질[3,9-13] 등과 같은 많은 연구들이 시도되었다. 하지만 대부분의 연구들의 경우, 마찰대전 나노발전기의 제작 공정이 복잡하거나 경제적이지 못하거나 복잡한 구조체에는 적용이 불가능한 공법을 사용하여 실용화에 있어 한계점을 지니는 경우가 많았다.

이와 반대로 양극산화 알루미늄(Anodic Aluminum Oxide, AAO)은 산업적으로 양산에 많이 이용되고 있는 공법이며, 전극에서 직접 유전층 및 접촉층을 형성하여 접착이라는 공정이 생략되고, 평면 구조 뿐만 아니라 복잡한 구조 표면에 표면 거칠기를 부여할 수 있어 마찰대전 나노발전기의 재료로서 적용에 많은 시도가 있었다[6,14-18]. 특히 불소계 코팅을 통해 젖음성 개질로서 고체-액체 마찰대전으로 적용되는 시도가 많았다[16,17].

소수성으로 젖음성을 개질한 양극산화 알루미늄은 표면에 접촉대전에 있어 음의 대전서열 띠는 불소계 접촉층을 가지며[19,20], 저장층에 해당하는 유전율이 높은 산화막[21]을 보유하고 있다. 또한, 나노 홀의 표면 거칠기를 동시에 갖기에 마찰대전 나노발전기의 에너지 밀도를 증가시킬 수 있는 요인을 여러 포함하고 있다.

## 2. 시편 제작 및 실험 방법

실험에 사용된 시편은 (주)알코스에서 구입한  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  크기의 5052 계열 산업용 알루미늄을 사용하여 제작되었다. 초음파(Sonicator) 세척 진행에 99.9% 에탄올(Ethyl alcohol)이 사용되었으며, 전해 연마(Electropolishing)는 과염소산(Perchloric acid)을 99.9% 에탄올에 1:4의 부피비로 희석시켜 사용하였다. 양극산화 공정에는 0.3 M 옥살산(Oxalic acid) 수용액을 사용하였으며, 나노 플레이크 구조 형상 제작에 있

어 1 M의 수산화 나트륨 용액이 사용되었다. 나노 홀 구배 확장을 위하여 5 wt%의 인산(Phosphoric acid) 수용액을 제작하였다. 추가적으로 접촉층 제작에 있어 사용된 PTFE 용액은 FC-40( $\text{C}_{10}\text{HF}_{22}\text{N}$ , Fluorinert<sup>TM</sup>) 용매에 PTFE( $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ , Chemours<sup>TM</sup>)를 0.1 wt% 비율로 첨가하여 제작하였다. PTFE 용액을 제외한 실험에 사용된 용액은 삼전화학(Samchun Chemical)에서 구입하였다.

### 2.1 다양한 두께의 양극산화 알루미늄 제작

산업용 알루미늄표면의 불순물 제거를 위하여 에탄올 용액에서 초음파 세척을 진행하고, 표면의 평탄화를 위하여 전해연마를 진행하였다. 전해연마는  $-4^\circ\text{C}$ 의 과염소산 희석액에서 20 V의 전압을 5분간 가압하여 진행한 뒤, 에탄올로 세척하였다.

양극산화 공정은 양극에는 알루미늄을, 음극에는 백금을 연결하여  $25^\circ\text{C}$ 의 0.3 M 옥살산 수용액에서 50 V의 전압을 가압하여 진행하였다. 양극 산화 시간은 두께 조절을 위하여 각 시편을 10 / 20 / 30 / 50 / 100 / 150 / 180 / 240분으로 진행하였다.

형성된 구조물의 두께를 고분해능 전계방출 주사전자 현미경(High Resolution FE-SEM, JEOL)을 이용하여 측정하였다.

