

3차원 기공구조를 이용한 정전기반 에너지 하베스팅 나노발전기 소자제조

전상헌¹ · 정정확² · 홍석원^{1,2,†}

¹부산대학교 인지메카트로닉스공학과

²부산대학교 광메카트로닉스공학과

3D Porous Foam-based Triboelectric Nanogenerators for Energy Harvesting

Sangheon Jeon¹, Jeonghwa Jeong², and Suck Won Hong^{1,2,†}

¹Department of Cogno-Mechatronics Engineering, College of Nanoscience and Nanotechnology, Pusan National University, 30 Jangjeon-dong, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

²Department of Optics and Mechatronics Engineering, College of Nanoscience and Nanotechnology, Pusan National University, 30 Jangjeon-dong, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

(Received December 3, 2018: Corrected January 9, 2019: Accepted March 21, 2019)

초 록: 본 연구에서는 3차원 기공구조를 지닌 금속 및 고분자 소재를 이용한 수직 마찰모드의 정전기반 나노발전기 (triboelectric nanogenerator, TENG) 제조기술을 소개하고 이에 관한 응용 연구를 수행하였다. 다양한 장점을 지닌 3차원 기공구조를 활용하여 설계된 간단하며 효율적인 나노발전기로, 반복적인 접촉/분리를 통해, 120 V에 이르는 순간 전압특성과 최대 출력 0.74 mW/m²을 획득하였다. 실제적인 응용 연구로 48개의 발광소자 구동 실험을 실시하였으며, 저전력 소비 전자소자 장치로의 응용 확장성을 확인하기 위해 회로 구성을 통한 커패시터 축적기능을 확인하였다. 본 연구에서 소개하는 정전기반 에너지 하베스팅 기술은 매우 경제적으로 제조할 수 있는 실용적인 접근방식으로, 반복적으로 가해지는 마찰에 의한 정전력을 효율적으로 획득하여 가까운 미래에 자가발전(self-powered)형 소형 전기소자 구동, 휴대형 전자기기 및 대규모의 전자 발전 장치에 적용 가능할 것으로 기대된다.

Abstract: Here, we present a facile route to fabricate a vertically stacked 3D porous structure-based triboelectric nanogenerator (TENG) that can be used to harvest energy from the friction in a repetitive contact-separation mode. The unit component of TENG consists of thin Al foil electrodes integrated with microstructured 3D foams such as Ni, Cu, and polyurethane (PU), which provide advantageous tribo-surfaces specifically to increase the friction area to the elastomeric counter contact surfaces (i.e., polydimethylsiloxane, PDMS). The periodic contact/separation-induced triboelectric power generation from a single unit of the 3D porous structure-based TENG was up to 0.74 mW/m² under a mild condition. To demonstrate the potential applications of our approach, we applied our TENGs to small-scale devices, operating 48 LEDs and capacitors. We envision that this energy harvesting technology can be expanded to the applications of sustainably operating portable electronic devices in a simple and cost-effective manner by effectively harvesting wasted energy resources from the environment.

Keywords: Triboelectric, Nanogenerator, Energy harvesting, 3D foam, PDMS

1. 서 론

신재생 에너지기술로 대표되는 에너지 획득에 관한 패러다임의 전환은 대전력 전기에너지 뿐 만 아니라, 저전력으로 구동이 가능한 이동형 전기소자에 이용 가능한 전기에너지원의 기술 개발 또한 끊임없이 요구하고 있다. 우리가 현재 사용하고 있는 소형 전자기기들의 구동을 위

한 에너지원으로는 이차전지 기술이 가장 발전된 형태이며 유·무기 태양전지 또는 열전재료를 이용한 자가발전 기술은 대체 에너지의 필요성이 증가함에 따라 많은 주목을 받아왔다. 또한 자연에서 버려지는 에너지를 전기에너지로 변환시키는 에너지 하베스팅 기술로는 바람을 이용한 풍력 발전과 과도로부터 전기에너지를 생산해내는 압전소재 기반의 발전장치가 있다. 이러한 기술들은

[†]Corresponding author
E-mail: swhong@pusan.ac.kr

© 2019, The Korean Microelectronics and Packaging Society

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.

