

AI-PDMS 마찰 발전기의 계면 구조가 에너지 발전 성능 향상에 미치는 영향

홍동우, 홍완곤, 김승훈, 이성남 

한국공학대학교 나노반도체공학과

Effect of Interface Structure on the Efficiency Enhancement of AI-PDMS Triboelectric Nanogenerator

Dong-Woo Hong, Wan-Gon Hong, Seung-Hun Kim, and Sung-Nam Lee

Department of Nano & Semiconductor Engineering, Tech University of Korea, Siheung 15073, Korea

(Received August 29, 2024; Revised October 2, 2024; Accepted October 2, 2024)

Abstract: Recent studies have focused on enhancing the efficiency of triboelectric nanogenerators (TENGs) using aluminum (Al) and polydimethylsiloxane (PDMS). This research investigates how surface morphology and material structure affect energy generation. By layering PDMS/Al and creating pyramid-shaped patterns, the study found that increasing the number of PDMS/Al layers significantly boosts the output voltage, reaching over 234 mV with three layers. Additionally, increasing the number of pyramid structures from 1 to 36 on PDMS surfaces, while maintaining the same contact area, led to a notable rise in generated voltage due to charge concentration at the pyramid tips. Higher pyramid angles also amplified this effect. These results highlight the importance of structural optimization in maximizing the energy output of TENGs, offering a promising route for more efficient energy harvesting.

Keywords: Triboelectric nanogenerator, PDMS, Al, Surface structure

최근 화석연료의 사용을 줄일 수 있는 방법인 에너지 하베스팅의 일종인 마찰 발전기에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다 [1-7]. 마찰 발전은 두 재료 간의 마찰로 인해 발생하는 전하를 이용하여 에너지를 생산하는 기술이다. 마찰 발전의 에너지 변환 효율을 극대화하기 위해서는 다양한 대전 특성을 가진 소재와 표면 패터닝 기술이 많이 연구되고 있다 [8-10]. 마찰 발전을 극대화하기 위해서는 양전하와 음전하 발생 특성 차이가 큰 재료들의 선정, 새로운 재료의 도입 및 나노 구조를 최적화하여 표면 마찰과 접촉 면

적을 증가시키는 방법들이 개발되고 있다 [11-14]. 기존의 다층 구조의 나노마찰발전소자는 음전하 친화도가 높은 재료끼리 또는 양전하 친화도가 높은 재료끼리 층을 쌓아 마찰 계면에서 생성되는 전하를 증가시키는 연구에 중점을 두었다 [15,16]. 그러나 본 연구에서는 반대 전하 친화도를 가진 재료들을 반복해서 수직 적층하고, 이를 전극으로 연결하여 접촉면적을 증가시킴으로써 차별성을 보인다. 본 연구에서는 상대적으로 가격이 저렴하고 강한 대전효과를 나타낼 수 있는 양대전체인 Al과 음대전체인 폴리디메틸실록산(polydimethyl siloxane, PDMS)을 선택하였다 [17]. PDMS는 투명하고 고무처럼 잘 휘다는 장점이 있기 때문에 양 대전체인 Al과의 접촉이 용이하여 마찰 발전에 최적화된 재료이다. 또한, PDMS의 제작 시 표면 구조를

✉ Sung-Nam Lee; snlee@tukorea.ac.kr

Copyright ©2025 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.

자유롭게 제어하여 마찰 발전 효율을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 또한, PDMS의 표면 구조의 변화뿐 아니라, 나노 복합체를 혼합하는 방법을 통해 마찰전기의 양을 늘리는 연구가 다양하게 진행되고 있다 [18-22]. 특히, 마찰 면적을 증가시키기 위한 표면 구조는 선형, 격자형 및 구형 돌출부등을 마이크로 패턴 공정을 통하여 형성하는 연구가 진행되고 있다 [23-25]. 본 연구에서는 여러 가지 패턴들 중에 피라미드 형태의 표면 구조 형태를 이용하여 마찰 발전기의 효율을 증가시킬 수 있는 최적 구조를 설계하고, 공정의 최적화를 통하여 AI-PDMS 마찰 발전기를 제작하고, 수직으로 마찰전기를 발생시킬 때 누르는 힘과 마찰면적 중 어떤 파라미터가 더 마찰전기 발생에 효과적인지 분석했다. 또한, 대전물질을 수직으로 쌓는 것이 마찰면적이 증가하는 효과를 보이는지 알아보기 위해 대전물질의 다층구조를 통해 마찰 전압의 세기를 측정하였다. 추가적으로 동일한 마찰면적일 때 피라미드의 꼭짓점 개수를 다르게 하여 꼭짓점에 전하가 농축되는 현상에 따른 마찰 전압의 세기를 측정하였다. 마찰 발전기는 본질적으로 표면에서 발생하는 전하의 이동을 통해 전압을 생성하는데, 그 과정에서 생성되는 전류는 상대적으로 미미한 수준으로, 기존의 전압 분석에 비해 신뢰성 있게 측정하기가 어렵다. 특히, 본 연구에서는 표면 구조 변화에 따른 표면 전하 밀도에 의해 전류보다 전압 변화가 더 명확하게 나타날 수 있기 때문에 마찰 전압을 중심으로 연구를 진행하였다.

