

나노제너레이터의 연구소개 및 최근 기술동향

<http://dx.doi.org/10.5757/vacmag.1.4.14>

김상우, 김성수, 윤희준, 류한준

Introduction to research and current trend about nanogenerator

Sang-Woo Kim, Seongsu Kim, Hong Joon Yoon and Hanjun Ryu

Since recent electronics technologies have been developed and they tend to spend huge amount of electrical power, self-powered electronics have been paid attention worldwide. To realize self-powered electronics, energy harvesting technology, which generally converts ambient energy into electrical energy, has to be introduced. Among numerous energy sources, mechanical, thermal, and electrostatic event would be of broad interest in field of energy harvesting. Here, this article introduces the promising alternative energy concepts of nanogenerator including piezoelectric, triboelectric, and hybrid types. With these nanogenerators, we are able to apply onto not only self-powered system, but expect these open green energy market.

서론

최근 전자기기의 발전으로 기기의 부피와 무게가 줄어들게 되어 모바일 전자기기의 보급은 이미 우리들의 일상 생활 깊숙이 들어와 있고, 더 작고 가벼운 전자기기를 제

작하기 위해 마이크로/나노 디바이스에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이를 구동하기 위해 배터리와 같은 추가적인 전원 제공 장치에 대한 연구도 병행되고 있다. 하지만 현재의 전원 제공 장치에 대한 기술로는 사용자의 요구를 충족하지 못하는 상황이며 배터리 교체 및 충전 같은 불편함을 느끼게 하고 있다. 이러한 불편함을 해결하는 방향으로 여러 방안이 제시되고 있는데 그 중 기계적 에너지, 열 에너지, 정전기와 같은 주변에서 흔히 발생하지만 버려지고 있는 에너지를 이용한 나노제너레이터가 주목 받고 있다. 나노제너레이터는 차세대 신 재생 에너지 수확 기술로서 2006년 미국 조지아 공대의 Z. L. Wang 교수 연구 그룹에서 반도체 압전 물질인 ZnO 나노 와이어를 이용한 압전나노제너레이터 연구를 시작으로 압전, 열전, 정전기 및 여러 에너지를 동시에 수합하는 하이브리드 형태 등의 나노제너레이터가 있으며 이를 이용한 전자기기의 보조전원공급, 더 나아가 전자기기의 자가구동을 위해 최근 많은 연구가 진행되고 있는 추세이다 [1]. 이 글에서 필자는 다양한 형태의 나노제너레이터의 연구 동향과 기술에 대해 소개하고 추후의 발전방향에 대해 이야기 하고자 한다.

〈저자 약력〉

- 김상우 교수는 2004년 Kyoto University 전자공학과 공학박사를 받았으며, 2009년부터 성균관대학교 신소재공학부 부교수로 재직 중 이다. (kimsw1@skku.edu)
- 김성수 연구원은 2012년 성균관대학교 공과대학 신소재공학부 공학사를 받았으며, 현재 성균관대학교 대학원 신소재공학과 석박통합과정 중이다. (kimss0103@skku.edu)
- 윤희준 연구원은 2013년 서울과학기술대학교 공과대학 화공생명공학사를 받았으며, 현재 성균관대학교 대학원 신소재공학과 석박통합과정 중 이다. (yoonhj@skku.edu)
- 류한준 연구원은 2014년 성균관대학교 공과대학 신소재공학부 공학사를 받았으며, 현재 성균관대학교 대학원 신소재공학과 석박통합과정 중이다. (hanjunryu@skku.edu)