차세대 에너지 수확 기술로 잘 알려져 있으며, 점진적으로 개발되고 있는 추세이다.¹⁻³⁾ 기계적 에너지를 전력으로 전환하는 새로운 발전방식 중 하나인 압전 나노발전기(piezoelectric nanogenerator)는 마이크로 및 나노 스케일 범위의 작동환경에서 에너지를 수확하여 소형 전자기기 및 환경 모니터링, 사물인터넷(internet of things, IoT)의 구동을 가능하게 하였으며, 뛰어난 안정성과 성능을 갖춘 미래형 자가전원공급 에너지원으로의 큰 잠재력을 지니고 있다. 이에 더하여 최근에는 정전기 기반 에너지 하베스팅 기술이 소개되고 있는데, 정전기 효과를 이용한 나노발전기(triboelectric nanogenerator, TENG)는 두 개의 서로 다른 물질의 간단한 접촉을 통해 물질에서 전하들이 서로 다른 전하로 대전되는 전기 이중층을 발생시킴으로써 전위차에 의한 전하 이동을 유도해내는 매우 간단한 방식이다. 이 기술은 다른 자가발전 방법에 비교해 에너지 밀도가 높다는 장점이 있으며, 기존의 압전소자에서 수확되는 출력보다 좀 더 향상된 성능을 보이고 있다.⁴⁻⁷⁾ 정전기 기반 에너지 획득 구동 방식으로는 나노발전기 설계 기술에 따라, 수직 접촉-분리 모드(vertical contact-separation mode), 측면 슬라이딩 모드(lateral sliding mode) 그리고 단일 전극 모드(single electrode mode)와 같은 다양한 작동 방식이 있으며, 응용 범위의 확장으로 자체구동 능동센서 및 화학센서, 인체의 움직임 측정, 불규칙한 환경 진동의 에너지 수확 및 유체 흐름 기반의 발전기를 포함하는 다양한 전기/전자 장치에 적용이 가능하다.⁸⁻¹¹⁾ 특히, 최근 들어 나노소재 및 구조설계기술의 발전으로 인해 정전기 기반 에너지 하베스팅 분야의 연구가 매우 급속도로 발전하고 있으며, 미세 반도체공정 및 벌크 가공공정을 통해 최적화된 소자 설계 및 회로 설계기술 개선으로 인한 우수한 출력 획득의 연구결과가 지속적으로 보고되고 있다.¹⁰⁾ 초기 마찰전기 발전기 모델은 소형의 휴대 전자기기에 마이크로 스케일의 자가전원을 공급하는 방향으로 제안되었으며,¹¹⁻¹²⁾ 독특한 디자인으로 고안된 나노발전기 제조기술 개발을 통해 다양한 물질구조를 이용한 에너지를 획득하는 독보적인 자가발전 나노발전기(self-powered nanogenerator) 연구분야가 새로이 구축되었다. 따라서 자연에 존재하는 다양한 에너지원을 효율적으로 이용하여 산업적 생산성을 부여할 수 있는 마찰전기 획득 시스템에 대한 활발한 연구가 전 세계적으로 진행되고 있는데, 이의 현실적인 응용으로는 웨어러블 기반 자가발전 시스템에 관한 관심이 증가함에 따라, 신체 부착이 가능한 고기능성 자가발전에 대한 기술 개발이 기대되고 있다.¹²⁻¹⁶⁾ 마찰 에너지를 이용하는 나노발전기가 자가발전 시스템으로서 구현되기 위해서는 안정적인 구동 범위내에서 내구성을 가져야 하는데, 현재 보고되고 있는 나노발전기는 비교적 낮은 압력(~2-10 KPa) 내에서 운용 되므로 최소한 요구되는 내구 기준강도를 정함으로써 소재 선택이 가능하다. 따라서 사람 및 자동차의 진동

에 의한 발전 및 내구성이 특별히 요구되지 않는 구조물, 또는 성능저하환경을 제외한다면 다양한 환경에서의 실제 응용이 가능하다.

본 연구에서는 효율적이고 경제적인 마찰전기 나노발전기(TENG)의 제작을 위해, 최근 많은 주목을 받고 있는 마이크로 3차원 기공구조(porous structure)의 금속 소재를 이용하였으며, 최소의 요구조건을 만족하는 소재(compressive strength, Ni foam: ~20MPa, Cu foam: ~20-30MPa)를 선택하여 효율적으로 응용하였다. 또한 기존의 평평한 형상의 금속 필름 보다 비표면적이 넓은 다공성(area density: ~1150 g/cm², geometric surface area: ~7.8 m²/l)의 장점을 효과적으로 적용하여, 수직 접촉-분리 모드에서 표면 전하의 높은 수확 성능을 보여주었다. 실험을 통해 확인된 마찰전기 수확을 위한 3차원 기공 물질기반의 나노발전기는 서로 다른 극성을 갖는 물질 계면에서 주기적인 접촉 분리에 의한 효율적인 출력 밀도 향상을 보여주었으며, 내부 회로의 마찰 대전 및 외부 회로의 정전기 유도를 통해 기계적 에너지를 전기 신호로 변환할 수 있는 자가전원 공급장치를 완성하였다. 또한 마찰전기 시리즈 차이로 유추할 수 있는 물질간 서로 다른 전위차를 분석하여, 다공성 3차원 물질과 탄성체(예: PDMS)에 관한 최적의 마찰대전 조건을 확립하였다. 이의 실제적인 응용으로 회로 설계에 의한 48개의 광소자(예: LED) 동시 전원 공급 및 커패시터 축적 기능을 확인하여 본 연구를 완성하였다. 이러한 방식의 마찰전기 기술기반의 나노발전기 설계기술을 개선한다면, 향후 다양한 웨어러블 전자장치에 직접 적용이 가능할 것으로 예상된다.¹⁹⁾