양 대전체로는 15 μm 두께의 AI 박막을 사용하였고, 음 대전체인 PDMS 필름은 혼합 단계에서 PDMS를 경화제와 10:1 비율로 혼합한 후 혼합 시 생성된 기포를 제거하기 위해 용액을 진공용기에 넣은 후, 1시간 동안 용액 속의 기포를 제거하였다. 원하는 두께와 표면 구조를 형성하기 위한 몰딩 단계에서는 기포를 제거한 용액을 3D프린터로 제작한 몰드 위에 붓는다. 마지막으로 경화 단계에서 몰드에 담긴 용액을 100°C에서 1시간 동안 경화시킨 후 PDMS 필름을 몰드에서 분리하였다. 특히, PDMS 필름을 형성하기 위해 3D 프린터로 몰딩을 제작하여 거친 표면과 매끄러운 표면을 그림 1(a)와 같이 구현할 수 있었다. PDMS를 몰드를 통해 제작할 때, 몰드의 바닥이 막힌 면은 3D프린터의 성능의 한계 때문에 그림 1(a)의 왼쪽 사진을 보면 표면이 울퉁불퉁하다. 따라서 이와 같은 몰드로 제작한 PDMS의 면은 고르지 않기 때문에 R(rough)-PDMS라고 명명했다. 반면에 바닥이 뚫려 있는 몰드로 제작한 PDMS는 그림 1(a)의 오른쪽 사진처럼 평평하기 때문에 S(smooth)-PDMS라고 명명했다. 또한, 표면 구조를 삼각형태와 사각 형태의 피라미드 구조로 형성하였으며, 24.6도의 삼각형태의 PDMS의 두께를 2 mm에서 6 mm까지 변화하였고,

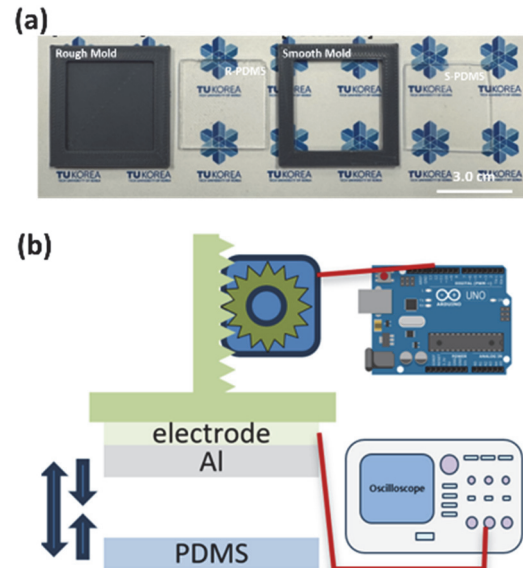


Fig. 1. (a) Images of the R-mold and S-mold fabricated by a 3D printer to form R-PDMS and S-PDMS and (b) schematic of the device and measurement apparatus used to measure the vertical contact friction generation voltage of the AI-PDMS friction generator.

삼각형태의 각을 24.6°에서 34.9°로 변화하였다. 또한, 삼각형태의 PDMS를 AI/PDMS의 다층막을 형성하였다. 추가적으로 사각 피라미드의 크기와 개수를 조절하며 발전 전압을 측정하였다. AI과 PDMS 두 대전체를 접촉하여 발전 전압을 측정하기 위해 전극으로는 Cu 필름을 PDMS와 AI 필름에 부착하였다. 또한, AI-PDMS 마찰 발전기를 수직으로 접촉 및 분리 과정을 반복하여 마찰 발전 전압을 측정하기 위하여 그림 1(b)과 같이 수직 왕복장치를 사용하였다. 마찰 대전물질 2개 중 하나인 PDMS 필름을 바닥에 고정시키고, AI 필름은 수직압력장치에 고정시킨 후 구리 테이프를 사용하여 측정장치에 연결하였다. 발생 전압을 측정할 때 노이즈를 최소화하기 위하여 두 전선 중 하나는 구리전극에 연결하고 나머지 하나는 접지시켰다 [26]. 수직 접촉 운동 시 시간에 따른 발생 전압을 측정하기 위하여 오실로스코프를 사용하여 발생 전압의 변화를 확인했다.