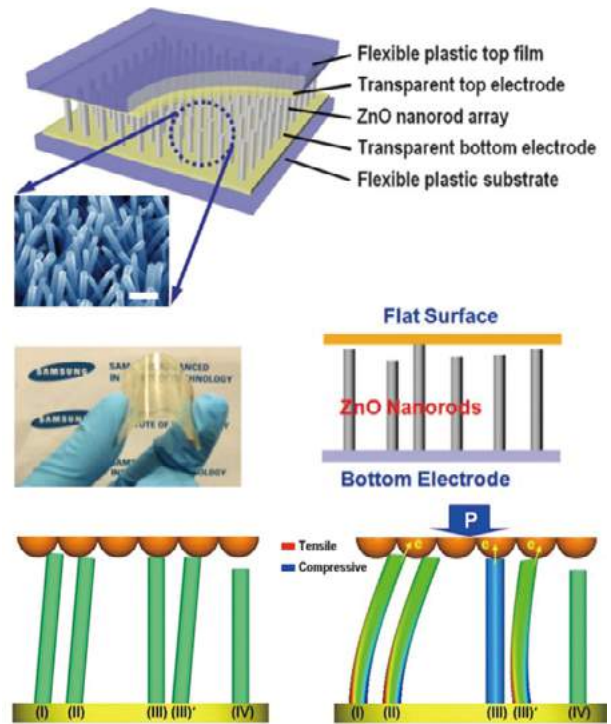
압전나노제너레이터

2006년 미국 조지아 공대의 Z. L. Wang 교수 연구그룹에서 ZnO 단일 나노와이어로부터 AFM을 이용하여 압전 특성이 발생함과 그 메커니즘을 처음 규명하였다[1]. 이후 ZnO, CdS, ZnS, GaN 그리고 InN와 같은 압전 반도체와 PVDF, PZT, BaTiO₃ 와 같은 압전 절연체를 이용한 여러 가지 압전 에너지 발생 소자의 연구가 진행되어 왔다. 압전 특성과 반도체 특성을 동시에 지니고 있는 ZnO를 이용한 나노제너레이터의 연구가 활발히 진행되고 있지만, 표면의 산소 vacancy로 인한 낮은 압전 출력이 한계로 대두되어, 이를 극복하기 위해 플라즈마 처리와 열처리 및 P-type 폴리머 등을 이용한 출력 값을 높이는 연구가 지속되고 있다. 더불어 강한 압력에서도 버틸 수 있도록 기계적으로 높은 내구성의 폴리머와 압전 물질을 이용한 복합체 형태로 만들어 소재의 종류와 형태제어 뿐만 아니라 소자의 응용분야와 고출력·고효율화에도 초점을 두어 연구가 진행되고 있다.

압전성을 띄는 나노와이어 기반의 소자는 하부 전극 위에 수직으로 성장된 나노와이어 구조물에 상부전극으로 외력이 수직으로 가해질 경우에 물질의 비 중심대칭 특징으로 인하여 순간적인 전기적 불균형이 발생한다. 나노와이어는 게이트 역할을 하는 동시에 전자가 외부회로의 흐름을 방지하는 역할을 함으로써 압전현상으로 발생한 포텐셜을 보존시키는 역할까지 한다[1,2]. 기계적인 외력에 의해 압축응력을 받으면 나노와이어 내부의 양이온과 음이온의 상대적인 변위에 따라 압전 효과가 발생하며 최대로 유도될 수 있는 압전 포텐셜은 다음과 같은 식을 통하여 이해할 수 있다.

$$V_{max} = Fg_{33} L/A$$

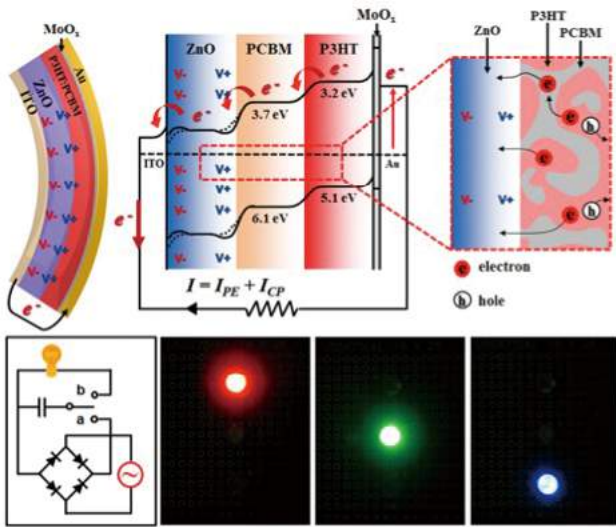
F는 외력, g₃₃은 압전계수를 의미하며, L은 나노와이어의 길이, 그리고 A는 나노와이어의 표면적을 의미한다. 외부에서 가해진 외력에 의해 나노와이어의 일축변형이 발생하며 이에 의해 생성된 (-) 압전 포텐셜 측면의 전극으로부터 외부회로를 통하여 반대쪽 (+) 압전 포텐셜이 형성된 측면의 전극으로 전자의 이동이 발생한다. 가해주었던 외력의 영향력이 사라지면 나노와이어를 통해 유도된 압전 포텐셜이 사라지고 이것으로 인해 축적된 전자



[Fig. 1] Flexible and transparent piezoelectric nanogenerator based on ZnO nanowires.