2. 실험 방법

2.1 수직형 나노발전기 구조 및 재료

마찰전기를 유도해낼 수 있는 나노발전기를 제작하기 위해 Fig. 1(a)에서 보여주는 바와 같이 간편한 기계적 구동방식을 설계하였으며, 이는 수직형 구조를 갖는 접촉-분리 모드 구동에 매우 적합한 구조로 널리 알려져 있다. 기존에 보고되고 있는 수직형 또는 슬라이딩 구조를 갖는 나노발전기 효율증대를 위한 요철구조는 다소 번거로운 리소그래피 공정, 실리콘 식각 및 복제공정을 이용하는데 반해, 본 연구에서는 이러한 복잡한 공정 과정을 생략할 수 있는 3차원 기공구조의 물질을 선택함으로써 매우 경제적인 접근방법을 제시하고 있다. 3차원 기공구조로 선택된 니켈(Ni), 구리(Cu) 및 폴리우레탄(polyurethane, PU) 소재는 수십 마이크로 뼈대(scaffold)로 구성되어 있고, 3차원 기공구조는 전자현미경(scanning electron microscope, SEM)으로 관찰한 바와 같이 400 μm 크기로 고르게 분포되어 있으며, 내부기공(porosity, >95%)은 모두 연결되어 있는 형태(open-cell)를 지니고 있다.

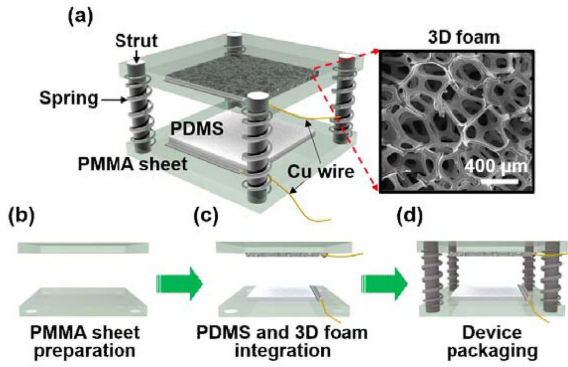


Fig. 1. 3D porous foam-based TENG. (a) A schematic illustration of a TENG structure and a representative SEM image of 3D Ni foam. (b-d) The construction process of a vertically stacked TENG using PMMA sheets connected with struts and springs, a 3D porous foam, and a sheet of flat PDMS.

2.2 3차원 기공구조 물질 기반의 나노발전기 제조공정 및 측정

Fig. 1(a)는 3차원 기공구조를 이용한 나노발전기의 모식도를 보여주고 있다. 나노발전기 제조를 위해 가로와 세로 $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 의 크기로 잘라서 준비된 균일한 판상형태의 3차원 기공소재(니켈, 구리 및 폴리우레탄)를 알루미늄 포일(Al foil, $15 \mu\text{m}$) 전극 기판상에 접합한다. 그리고 음전하 대전체로는 유연한 기계적 성능을 지닌 점탄성 고분자 (polydimethylsiloxane, PDMS, $E \sim 600 \text{ kPa}$)를 선택하였으며, 이의 제조과정은 일반적으로 사용되는 주재 (prepolymer)와 경화제(curing agent)의 비율을 10:1 중량비로 섞어 진공 데시케이터 내에서 기포를 제거한 다음 플라스틱 기판(plastic petri dish)에 부어준다. 이를 오븐에 넣어 70°C 에서 1시간 동안 경화시켜 PDMS 필름을 제작하였다. 준비된 PDMS 필름은 $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 크기로 잘라서 알루미늄 포일 외부전극 기판상에 부착하여 사용하였다. 또한 수직형 나노발전기의 외형 구조물로 모서리에 0.5 mm 의 구멍이 뚫린 고분자 기판(polymethylmethacrylate, PMMA, $4 \times 4 \text{ cm}^2$)을 준비하고, 각각의 접촉 물질들의 알루미늄 외부전극 하단에 구리선으로 된 측정전극을 접합하였다 (Fig. 1(b)). 마지막으로 외부단자가 연결된 각각의 물질들을 상하부 기판에 부착하여 정렬시키고 각 모서리에 원통 축을 포함하는 코일(coil)형 스프링을 삽입하여 외부 압력에 의한 접촉-분리가 용이하게 구성하였다 (Fig. 1(c)). 이렇게 제작된 마찰전기 나노발전기의 구동 거리는 5 mm 의 최적 조건으로 안정화 되었다 (Fig. 1(d)). 나노발전기 성능 측정은 디지털 오실로스코프 (oscilloscope, Keysight DSOX2014A)와 저잡음 전류증폭기 (Stanford Research, SR570)를 사용하여 출력 전압과 전류를 각각 수집하였으며, 커패시터 충전량은 디지털 멀티미터 (Fluke, 8808A)를 사용하여 측정하였다. 수직 접촉-분리 모드는 사용방식의 편의성을 위해 반복적으로 손