그림 2(a)는 rough-PDMS로 24.6°를 갖는 삼각지붕의 형태의 2 mm, 4 mm, 6 mm 두께로 PDMS 필름과 일정 두께의 AI 필름으로 제작된 마찰 발전기의 단면 개략도를 그림 2(a)에 나타내었다. 특히, 그림 2(b)는 각기 다른 두께의 삼각 지붕형으로 몰딩 된 PDMS 필름사진을 나타내었다. 그림 2(d)는 2 mm 두께의 삼각 지붕형 PDMS와 AI 필름을 수직 접촉을 이용하여 얻은 시간에 따른 발생 전압을 나타낸 것이다. 접촉 시 양의 전압과 분리 시 음의 전압이 주기적으로 잘 발생하는 것으로 삼각 지붕 형태의 PDMS-

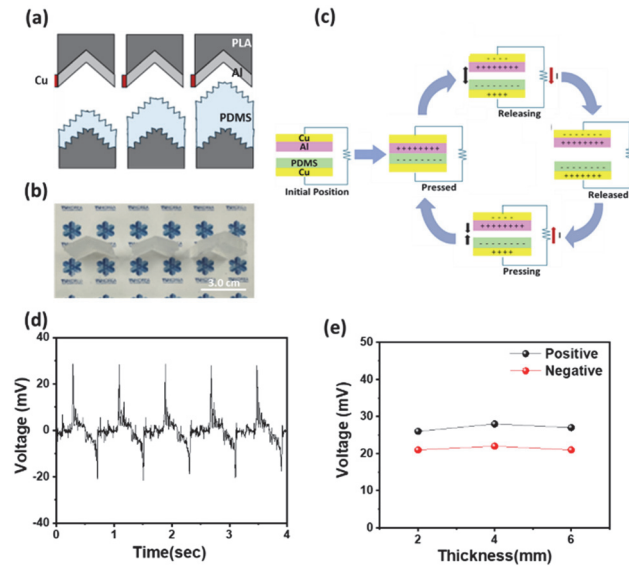


Fig. 2. (a) Cross-section of TENG structures, (b) photo of fabricated PDMS, (c) operation mechanism of vertical TENG system [28], (d) time-dependent friction voltage of 2 mm PDMS-Al TENG, and (e) friction voltage of Al-PDMS TENG as a function of the thickness of PDMS, ranging from 2 mm to 6 mm.

Al 마찰 발전기는 잘 작동하고 있음을 나타내고 있다. 그림 2(c)는 대전현상과 정전기 유도현상을 이용하여 Al-PDMS 마찰발전기 발전기의 작동순서에 따른 발전원리를 나타낸 것이다. 노란색 영역은 구리 전극, 분홍색 영역은 양 대전물질인 Al 박막, 초록색 영역은 음 대전물질인 PDMS를 나타내고 있다. 우선, PDMS와 Al 대전물질끼리 서로 접촉하면서 대전현상에 의해 서로 다른 극성을 띠게 된 상태를 나타내고 있다. 이후, 두 대전물질을 분리하였을 때 정전기 유도현상에 의해 각 층에 전위차가 발생하여 전자가 이동하면서 전류가 흐르게 된다 [27]. 전자가 전위차에 의해 이동했기 때문에 전위차를 상쇄시키면서 전류가 더 이상 흐르지 않는 0 V가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 대전물질과 중성을 이루기 위해 전극에 있던 전하가 같은 극의 대전물질과 가까워지면서 전기적 척력에 의해 전하가 이동하게 된다. 이때 흐르는 전류의 방향은 반대로 그림 2(d)와 같이 음의 전압이 관찰되었다. 그림 2(e) 삼각 지붕 형태의 rough-PDMS의 두께를 2 mm, 4 mm, 6 mm로 증가한 음의 대전체와 Al 필름을 대전물질로 사용하여 마찰 전압을 측정한 그래프이다. 2 mm 두께의 PDMS 필름과 Al 필름으로 구성된 마찰 발전기의 26 mV의 양 전압과 20 mV의 음 전압을 확인하였고, PDMS 필름의 두께가 4 mm일 때는 양 전압 28 mV, 음 전압 21 mV로 약하게 증가하는 것을 확인하였다. 하지만 PDMS 두께가 6 mm로