### 2.2 양극산화 알루미늄 표면 형상 개질

양극 산화 공정 이후, 알루미늄 표면에는 나노 홀 구조의 양극산화 알루미늄이 형성된다. 양극 산화 알루미늄을 1 M의 수산화나트륨 용액에 1분간 침지한 후,  $80^\circ\text{C}$ 의 증류수에 10분간 침지하여 나노 플레이크 구조를 형성한다. 양극 산화 공정 진행 시, 50 V 정전압 조건이 아닌 5 A의 정전류 조건에서 20분간 진행하여 나노 파이버 구조를 형성한다. 추가적으로 나노 홀 구조의 홀 구배 조절을 위하여 양극 산화 알루미늄을 인산 수용액에 10분 단위로 0~60분간 침지하였다.

형성된 구조물의 표면 형상 및 두께를 고분해능 전계방출 주사전자 현미경(High Resolution FE-SEM, JEOL)을 이용하여 측정하였다.

### 2.3 고체-고체 마찰대전 발전량 측정

고체-고체 마찰대전 발전량 측정은 수직 접촉대전 방식을 통하여 진행한다. 발전량 측정 이전, 나노구조가 형성된 시편을 PTFE 용액에 침지한 이후,  $60^\circ\text{C}$  오븐에서 24시간 건조하여 접촉층을 형성하였다(Fig. 1).

접촉층이 형성된 양극 산화 알루미늄을 수직 접촉대전 방식을 통하여 고체-고체 마찰대전 발전량을 측정하였다. 제작된 양극산화 알루미늄의 상대층으로서 단위 면적당 접촉 면적을 넓히고, 나노 구조의 마모에 대한 영향을 줄이고 자 나일론 섬유를 사용하였으며, 50 N의 힘으로 5 Hz의 주

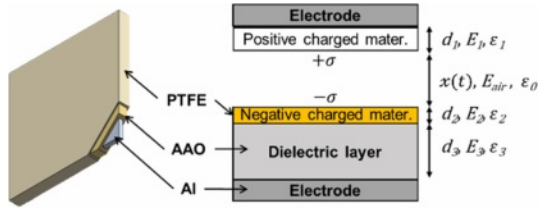


Fig. 1. Structures of AAO and its role in triboelectricity

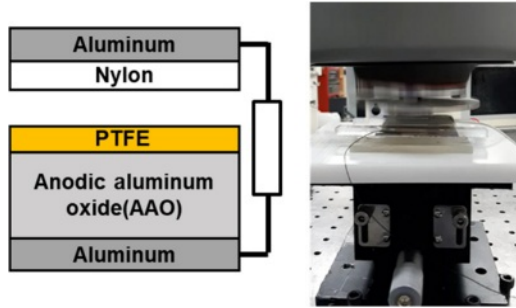


Fig. 2. Schematics of experiments & setup

기로 마찰대전을 진행하였다(Fig. 2). 측정값이 포화 상태에 이르렀을 때의 피크 값을 데이터 값으로 사용하였으며, 오실로스코프(DS1074Z, Rigol)를 사용하여 전압을 측정하고, 오실로스코프와 프리 앰프(SR570, Standard Research Systems)를 통하여 전류를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 AAO 두께에 따른 마찰 대전 발전량 비교

Fig. 3은 양극산화 시간에 따른 양극산화 알루미늄 두께를 SEM으로 관측한 결과이다. 양극 산화 시간이 증가함에 따라 산화막이 생성되는 속도가 점차 느려지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4은 양극산화 두께별 마찰대전 발전량을 나타낸 것이다. 전압의 경우 두께가 증가함에 따라, 양극산화를 100분 진행하여 얻은 45.46  $\mu\text{m}$  두께의 양극산화 알루미늄에서 5.34  $\mu\text{m}$  대비 약 40% 이상의 전압이 증가하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4(a)).

산화막의 두께가 증가함에 따라 전압이 증가하는 이유를 분석하여 보면 유전층으로 사용된 양극산화 알루미늄이 PTFE에서 대전된 전하가 전극으로 오롯이 전달되지 못하고, 공기층으로 빠져나가는 것을 잡아주는 저장층의 역할을 하여 접촉 대전으로 얻은 에너지를 효율적으로 수확하게 해주기 때문으로 보인다[5-8].