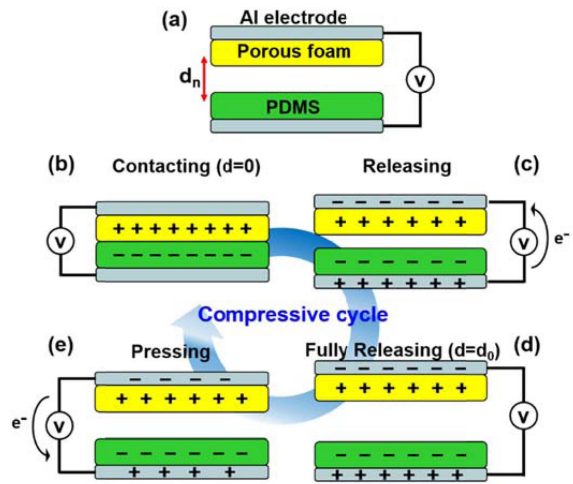


Fig. 2. Schematics of operating principle of a 3D foam-based TENG. (a) Initial state where the external load is not applied and separated with an optimum distance, d_n . (b) When the 3D porous foam is brought into contact with the PDMS sheet by the external load, the triboelectric charge can be generated on each surface of the two materials to balance the surface charge. (c) A potential difference is generated by the separation of the two materials, and the electrons can be induced to the upper electrode. (d) When the two surfaces are fully separated, the surface charge accumulates and equilibrates. (e) By the sequential engagement of the external load, the electrons can be inversely induced to the lower electrode.

을 수직으로 눌러 측정하였으며, 이때 손으로 누르는 움직임은 대략 $10 \text{ Hz} \sim 20 \text{ Hz}$ 사이의 작동범위에서 진행하였다.²⁰⁾

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 마찰전기 나노발전기의 수직 마찰모드에 관한 작동 메커니즘을 도식적으로 보여주고 있다. 구동거리($d_n = 5 \text{ mm}$)를 유지하여 3차원 기공구조를 갖는 물질과 PDMS 고분자의 수평을 맞추어 준 후 실험을 진행하였다 (Fig 2(a)). 다공성 물질(즉, 니켈, 구리, 우레탄)과 하부 표면이 접촉할 때, 마찰전기 시리즈(triboelectric series)에서 PDMS는 3차원 다공성 물질 표면보다 음극성을 갖기 때문에 전자는 PDMS로 이동하여 다공성 폼은 양전하로 대전 되고 PDMS는 음전하로 대전되어 충분한 균형을 이루는 것을 보여주고 있다 (Fig 2(b)). 그 결과 외부 회로에서 전류의 흐름은 일어나지 않는다. 그러나 Fig 2(c)에서 보인 바와 같이 다공성 물질이 접촉상태에서 분리되면 마찰전기 전하의 분리에 의해 전위차가 발생하게 되며, 전자는 정전유도 현상에 의해 외부 회로를 거쳐 하부로 유도된다. 이때 하중을 제거함과 동시에 스프링 탄성에 의해 충분한 거리로 멀어지게 되면, 표면 전위차는 평형상태에 도달하고 음전하와 양전하가 축적되어 Fig. 2(d)와

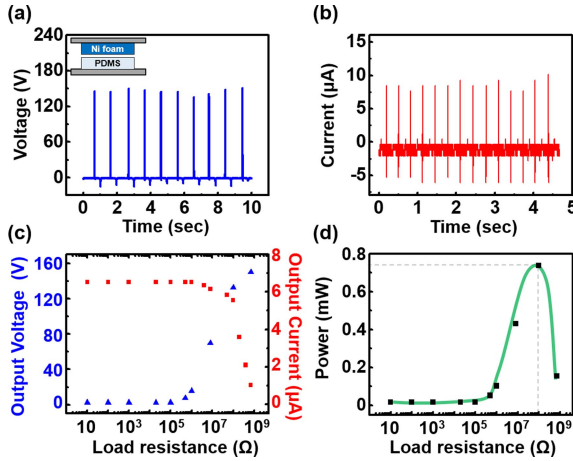


Fig. 3. Electrical measurements of the Ni foam-based TENG in vertical contact-separation mode. (a) The open-circuit voltage and (b) the short-circuit current by the repetitive periodic contact-separation. (c) Dependence of the output voltage and current with the increased load resistance. (d) Load resistance versus power peak value of the nanogenerator.

같은 상태로 놓이게 된다. 또다시 반복적으로 Fig 2(e)에서 보인 바와 같이 다시 외부 압력이 가해지면 마찰전기 전위차가 사라지고 전자는 외부회로에서 반대로 유도된다. 결과적으로 반복된 주기적인 접촉 및 분리 방법에 의해 외부 회로로 교류전류를 지속적으로 발생시킨다. 실험적으로 증명된 이러한 작동모드는 마찰전기 발전기에 수직인 방향으로 외부 하중을 가하는 마찰력 또는 진동 등의 기계적 에너지를 효과적으로 수집하는데 매우 적합하다.