증가하였을 때는 양 전압 27 mV, 음 전압 20 mV로 큰 변화를 확인할 수 없었다. 일반적으로 마찰 발전기는 표면 전하 이동에 의존하기 때문에 PDMS 두께가 일정 수준을 넘으면 전하가 내부로 더 이상 깊이 이동하지 않아 두께 증가가 전압에 큰 영향을 주지 않을 수 있다. 6 mm 이상의 두께에서는 전하 전도 거리가 제한적이며, 접촉 면적이 효과적으로 증가하지 않을 수 있다. 두께가 두꺼워지면 기계적 변형과 접촉 압력 변화로 접촉 효율이 떨어질 가능성도 있으며, 4 mm에서 전하 생성이 포화 상태에 도달했을 수 있어 두께 증가가 전압에 크게 기여하지 않을 수 있다. 따라서 일정한 Al 필름 두께 하에서 음 대전체인 PDMS의 두께가 2 mm에서 6 mm으로 변화하였을 때 마찰 발전이 크게 영향을 미치지 않는다는 뜻으로, PDMS 필름의 두께보다는 마찰이 직접적으로 발생하는 표면에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

PDMS의 표면 구조에 의한 마찰 발전 특성을 분석하기 위해 0.5 mm 두께의 PDMS를 사용하여 삼각 지붕형 S-PDMS와 R-PDMS 필름을 이용한 Al-PDMS 마찰 발전기의 단면 개략도를 그림 3(a)에 나타내었고, 제작된 S-PDMS와 R-PDMS 필름을 그림 3(b)에 나타내었다. 그림 3(c)와 (d)는 Al/S-PDMS와 Al/R-PDMS 마찰 발전기들의 시간에 따른 마찰 전압 발생에 대한 그래프이다. S-PDMS의 경우 67 mV의 양 전압과 96.5 mV의 음 전압을 나타낸 반면, P-PDMS는 61 mV의 양 전압과 55 mV의 음 전압을 나타내었다. 양 전압은 S-PDMS가 R-PDMS에 비해 소폭 높게 나오는 모습을 확인할 수 있다. 음 전압은 S-PDMS가 R-PDMS 구조보다 큰 폭으로 높게 나오지만 매우 불규칙적인 모습을 확인할 수 있다. 또한, S-PDMS의 경우 양 전압이 형성되면 일정 시간 유지되는 것을 나타낸 반면에서 음에 전압에서는 R-PDMS와 유사하게 매우 빠른 전압 생성과 소멸과정이 나타나고 있다. 일반적으로 그림 2(c)와 같이 대전물질끼리 접촉할 때 양 전압이 나오고 떨어질 때 음 전압이 나온다. S-PDMS는 Al과 접촉한 이후 떨어질 때 접촉력에 의해 더 강하게 떨어진다. 그 이유는 본 연구에서 사용된 PDMS가 딱딱하게 경화되지 않고 힘 및 탄성 특성과 표면 접촉력을 가지는데 평평한 표면을 갖기 때문에 거친 표면보다 Al과 더 잘 흡착되었다가 분리되는 특성을 보인다. 분리 시 한 번에 강하게 떨어지기 때문에 더욱 강한 마찰 전압이 발생하게 되는 것으로 판단된다. 또한, 삼각 지붕의 각도를 24.6°에서 39.7°까지 변화하여 제작된 S-PDMS와 R-PDMS를 이용한 Al-PDMS 마찰 발전기의 마찰 전압을 각각 그림 3(e)와 (f)에 나타내었다. 삼각 지붕의 각도가 24.6°, 33.6°, 39.7°로 증가함에 따라 S-PDMS의 마찰 발전기는 각각 최대 양 전압이 33 mV