산화막의 두께가 증가함에 따라 일정 두께 이상부터 전압이 감소하는 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. Fig. 1과 같은 상황에서 수직 접촉 마찰대전 시, 발생하는 전압(V)은 식 (1)과 같이 유도할 수 있다[26,27].

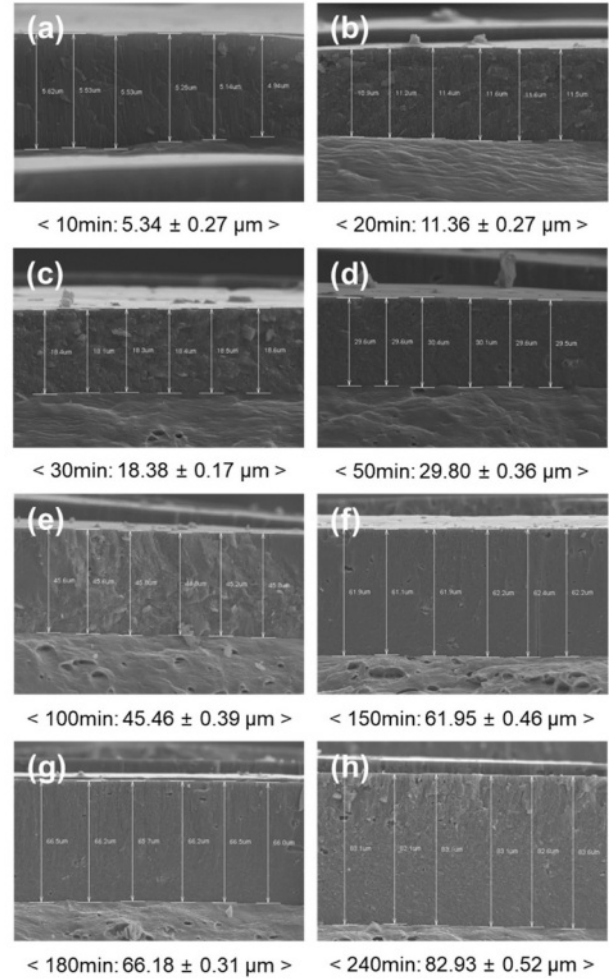


Fig. 3. SEM images of AAO thickness by anodizing time. (a) 10, (b) 20, (c) 30, (d) 50, (e) 100, (f) 150, (g) 180 and (h) 240 min

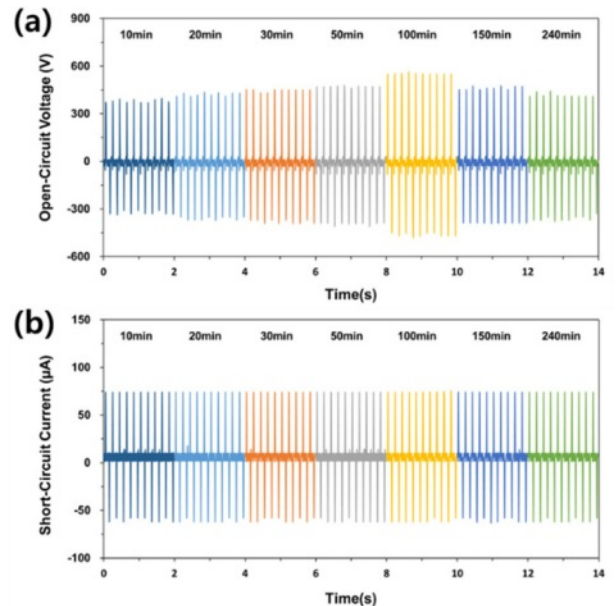


Fig. 4. Electrical output (a) voltage and (b) current of AAO by anodizing time



$$V = E_1 d_1 + E_{air} x(t) + E_2 d_2 + E_3 d_3$$

$$= -\frac{Q}{S\epsilon_0} \left( \frac{d_1}{\epsilon_1} + x(t) + \frac{d_2}{\epsilon_2} + \frac{d_3}{\epsilon_3} \right) + \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$E$ 는 각 구간에서의 전기장을 나타내며  $d$ 는 두께,  $\sigma$ 는 각 구간 물질의 유전률,  $Q$ 는 총 전하 이동량,  $x$ 는 접촉층과 상대층 사이의 거리,  $\sigma$ 는 표면 전하 밀도를 나타낸다.