위와 같은 메커니즘을 기초로 본 연구에서는 여러가지 3차원 마이크로 크기의 뼈대로 구성된 다공성 폼(foam) 형태의 물질과 점탄성 물체(예: PDMS 필름)의 마찰을 이용하여 수직형 접촉-분리 모드 나노발전기의 다양한 성능을 측정하였다. 실험적으로 최적화된 다공성 폼의 기공 크기는 400 μm로 판명되었으며, 기공 크기가 400 μm 이하의 샘플과 1200 μm 이상의 기공크기를 갖는 니켈 폼 기반의 나노발전기는 비교 성능평가 결과 표면전하의 수확 성능이 감소하는 것으로 확인되었다. 먼저 Fig. 3(a), (b)에서 보여주는 바와 같이 다공성 니켈 폼 기반의 마찰전기 발전기의 출력 변환을 측정하였으며, 개방-회로 전압(open-circuit voltage) 및 단락-회로 전류(short-circuit current)는 각각 ~140 V와 ~8 μA의 최대값을 보였다. 이는 니켈로 이루어진 3차원 기공구조($E \sim 2 \text{ MPa}$)가 고무로 이루어진 대전체에 균일하게 눌러져 압착되는 특성을 이용한 것이며, 눌러지는 일정한 외부 압력에 의해 순간적으로 변하는 PDMS의 탄성변형이 니켈과의 접촉 면적을 증가시키는 현상을 효율적으로 이용하여 실험을 완성하였다. 또한 이 과정에서 외부 응력을 제거하는 순간 PDMS의 변형은 완벽하게 회복되며 처음의 상태로 돌아가게 되는데, 외부 응력에 의한 치수변화는 관찰되지 않았으며 PDMS의 점탄성 변형 및 응착/마찰특성에 의해 비교적 높은 출력 결과값을 보여주었다. 이와 같은 수직 접촉-분리 모드에서 100회 이상의 반복 후에도 측정값이 균일하게 나타나는 것을 확인하였으며, 또한 상부의 PDMS가 충격흡수를 하여 장기간 구동 가능하다는 장점을 직접적으로 보여준다.

향후 PDMS의 응착특성(adhesive characteristics), 거칠기(roughness) 및 탄성력 등의 표면 성질 조절에 의해 하

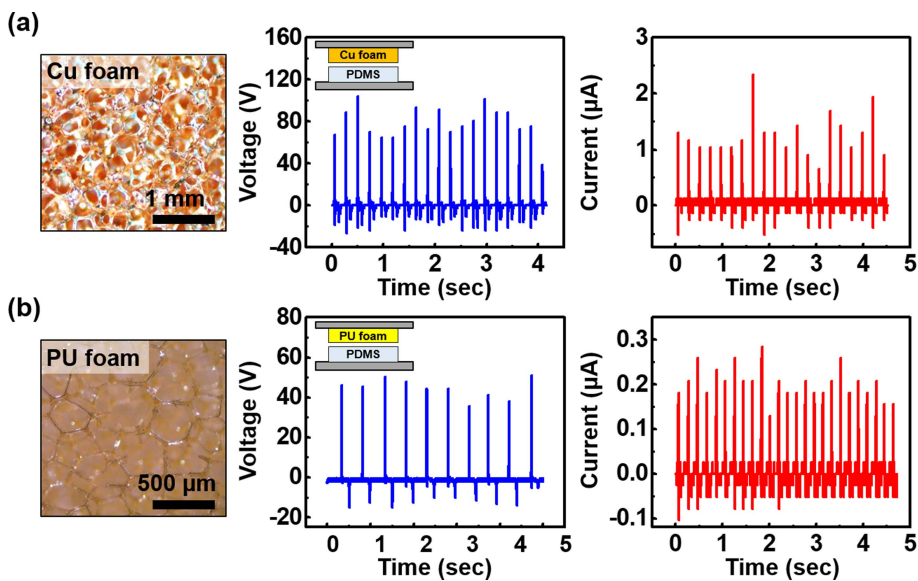


Fig. 4. Electrical performance of Cu and Pu foam-based TENGs. (a) The optical microscope image of the surface of Cu foam (left). The open-circuit voltage and the short-circuit current density were ~80 V and ~1.5 μA, respectively (middle-right). (b) The optical microscope image of the surface of PU foam (left). The open-circuit voltage and the short-circuit current density were ~42 V and ~0.2 μA, respectively (middle-right).

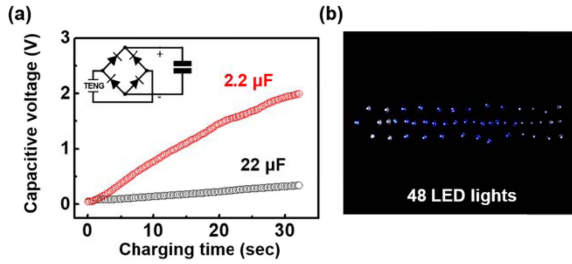


Fig. 5. (a) Charging characteristics of a 3D porous Ni foam-based TENG by vertical contact-separation mode at 2.2 μF and 22 μF capacitors. (b) LED brightness reflects the output of a 3D Ni foam-based; 48 LEDs were simultaneously turned on through the circuit.