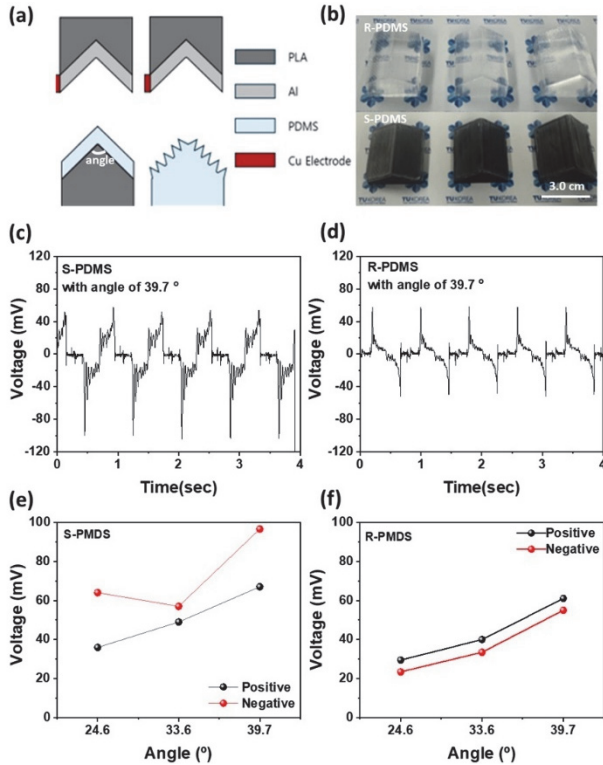


Fig. 3. (a) Cross-section of TENG structures and (b) Fabrication of flat S-PDMS and R-PDMS according to angle. (c), (d) Triboelectric voltage of (c) S-PDMS and (d) R-PDMS as a function of periodical contact time. (e), (f) Triboelectric voltage of (c) S-PDMS and (d) R-PDMS with 39.7° angles of triangle roofs.

에서 63 mV를 선형적으로 증가하였고, R-PDMS의 마찰 발전기는 29 mV에서 60 mV로 증가하였다. 하지만 S-PDMS의 음 전압은 양 전압보다 높은 값을 나타내었지만, 삼각 지붕의 각도보다는 PDMS의 접착 및 분리과정에 더 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다. 하지만 R-PDMS의 경우 음 전압은 양 전압보다 약간 낮은 값을 갖지만, 각도가 증가할수록 선형적으로 증가하는 특성을 나타내었다. 이는 표면이 거친 PDMS가 Al과 접촉 및 분리가 표면의 기하학적 특성이 잘 반영되는 구조로 판단된다. 추가적으로 삼각 지붕의 각도가 24.6°, 33.6°, 39.7°일 때 마찰면적은 평면에 비해 각각 10%, 20%, 30% 늘어난다. 하지만 힘은 벡터의 성질을 가지기 때문에 평면에서 수직압력을 1.0 F라고 가정했을 때, 대전물질에 수직으로 가해지는 힘은 24.6°에서 0.91 F, 33.6°에서 0.83 F, 39.7°에서 0.77 F이다. 이처럼 PDMS의 삼각 지붕 각도가 증가하여 대전물질에 가해지는 수직 힘이 감소함에도 불구하고 S-PDMS구조와 R-PDMS구조에서 각도가 증가함에 따라 마찰 전압이 증가하는 현상은 가해지는 힘보다 대전체의 마찰 면적이 더

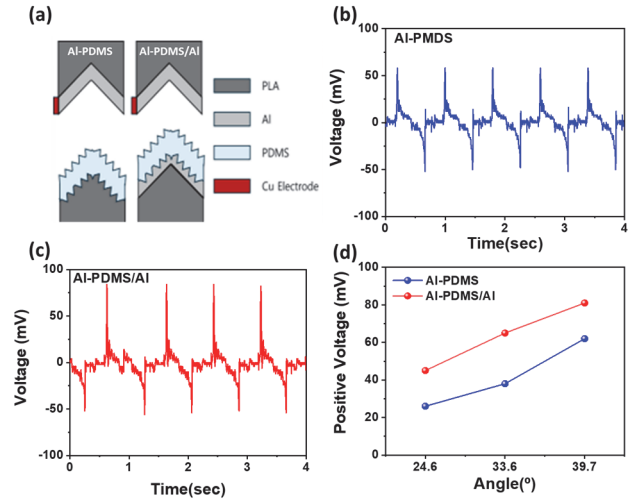


Fig. 4. (a) Schematic diagram of Al-PDMS and Al-PDMS/Al TENG with R-PDMS films. (b), (c) Triboelectric voltage of (b) Al-PDMS and (c) Al-PDMS/Al TENG as a function of periodical contact time. (d) Triboelectric voltage of (b) Al-PDMS and (c) Al-PDMS/Al TENGs with different angles of triangle roofs.

욱 중요한 변수가 될 수 있음을 확인하였다.