개방 회로 전압( $V_{oc}$ ) 상태에서는 전하 이동량( $Q$ )이 없으므로 0이므로 전압은 접촉층과 상대층 사이의 거리( $x(t)$ )에 비례하게 되며 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다[26,27].

$$V_{oc} = \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad (2)$$

산화막이 두꺼워지면 증가하는  $d_3$ 에 따라  $x$ 가 감소하게 되고 이에 따라 개방회로전압( $V_{oc}$ )가 감소하는 것으로 보인다. 이러한 두 요인에 따라 산화막의 두께에 따라 전압의 크기가 증가하다가 감소하는 것으로 보인다.

접촉 대전 시, 재질이 바뀌지 않는 상황에서는 표면전하 밀도( $\sigma$ )가 같고, 표면 형상이 바뀌지 않는 상황에서는 접촉 면적( $S$ )이 같다. 이로 인하여 식 (3)에 따라 총 전하량( $Q$ )가 같다.

$$Q = \sigma S \quad (3)$$

접촉층과 상대층의 분리가 일어나게 되면 서로 대전되어 이루고 있던 전기적 평형이 깨지게 되고, 각 대전층이 전극과 전기적 평형을 이루는 과정에서 전류가 흐르게 된다. 각 대전층이 서로에게 영향을 미치지 않게 되는 속도, 즉 분리 속도가 전류의 세기와 비례한다. 앞선 실험에서 양극 산화 알루미늄의 두께만을 조절하였으므로, 재질과 형상이 같은 상황에서 5 Hz의 같은 대전층 분리 속도를 갖는 실험에서는 전류 값이 일정하다(Fig. 4(b)).

### 3.2 AAO 표면 형상에 따른 마찰 대전 발전량 비교

표면 개질을 통하여 Fig. 5와 같이 동일한 산화막 두께를 가지는 나노 홀/나노 플레이크/나노 파이버 표면 형상의 양극산화 알루미늄을 제작하였다.

Fig. 6는 다양한 형상 표면을 갖는 양극 산화 알루미늄의 수직 마찰대전 발전량을 보여준다. 다른 나노 구조가 나노 홀에 비해 표면 거칠기가 높음에도 불구하고 나노 홀 구조의 발전량이 전압 기준 5~7배, 전류 기준 2~3배 이상 나온 것을 확인할 수 있다.

이러한 결과는 Fig. 7에서 보는 것과 같이 상대층으로 사용한 나일론 섬유의 상대적 크기가 마이크로 규모의 파이버 구조를 갖고 있기에 나노 플레이크 혹은 나노 파이버 구조 틈새에 침투하지 못하였기 때문으로 보인다. 즉, 나노 홀 구조가 나노 플레이크 및 나노 파이버 구조보다 나일론 섬