중 조건에 따른 접촉 양상이 다르게 나타날 것으로 판단되며, 마찰 특성의 변화가 예견되므로 이에 관한 연구 확장이 가능하리라 판단된다. 3차원 니켈 폼 기반의 마찰전기 나노발전기의 정확한 성능을 판명하기 위해, Fig. 3(c)에서 보인 바와 같이 부하저항(external load resistance)에 대한 출력 전압 및 전류가 산출되었으며, 순간 전류 진폭(instantaneous current amplitude)은 저항 손실(resistive loss)로 인한 부하저항의 증가와 함께 $10^8 \Omega$ 대역에서 감소하며, 반대로 출력 전압이 증가하는 경향을 나타내었다. 이 결과값을 토대로 나노발전기의 출력밀도(power density)를 추출해 낼 수 있었으며, 그 값이 최대 0.74 mW/m^2 로 나타났다 (Fig. 3(d)). 결론적으로, 본 연구에서 획득한 결과값은 기존에 다수 논문으로 보고된 화학적(나노섬유 맴브레인, $0.33 \mu\text{W/m}^2$) 또는 물리적(직물 기반 나노패턴 맴브레인, $70 \mu\text{W/m}^2$) 표면 개질(surface modification)에 의한 결과와 견주어 매우 간단한 방법으로 비교적 높은 소자 성능(3차원 기공구조, 0.74 mW/m^2)을 보여주었다.^{12,15)} 3차원 니켈 폼/PDMS 기반 나노발전기의 높은 출력을 나타내는 요인은 다음과 같다. 먼저 넓은 비표면적을 가진 다공성 폼과 작은 압력에서도 쉽게 변형될 수 있는 PDMS의 접촉-분리 모드를 통해 충분한 표면 전하를 발생시키며, 이를 효과적으로 수확할 수 있는 구조적 장점이 있다. 또한 물질의 내구성에 의해 높은 작동 범위($\sim 20 \text{ Hz}$)에서는 두 물질의 더 많은 표면 접촉 면적을 제공하여 높은 출력 특성을 보여주었다.

3차원 기공소재 적용의 확장으로 니켈 이외에 다른 3차원 다공성 마이크로 기공구조를 이용하여 수직형 마찰전기 나노발전기 성능을 확인하였다. 그 결과 Fig. 4(a) 그래프에서 보인 바와 같이 구리 폼 기반의 나노발전기 출력 전압과 전류는 각각 $\sim 80 \text{ V}$ 및 $\sim 1.5 \mu\text{A}$ 로 측정되었으며, 이를 통해 마찰전기 시리즈에서 구리 폼은 니켈 폼보다 낮은 양극성을 나타내는 것을 실험적으로 비교하여 확인하였다.²¹⁾ 또 다른 탄성물질과의 계면접촉에 의한 마찰전기 출력 변환능력을 확인하기 위해, 탄성력 차이가 큰 폴리우레탄(PU, $E = \sim 70 \text{ kPa}$) 3차원 기공구조로 제조된 나노발전기를 제조, 측정을 시도하였으며, Fig. 4(b)에서

보인 바와 같이 출력 전압 및 전류는 각각 $\sim 42 \text{ V}$ 와 $\sim 0.2 \mu\text{A}$ 를 각각 나타내었다. 니켈과 구리보다 매우 낮은 폴리우레탄의 탄성계수는 출력 전압 및 전류에 영향을 주지 않는 것을 실험적으로 확인하였고, 이러한 경향은 폴리우레탄 기공구조는 마찰전기 시리즈에서 금속보다 낮은 양극성을 가지기 때문에 접촉-분리 모드에서 두 물질 간 표면 전하의 발생량의 차이가 관찰되었다.

이의 종합적인 측정 결과를 통해 다공성 기공 구조는 금속 필름보다 넓은 비표면적을 통해 보다 많은 표면 전하 수확을 유도하며, 물질이 가지고 있는 극성을 변화시키지 않는 것을 증명하였다. 추가적으로 제한된 두께($\sim 2 \text{ mm}$)의 다공성 기공구조를 이용하여 다중층을 구성하여 측정하였을 때도 출력 변화에 영향을 주지 않았다. 즉, 수직형 나노발전기 소자 성능의 변화 경향은 마찰전기 시리즈에 의존적인 출력 전압 및 전류를 나타내며, 이와 동시에 수직 압축응력에 의한 두 물질 간의 기계적 강도의 차이는 접촉 면적(contact area)의 미세한 변화로서 마찰전기 생성에 매우 큰 영향을 줄 것으로 예상된다. 향후 진보된 나노발전기 설계를 위해서는 3차원 마이크로 기공 구조물과 PDMS 계면간의 서로 다른 강성에서 유래된 저항력 감소 영향을 고려해야 할 것으로 사료된다. 이는 3차원 다공성 구조내부를 마찰력 증대를 위한 나노소재 코팅 공정의 도입 또는 마이크로 구조를 갖는 PDMS 제조를 통한 점탄성 성능 변화과정을 통해 더욱 높은 출력 변환 효율을 나타낼 것으로 기대된다.