그림 4(a)는 Al-PDMS와 Al-PDMS/Al, 즉 음 대전체에 Al필름을 추가적으로 부착한 양면접촉 구조와 PDMS로만 구성된 마찰 발전기에 대한 단면 개략도이다. 그림 4(b)와 (c)는 삼각 지붕각도가 39.7°일 때 Al-PDMS와 Al-PDMS/Al에 대한 시간에 따른 마찰 전압을 나타낸 그래프이다. Al-PDMS의 경우 56.7 mV의 양의 전압이 관찰된 반면, Al-PDMS/Al의 경우 85 mV로 크게 증가한 것을 확인하였다. 이는 PDMS/Al 이중구조는 화학적 결합이 아닌 물리적 결합을 하기 때문에 수직 접촉 공정에 있어서 상대적으로 미약하나마 PDMS/Al에서 마찰 전압이 추가적으로 생성되어 이중 구조인 Al-PDMS/Al이 Al-PDMS보다 높은 마찰 전압을 얻을 수 있었을 것으로 판단된다. 또한, 삼각 지붕의 각도가 24.6°에서 39.7°로 증가할수록 Al-PDMS는 22 mV에서 59 mV로 증가하였고, Al-PDMS/Al은 이보다 더 큰 43 mV에서 81 mV로 전 영역에서 증가하는 것을 확인하였다. 이는 모든 각에서도 Al-PDMS보다 Al-PDMS/Al 구조에서 마찰 면이 추가적으로 형성되어 높은 마찰 전압을 형성하는 것으로 판단된다.

그림 5(a)는 음 대전체인 PDMS에 PDMS/Al 다층 필름을 1회에서 3회까지 반복하였을 때 마찰 전압 특성을 나타낸 것이다. PDMS/Al층으로만 구성되었을 때의 마찰 전압은 53 mV로 확인되었는데, PDMS/Al이 2회, 3회로 반복이 증가함에 따라 122 mV와 234 mV로 급격히 증가하는 것을 확인하였다. 이는 앞서 결과와 마찬가지로 PDMS와

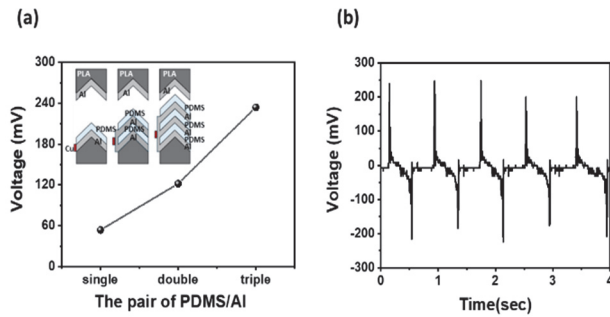


Fig. 5. (a) Triboelectric voltage of Al-n×(PDMS/Al) TENGs with different the number of pairs of PDMS/Al film [inset shows the schematic diagram of Al-n×(PDMS/Al) TENGs] and (b) triboelectric voltage of Al-n×(PDMS/Al) TENGs as a function of periodical contact time.

Al의 계면에서 모두 대전되었으며, 하부에 존재하는 PDMS/Al이 병렬로 연결되어 있기 때문에 대전된 모든 전하가 전압으로 이어져 PDMS/Al층이 증가할수록 마찰 전압이 선형적으로 증가하는 것으로 판단된다. PDMS/Al층이 늘어날수록 전압의 상승의 폭이 늘어난 층의 배수보다 컸다. 단일 적층일 때는 마찰되는 부분이 마찰 계면이 한 면이지만 이중 적층일 때는 3면, 삼중 적층일 때는 5면이기 때문이라고 판단된다. 그림 5(b)는 Al과 3회 반복된 PDMS/Al 필름에서 발생된 마찰 전압으로 양의 전압과 음의 전압 모두 균일하게 200 mV 이상의 높은 전압이 발생하는 것으로 비대칭적인 Al-n (PDMS/Al) 구조이지만 발생전압은 대칭적으로 발생하는 현상을 확인하였다.

이전까지의 PDMS의 형태를 삼각 지붕의 형태로 구성하였지만, 표면적과 접촉점을 증가하는 데 한계가 있기 때문에 그림 6(a)와 같이 PDMS 표면을 3D 모양인 피라미드 형태로 설계하여 다양한 각도(24.6~39.7°)와 개수(1~36개)를 가진 PDMS 필름을 그림 6(b)와 같이 제작했다. 수평으로부터의 피라미드의 각도가 같으면 뿔의 개수가 달라도 피라미드의 총 표면적은 같은 점을 이용하여 마찰면적이 동일할 때 전하 응축현상이 마찰 전압에 어떤 영향을 주는지 확인했다. 그림 6(c)는 피라미드의 개수가 1개에서 36개까지 증가할수록 발생하는 마찰 전압이 증가하는 현상을 나타내고 있다. 이는 마찰 면적이 같다면 피라미드 뿔의 개수가 많을수록 피라미드 끝에 전하가 몰리는 전하 응축 현상이 많이 일어났기 때문에 마찰 전압이 증가한 것으로 판단된다 [29]. 또한, 피라미드의 각이 24.6°일 때 피라미드 1개당 평균 양 전압과 음 전압 증가량은 각각 1.58 mV, 1.2 mV였다. 39.7°일 때 피라미드 1개당 평균 양 전압과 음 전압 증가량은 각각 2.08 mV, 1.84 mV로 각도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. 이는 전하 농