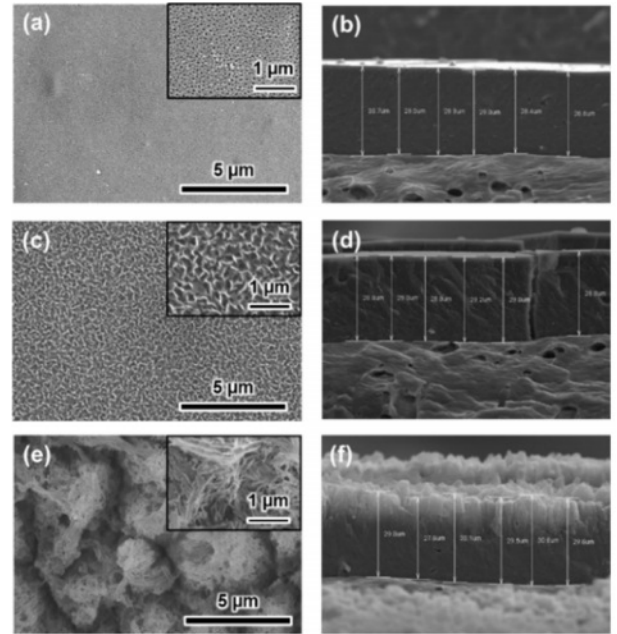


Fig. 5. SEM images of AAO surface morphology and thickness of (a, b) Nanohole, (c, d) Nanoflake (e, f) Nanofiber

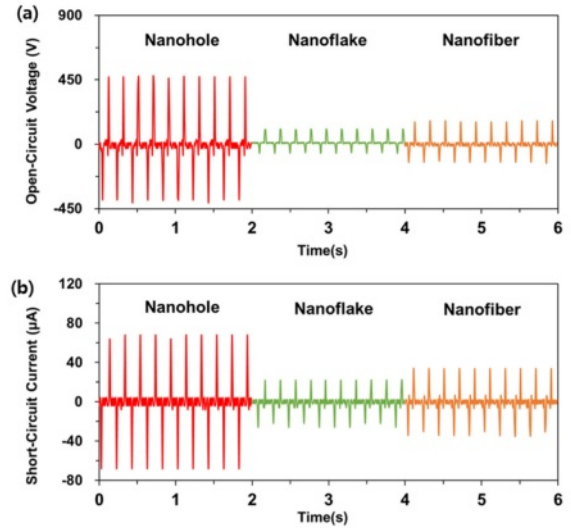
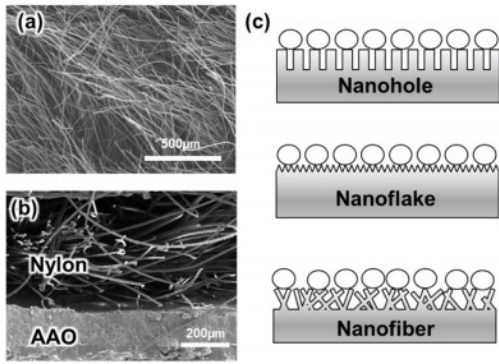


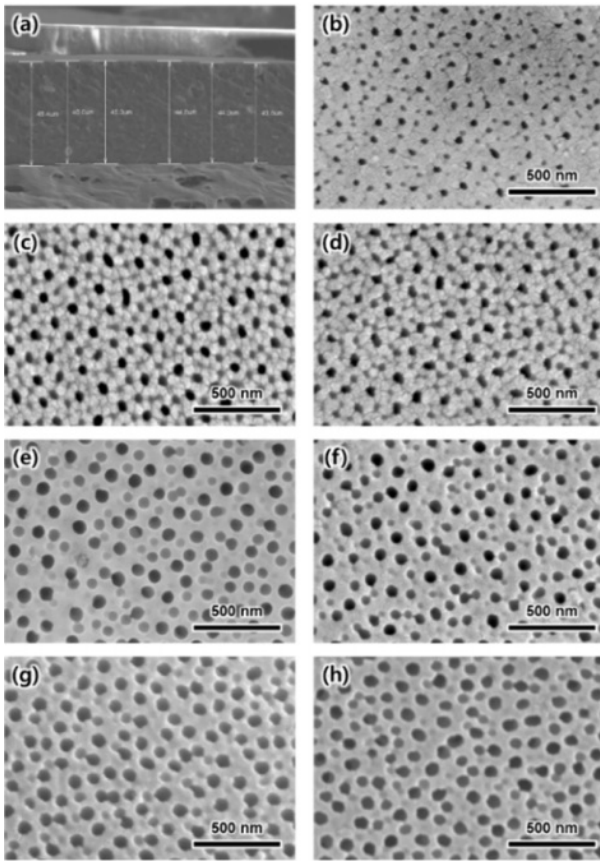
Fig. 6. Electrical output (a) voltage and (b) current of AAO with various structures