Fig. 5에서 제시하는 실험결과들은 본 연구에서 제안하는 나노발전기가 휴대용 전기소자용 소형 전원공급원으로 응용이 가능함을 명확히 보여주고 있다. Fig. 5(a) 그래프는 3차원 다공성 니켈 폼 기반의 수직형 마찰전기 나노발전기를 사용하여 두개의 서로 다른 용량을 갖는 커패시터(capacitor) 회로구성을 통한 충전 테스트 결과를 나타내는데, 용적량 2.2 μF 과 22 μF 으로 테스트 하였을 때 30초 동안의 나노발전기 동작으로 각각 최대 2 V와 0.3 V의 충전 전압 특성을 나타내었다. 또한 마찰전기 발전기의 동작능력을 시각적으로 입증하기 위하여 간단한 발광소자 어레이(LED arrays)를 이용하였으며, Fig. 5(b)에서의 디지털 이미지는 동시에 최대 48개의 발광소자를 작동할 수 있는 나노발전기 성능을 나타내고 있다. 위의 결과로 종합해본다면, 본 연구로 제조된 직립형 나노발전기의 주기적인 접촉 및 분리 반복운동에 의해 간단한 회로 설계를 통한 소형 전기장치의 전원 공급이 가능하다는 것을 입증하였다. 이 결과를 더욱 발전시킨다면 미래형 자가발전 시스템의 적용으로 배터리 보조장치로의 박막형 커패시터 도입 및 회로설계에 의한 저전력 전자 소자 전원공급 등의 응용 확장성이 매우 클 것으로 예상된다.²¹⁾

4. 결 론

본 연구에서는 기계적으로 안정적인 특성을 지닌 다양한 3차원 기공구조 물질들을 이용하여 마찰전기 기반 수직형 나노발전기 제조 및 에너지 하베스팅 시스템을 구현하였다. 플라스틱 기판 및 스프링으로 구성된 매우 간편하게 사용이 가능한 경제적인 소형 나노발전기 설계를 시도하였으며, 이를 이용하여 3차원 기공구조 물질들을 점탄성 PDMS 물질표면에 접촉-분리의 반복하중을 적용함으로써 비교적 높은 에너지 하베스팅 능력을 확인하였다. 기공도 95% 이상의 3차원 니켈 폼/PDMS 기반 나노발전기의 경우 가장 높은 출력 전압을 보여주었으며, 비교 대상으로 유사한 기공도를 지닌 3차원 구리 및 폴리우레탄 폼을 사용하여 마찰전기 시리즈에 따른 출력 전류/전압 변화를 측정하였다. 또한 커패시터를 이용한 용량성 전압 측정 실험은 자가발전 시스템으로의 응용 확장성의 가능성을 보여주며 저전력 발광소자 구동을 통해 안정적인 전원공급이 가능하다는 것을 확인하였다. 이는 무선 전력 전송시스템 도입으로 휴대용의 전자기기, 자동차 산업 또는 공공시설의 전원공급 시스템 등에 유용할 것으로 기대된다. 또한 앞으로 전개될 4차산업혁명에 따른 사물인터넷 기술 발전으로 에너지 하베스팅 시스템이 집적된 웨어러블 전기/전자기기의 새로운 원천 기술 연구가 시작될 것으로 예상되며, 효율적이고 합리적인 나노발전기 설계를 통한 출력증대 기술로 새로운 산업 분야에 통합 응용이 가능할 것으로 기대된다.²²⁻²³⁾