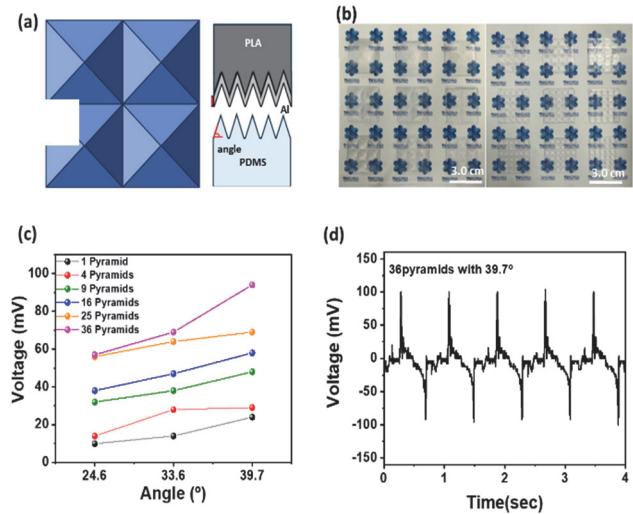


Fig. 6. (a) Schematic diagram and (b) photographic images of Al-pyramid TENGs with different pyramid sizes and roof angles. Triboelectric voltage of (c) Al-pyramid PDMS with different number of pyramids as a function of the angle of pyramid Triboelectric voltage of (d) triboelectric voltage of Al- 36 pyramid PDMS TENGs with pyramid angle of 39.7° as a function of periodical contact time.

축 현상은 피라미드의 각도가 높을수록 더욱 강화되었음을 알 수 있었다. 그림 6(d)는 39.7°을 갖는 36개의 피라미드 PDMS-Al의 마찰 전압으로 양 전압 및 음 전압 모두 균일하게 100 mV 정도의 높은 마찰 전압을 얻는 것을 확인하였다.

요약하면, 본 연구에서는 마찰전기 발전기의 효율을 높이기 위해 PDMS/Al 구조를 다양한 방식으로 최적화했다. 연구 결과, PDMS와 Al의 다층 구조를 사용하면 마찰 면적이 증가하여 발전 전압이 크게 상승함을 확인할 수 있었다. 예를 들어, PDMS/Al을 3층으로 쌓았을 때 234 mV 이상의 높은 전압이 발생했으며, 이는 단층 구조에 비해 전압이 크게 증가한 수치이다. 또한, 표면에 피라미드 모양의 구조를 형성하여 마찰 면적과 접촉점을 증가시킨 결과, 피라미드의 개수가 증가할수록 전하 농축 현상이 강해져 발전 전압이 더 높아졌다. 특히, 피라미드의 각도가 클수록 이러한 전하 농축 효과가 더욱 두드러졌다. 하지만 본 연구에서 얻은 낮은 마찰 전압은 PDMS와 Al은 전하 생성 효율이 낮아 다른 마찰 발전기에 비해 상대적으로 낮은 뿐 아니라, 사용된 PDMS 두께가 두꺼워짐에 따라 기계적 변형이 발생해 접촉 효율이 감소하고, 전하가 PDMS 내부로 깊이 이동하지 못해 낮은 마찰 전압 효율이 발생한 것으로 추측된다. 따라서 본 연구에서는 마찰전기 발전기의 효율을 극대화하기 위해서는 소재의 두께와 표면 구조의 최적화가 중요하다는 것을 확인할 수 있었다.

ORCID

Sung-Nam Lee

<https://orcid.org/0000-0002-4800-5199>

감사의 글

본 연구는 중소벤처기업부 중소기업기술정보진흥원에
서 주관하는 창업성장 기술개발사업 과제(RS-2024-
00467765)의 지원으로 수행된 연구 결과이다.