유와 더 많은 접촉 면적을 갖게 되어 발전량이 더 높게 측정된 것으로 보인다. 실험 결과에 따라, 단순히 접촉 재질의 표면 거칠기의 수치에 국한되지 않고 각 접촉 물질의 표면 거칠기 규모 차이도 발전량의 큰 요인으로 작용하는 것을 확인할 수 있다.

상대적으로 발전량이 우수하였던 나노 홀 구조의 양극 산화 알루미늄을 45 μm의 산화막을 갖도록 제작하고, 인산수용액을 통하여 홀 구배를 변경해가며 발전량 평가를 진행하였다. Fig. 8에서 확인할 수 있듯이, 인산 용액 침지



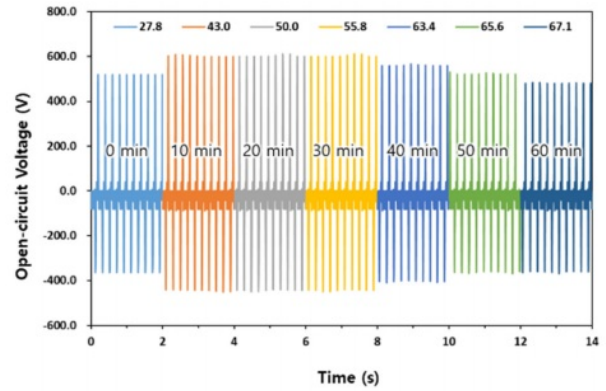
**Fig. 7.** SEM images of (a) Nylon and (b) contact of Nylon with AAO (c) Schematics of the contact of Nylon with AAO with various structures



**Fig. 8.** SEM images of (a) AAO thickness and surfaces by widening time (b) 0, (c) 10, (d) 20, (e) 30, (f) 40, (g) 50, (h) 60 min

시간에 따라 홀 직경 크기가 점차 넓어진다.

와이드닝을 진행함에 따라 변화하는 전압 발생량을 Fig. 9에 나타내었다. 홀 직경을 변화시키기에 따라, 최대 15% 정도의 전압 증가효과를 얻을 수 있었다. 와이드닝을 진행함에 따라 표면의 거칠기가 증가하나, 홀 사이즈가 증가함에 따라 산화막 층에서 높은 유전률을 갖는 양극산화 알루미늄



**Fig. 9.** Electrical output voltage of AAOs nanohole diameter by widening time (a) 0, (b) 10, (c) 20, (d) 30, (e) 40, (f) 50 and (g) 60

의 비율이 줄어들고 유전율이 낮은 홀에 해당하는 공기가 차지하는 비율이 증가하게 되어 일정이상 홀 직경이 커지면 발전량이 감소하는 것으로 보인다. 실험 결과를 통해, 양극산화 알루미늄을 적용함에 있어 홀 직경 조절을 통해서도 발전량을 증대시킬 수 있음을 제시할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 양극산화 알루미늄을 마찰대전 나노발전기에 적용함에 있어 산화막의 두께와 표면 형상이 발전량에 미치는 영향에 대해서 분석하였다.

양극산화 알루미늄의 두께를 증가시키기에 따라 최대 40% 전압 증가 효과를 확인할 수 있었으며, 이의 원인에 대하여 분석하였다. 또한, 양극 산화 알루미늄의 후처리 공정을 통해 다양한 표면 형상에서 발생하는 발전량을 확인하고, 단순히 표면 거칠기를 증가시키는 것만이 발전량에 증가에 영향을 미치는 것이 아니라는 것을 확인할 수 있었다. 추가적으로 나노 홀 구조의 홀 구배에 따른 발전량을 확인함으로써 홀 직경 조절에 따라 최대 약 15%의 발전량 증가를 볼 수 있음을 확인하였다.