감사의 글

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

1. A. C. Wang, C. Wu, D. Pisignano, Z. L. Wang, and L. Persano, "Polymer nanogenerators: Opportunities and Challenges for Large-Scale Applications", *J. Appl. Polym. Sci.*, 135(24), 45674 (2017).
2. Y. Yao, T. Jiang, L. Zhang, X. Chen, Z. Gao, and Z. L. Wang, "Charging System Optimization of Triboelectric Nanogenerator for Water Wave Energy Harvesting and Storage", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 8(33), 21398 (2016).
3. D.-M. Shin, E. L. Tsege, S. H. Kang, W. Seung, S.-W. Kim, H. K. Kim, S. W. Hong, and Y.-H. Hwang, "Freestanding ZnO Nanorod/graphene/ZnO Nanorod Epitaxial Double Heterostructure for Improved Piezoelectric Nanogenerators", 12, 268 (2015).
4. M. Xu, Y.-C. Wang, S. L. Zhang, W. Ding, J. Cheng, X. He, P. Zhang, Z. Wang, X. Pan, and Z. L. Wang, "An Aeroelastic Flutter Based Triboelectric Nanogenerator as a Self-Powered Active Wind Speed Sensor in Harsh Environment", *Extreme Mech. Lett.*, 15, 122 (2017).
5. X. Cao, Y. Jie, N. Wang, and Z. L. Wang, "Triboelectric Nanogenerators Driven Self-Powered Electrochemical Processes for Energy and Environmental Science", *Adv. Energy Mater.*, 6(23), 1600665 (2016).
6. Y. Xie, S. Wang, S. Niu, L. Lin, Q. Jing, J. Yang, Z. Wu, and Z. L. Wang, "Grating-Structured Freestanding Triboelectric-Layer Nanogenerator for Harvesting Mechanical Energy at 85% Total Conversion Efficiency", *Adv. Mater.*, 26(38), 6599 (2014).
7. G. Zhu, J. Chen, T. Zhang, Q. Jing, and Z. L. Wang, "Radial-arrayed Rotary Electrification for High Performance Triboelectric Generator", *Nat. Commun.*, 5, 3426 (2014).
8. Q. Jing, Y. Xie, G. Zhu, R. P.S. Han, and Z. L. Wang, "Self-powered Thin-Film Motion Vector Sensor", *Nat. Commun.*, 6, 8031 (2015).
9. C. He, W. Zhu, B. Chen, L. Xu, T. Jiang, C. B. Han, G. Q. Gu, D. Li, and Z. L. Wang, "Smart Floor with Integrated Triboelectric Nanogenerator as Energy Harvester and Motion Sensor", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9(31), 26126 (2017).
10. T. S. Oh, "Fabrication Process and Power Generation Characteristics of Thermoelectric Thin Film Devices for Micro Energy Harvesting", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 25(3), 67 (2018).
11. D.-H. Lee, S.-I. Kim, Y.-H. Kim, Y.-T. Kim, M.-C. Park, C.-W. Lee, and C.-W. Baek, "Characterization of a Micro Power Generator using a Fabricated Electroplated Coil", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 13(3), 9 (2006).
12. T. Kim, S. Jeon, S. Lone, S. J. Doh, D.-M. Shin, H. K. Kim, Y.-H. Hwang, and S. W. Hong, "Versatile Nanodot-Patterned Gore-Tex Fabric for Multiple Energy Harvesting in Wearable and Aerodynamic Nanogenerators", *Nano Energy*, 54, 209 (2018).
13. G. Zhu, Z.-H. Lin, Q. Jing, P. Bai, C. Pan, Y. Yang, Y. Zhou, and Z. L. Wang, "Toward Large-Scale Energy Harvesting by a Nanoparticle-Enhanced Triboelectric Nanogenerator", *Nano Lett.*, 13(2), 847 (2013).
14. K. Y. Lee, M. K. Gupta, and S.-W. Kim, "Transparent Flexible Stretchable Piezoelectric and Triboelectric Nanogenerators for Powering Portable Electronics", *Nano Energy*, 14, 139 (2015).
15. H. Phan, D.-M. Shin, S. H. Jeon, T. Y. Kang, P. Han, G. H. Kim, H. K. Kim, K. Kim, Y.-H. Hwang, and S. W. Hong, "Aerodynamic and Aeroelastic Flutters Driven Triboelectric Nanogenerators for Harvesting Broadband Airflow Energy", *Nano Energy*, 33, 476 (2017).
16. S. H. Kang, and S. W. Hong, "Recent Progress in Flexible/Wearable Electronics", *Journal of KWJS*, 32(3), 34 (2014).
17. Z. L. Wang, J. Chen, and L. Lin, "Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors", *Energy Environ. Sci.*, 8, 2250 (2015).
18. L. Lin, Y. Xie, S. Wang, W. Wu, S. Niu, X. Wen, and Z. L. Wang, "Triboelectric Active Sensor Array for Self-Powered Static and Dynamic Pressure Detection and Tactile Imaging", *ACS Nano*, 7(9), 826 (2013).
19. Y.-C. Lai, J. Deng, S. Niu, W. Peng, C. Wu, R. Liu, Z. Wen, and Z. L. Wang, "Electric Eel-Skin-Inspired Mechanically Durable and Super-Stretchable Nanogenerator for Deformable Power Source and Fully Autonomous Conformable Electronic-Skin Applications", *Adv. Mater.*, 28(45), 10024 (2016).
20. V. L. Trinh, and C. K. Chung, "Harvesting mechanical energy,

- storage, and lighting using a novel PDMS based triboelectric generator with inclined wall arrays and micro-topping structure”, *Applied Energy*, 213, 353 (2018).
21. L. Zhang, L. Jin, B. Zhang, W. Deng, H. Pan, J. Tang, M. Zhu, and W. Yang, “Multifunctional Triboelectric Nanogenerator based on Porous Micro-Nickel Foam to Harvest Mechanical Energy”, *Nano Energy*, 16, 516 (2015).
 22. Z. L. Wang, “Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors”, *ACS Nano*, 7(11), 9533 (2013).
 23. Z. L. Wang, “Nanogenerators, Self-powered Systems, Blue Energy, Piezotronics and Piezophotonics-A Recall on the Original Thoughts for Coining These Fields”, *Nano Energy*, 54, 477 (2018).