REFERENCES

- [1] Z. Ren, L. Wu, Y. Pang, W. Zhang, and R. Yang, *Nano Energy*, **100**, 107522 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107522>
- [2] Y. Zou, V. Raveendran, and J. Chen, *Nano Energy*, **77**, 105303 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105303>
- [3] J. Tian, X. Chen, and Z. L. Wang, *Nanotechnology*, **31**, 242001 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab793e>
- [4] U. Khan and S. W. Kim, *ACS Nano*, **10**, 6429 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsnano.6b04213>
- [5] J. Lee, S. Na, and D. Choi, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **37**, 106 (2024).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.1.15>
- [6] D. Park, H. Park, and J. H. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 93 (2023).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.1.15>
- [7] K. Cha, D. Heo, and S. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **35**, 98 (2022).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.1.15>
- [8] M. Seol, S. Kim, Y. Cho, K. E. Byun, H. Kim, J. Kim, S. K. Kim, S. W. Kim, H. J. Shin, and S. Park, *Adv. Mater.*, **30**, 1801210 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201801210>
- [9] S. Pan and Z. Zhang, *Friction*, **7**, 2 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0217-7>
- [10] H. J. Choi, J. H. Lee, J. Jun, T. Y. Kim, S. W. Kim, and H. Lee, *Nano Energy*, **27**, 595 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.08.014>
- [11] X. Cheng, Z. Song, L. Miao, Z. Su, Y. Song, and H. X. Zhang, *J. Microelectromech. Syst.*, **27**, 106 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2017.2778735>
- [12] S. H. Shin, Y. H. Kwon, Y. H. Kim, J. Y. Jung, M. H. Lee, and J. Nah, *ACS Nano*, **9**, 4621 (2015).
doi: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.5b01340>
- [13] W. Yang, X. Wang, H. Li, J. Wu, Y. Hu, Z. Li, and H. Liu, *Nano Energy*, **57**, 41 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.12.029>
- [14] M. L. Seol, S. H. Lee, J. W. Han, D. W. Kim, G. H. Cho, and Y. K. Choi, *Nano Energy*, **17**, 63 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.08.005>
- [15] Z. H. Lin, G. Cheng, X. Li, P. K. Yang, X. Wen, and Z. L. Wang, *Nano Energy*, **15**, 256 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.04.037>
- [16] J. J. Shao, W. Tang, T. Jiang, X. Y. Chen, L. Xu, B. D. Chen, T. Zhou, C. R. Deng, and Z. L. Wang, *Nanoscale*, **9**, 9668 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1039/C7NR02249B>
- [17] C. K. Chung and K. H. Ke, *Appl. Surf. Sci.*, **508**, 145310 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145310>
- [18] R. Zhang, J. Örtengren, M. Hummelgård, M. Oslen, H. Andersson, and H. Olin, *Nanotechnology*, **33**, 212003 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac4b7b>
- [19] W. He, M. Sohn, R. Ma, and D. J. Kang, *Nano Energy*, **78**, 105383 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105383>
- [20] J. S. Im and I. K. Park, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10**, 25660 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsmi.8b07621>
- [21] G. Q. Gu, C. B. Han, J. J. Tian, C. X. Lu, C. He, T. Jiang, Z. Li, and Z. L. Wang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 11882 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsmi.7b00230>
- [22] T. M. Kim, H. W. Kim, J. H. Yoon, M. H. Kim, D. B. Jeon, D. C. Choi, and S. N. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 531 (2023).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.5.15>
- [23] K. C. Pradel and N. Fukata, *Nano Energy*, **83**, 105856 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105856>
- [24] M. Muthu, R. Pandey, X. Wang, A. Chandrasekhar, I. A. Palani, and V. Singh, *Nano Energy*, **78**, 105205 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105205>
- [25] D. Kim, S. B. Jeon, J. Y. Kim, M. L. Seol, S. O. Kim, and Y. K. Choi, *Nano Energy*, **12**, 331 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.01.008>
- [26] W. Akram, Q. Chen, G. Xia, and J. Fang, *Nano Energy*, **106**, 108043 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.108043>
- [27] L. Lin, Y. Xie, S. Niu, S. Wang, P. K. Yang, and Z. L. Wang, *ACS Nano*, **9**, 922 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1021/nn506673x>
- [28] J. H. Jung, D. M. Lee, Y. J. Kim, and S. W. Kim, *Ceramist*, **22**, 110 (2019).
doi: <https://doi.org/10.31613/ceramist.2019.22.2.03>
- [29] I. B. Kulagina, V. I. Kukushka, and S. M. Korogod, *Neurophysiology*, **43**, 77 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1007/s11062-011-9191-7>