이를 통하여 추후 마찰대전 나노발전기 제작에 양극산화 알루미늄을 활용함에 있어 발전량을 증대시킬 수 있는 방안을 제시할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 중견연구자지원사업의 연구비 지원(No. 2021R1A2C20086002011)에 의하여 연구과제로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

## REFERENCES

- Xu, Y., Min, G., Gadegaard, N., Dahiya, R., and Mulvihill, D.M., "A Unified Contact Force-dependent Model for Triboelectric Nanogenerators Accounting for Surface Roughness," *Nano Energy*, Vol. 76, 2020, 105067.
- Sriphan, S., and Vittayakorn, N., "Facile Roughness Fabrications and Their Roughness Effects on Electrical Outputs of the Triboelectric Nanogenerator," *Smart Materials and Structures*, Vol. 27, No. 10, 2018, 105026.
- Lee, J., and Hwang, W., "Theoretical Study of Micro/nano Roughness Effect on Water-solid Triboelectrification with Experimental Approach," *Nano Energy*, Vol. 52, 2018, pp. 315-322.
- Park, H.W., Huynh, N.D., Kim, W., Lee, C., Nam, Y., Lee, S., Chung, K., and Choi, D., "Electron Blocking Layer-based Interfacial Design for Highly-enhanced Triboelectric Nanogenerators," *Nano Energy*, Vol. 50, 2018, pp. 9-15.
- Menge, H.G., and Park, Y.T., "Application of Layer-by-Layer Assembly in Triboelectric Energy Harvesting," *Composites Research*, Vol. 35, No. 6, pp. 371-377.
- Yoo, D., Lee, S., Lee, J., Lee, K., Go, E.Y., Hwang, W., Song, I., Cho, S.B., Kim, D.W., Choi, D., Sim, J., and Kim, D.S., "Reliable DC Voltage Generation Based on the Enhanced Performance Triboelectric Nanogenerator Fabricated by Nanoimprinting-Poling Process and an Optimized High Efficiency Integrated Circuit," *Nano Energy*, Vol. 69, 2020, 104388.
- Cui, N., Gu, L., Lei, Y., Liu, J., Qin, Y., Ma, X., Hao, Y., and Wang, Z.L., "Dynamic Behavior of the Triboelectric Charges and Structural Optimization of the Friction Layer for a Triboelectric Nanogenerator," *ACS Nano*, Vol. 10, No. 6, 2016, pp. 6131-6138.
- Cui, S., Zhou, L., Liu, D., Li, S., Liu, L., Chen, S., Zhao, Z., Yuan, W., Wang, Z.L., and Wang, J., "Improving Performance of Triboelectric Nanogenerators by Dielectric Enhancement Effect," *Matter*, Vol. 5, 2022, pp. 180-193.
- Jang, S., Joung, Y., Kim, H., Cho, S., Ra, Y., Kim, M., Ahn, D., Lin, Z., and Choi, D., "Charge Transfer Accelerating Strategy for Improving Sensitivity of Droplet Based Triboelectric Sensors via Heterogeneous Wettability," *Nano Energy*, Vol. 97, 2022, 107213.
- Li, X., Zhang, L., Feng, Y., Zhang, X., Zhou, F., and Wang, D., "Solid-liquid Triboelectrification Control and Antistatic Materials Design Based on Interface Wettability Control," *Advanced Functional Materials*, Vol. 29, 2019, 1903587.
- Park, H.R., Lee, J., Kim, D.S., Sim, J., Song, I., and Hwang, W., "Arrangement Optimization of Water-driven Triboelectric Nanogenerators Considering Capillary Phenomenon between Hydrophobic Surfaces," *Scientific Reports*, Vol. 10, 2020, 1126.
- Choi, D., Kim, D.W., Yoo, D., Cha, K.J., La, M., and Kim, D.S., "Spontaneous Occurrence of Liquid-solid Contact Electrification in Nature: Toward a Robust Triboelectric Nanogenerator Inspired by the Natural Lotus Leaf," *Nano Energy*, Vol. 36, 2017, pp. 250-259.
- Yoo, D., Park, S., Lee, S., Sim, J., 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*, Vol. 57, 2019, pp. 424-431.
- Lee, J., Jeong, J., Yoo, D., Lee, K., Lee, S., Kim, D.S., Sim, J., and Hwang, W., "Pump Drill-integrated Triboelectric Nanogenerator as a Practical Substitute for Batteries of Intermittently Used Devices," *Nano Energy*, Vol. 56, 2019, pp. 612-618.
- Heo, Y., Kim, C., Kim, G., Lee, K., Hwang, W., and Lee, J.W., "Ventilator Integrated Triboelectric Nanogenerator Based on Structure of Centrifugal Brake," *Surfaces and Interfaces*, Vol. 27, 2021, 101525.
- Lee, S., Chung, J., Kim, D.Y., Jung, J., Lee, S.H., and Lee, S., "Cylindrical Water Triboelectric Nanogenerator via Controlling Geometrical Shape of Anodized Aluminum for Enhanced Electrostatic Induction," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 8, 2016, pp. 25014-25018.
- Lee, K., Lee, J., Kim, K., Yoo, D., Kim, D.S., Song, I., Sim, J., and Hwang, W., "A Spherical Hybrid Triboelectric Nanogenerator for Enhanced Water Wave Energy Harvesting," *Micromachines*, Vol. 9, No. 11, 2018, 598.
- Huang, C., Chen, G., Nashailan, A., and Chen, J., "Advances in Self-powered Chemical Sensing via a Triboelectric Nanogenerator," *Nanoscale*, Vol. 13, 2021, pp. 2065-2081.
- Yoo, D., Jang, S., Choi, D., and Kim, D.S., "A Liquid Triboelectric Series," *Advanced Materials*, 2023, <https://doi.org/10.1002/adma.202300699>.
- Park, C.H., Jeon, H.S., and Park, J.K., "A Study of Charging Properties and Triboelectric Series of Plastic by Tribocharging," *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 43, No. 6, 2006, pp. 560-569.
- Choi, J., Choi, J., and Hwang, W., "Miniature Millimeter-wave 5G Antenna Fabricated Using Anodized Aluminum Oxide for Mobile Devices," *ACS Omega*, Vol. 5, 2020, pp. 26206-26210.
- Kim, D., Park, H.C., Lee, K., and Hwang, W., "Superhydrophobic Engineered Surface Based on Nanohoneycomb Structures," *Composites Research*, Vol. 20, 2007, pp. 17-20.
- Cho, H., Kim, D., Lee, C., and Hwang, W., "A Simple Fabrication Method for Mechanically Robust Superhydrophobic Surface by Hierarchical Aluminum Hydroxide Structures," *Current Applied Physics*, Vol. 13, 2013, pp. 762-767.
- Kim, Y., Lee, S., Cho, H., Park, B., Kim, D., and Hwang, W., "Robust Superhydrophilic/hydrophobic Surface Based on Self-aggregated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanowires by Single-step Anodization and Self-assembly Method," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 4, 2012, pp. 5074-5078.
- Jo, Y., Lee, S., and Kim, K., "AAO Template Morphology Controlled by Variation of Anodizing Condition," *Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, Vol. 28, 2015, pp. 249-251.
- Niu, S., Wang, S., Lin, L., Liu, Y., Zhou, S.Y., Hu, Y., and Wang, Z.L., "Theoretical Study of Contact-mode Triboelectric Nanogenerators as an Effective Power Source," *Energy & Environmental Science*, Vol. 6, 2013, pp. 3576-3583.
- Zhang, H., Yao, L., Quan, L., and Zheng, X., "Theories for Triboelectric Nanogenerators: A Comprehensive Review," *Nanotechnology Reviews*, Vol. 9, 2020, pp. 610-625.