들이 전극 간 평형을 이루기 위해 외부회로를 통해 되돌아간다. 결론적으로, 압축 및 인장응력에 의해 포텐셜이 생성되고, 이는 나노 규모의 압전 물질로부터 교류전력의 전기에너지 생성이 가능함을 시사한다[2]. 그림 1은 ZnO 나노와이어를 이용하여 투명하고 유연한 압전나노제너레이터를 제작한 한 예이다[3].

사람의 움직임, 불규칙적인 기계적 진동, 혹은 체내의 다양한 유체의 흐름 등으로부터 에너지를 얻기 위해서는 작은 소형소자로부터 높은 출력을 발생시킬 수 있는 개발이 필수적이다. 기존 PZT, BTO, PVDF와 같은 절연성의 압전물질은 높은 유전율과 임피던스를 가지고 있어 압전나노제너레이터를 제작했을 때 낮은 전류가 생성되므로 출력 값이 낮은 문제점을 수반하였으나, 압전나노제너레이터 제작 시 반도체 재료를 이용하여 전류의 출력을 높여줌으로써 전자소자의 자가 구동의 가능성을 확인하였다. 하지만 높은 캐리어 밀도를 가지는 반도체 물질은 압전효과로부터 발생한 전하를 가로막고 중성화시키는 비율을 높여 절연체를 이용한 발전소자에 비해 낮은 출력을 발생시키는 문제점이 존재하였다. ZnO 기반 압전나노제너

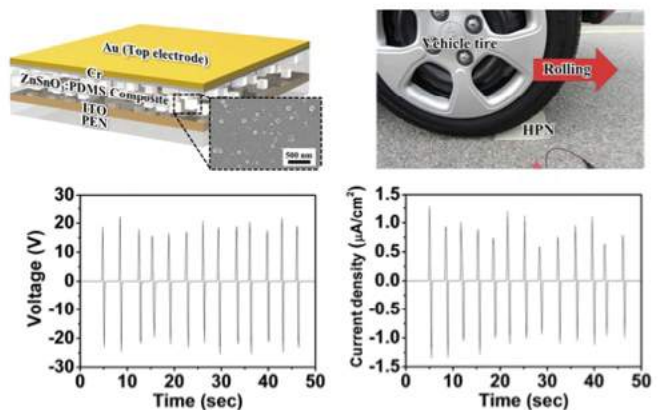


[Fig. 2] Organic and inorganic hybrid piezoelectric nanogenerator and turn RGB LED on.

레이터의 경우, 재료내부에 존재하고 있는 n-type donor 성질을 띠는 점결합의 산소 vacancy가 압전출력을 저해시키는 주된 원인으로 손꼽히고 있다. 따라서 n-type의 특성을 유도하는 산소 vacancy를 p-type 유기물인 Poly 3-hexylthiophene (P3HT) 표면에 접합시키고 확산을 유도하여 표면에 존재하는 결함들의 전자-정공 pair의 형성을 유도하고, 또한 유기 하이브리드 구조에서 p-n 접합에 따른 밴드갭 modulation 효과를 통하여, 외부에서 동일한 응력이 가해졌을 때 기존의 P3HT 유기물을 부착시키지 않고 제작한 압전소자의 출력값 (0.08 V, 1.93 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)과 대비하여 약 18% 증가한 출력값 (0.5 V, 3.03 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)을 가지는 소자를 개발 가능하였다. 부가적으로 Phenyl-C61-butrylic acid methylester (PCBM) 폴리머를 이용해 ZnO와 P3HT:PCBM 유기 하이브리드형 소자를 만들어 캐리어 수송을 더욱 개선시키고 1.45 V의 전압을 발생시켜 기존소자대비 출력을 18배 증가시켰다. 외부의 전력공급 없이 압전나노제너레이터만으로 적색, 녹색, 청색 (RGB) LED를 구동시킴을 그림 2를 통하여 확인할 수 있으며, 이는 자가구동형 디스플레이 소자의 실용화 가능성을 앞당겼다고 볼 수 있다[4].

비납계 Perovskite 나노구조물은 인체삽입이 가능한 친환경소재로 생체삽입형 나노제너레이터에 사용될 물질로써 큰 잠재력을 가지고 있다. 또한, 최근에 유기물과

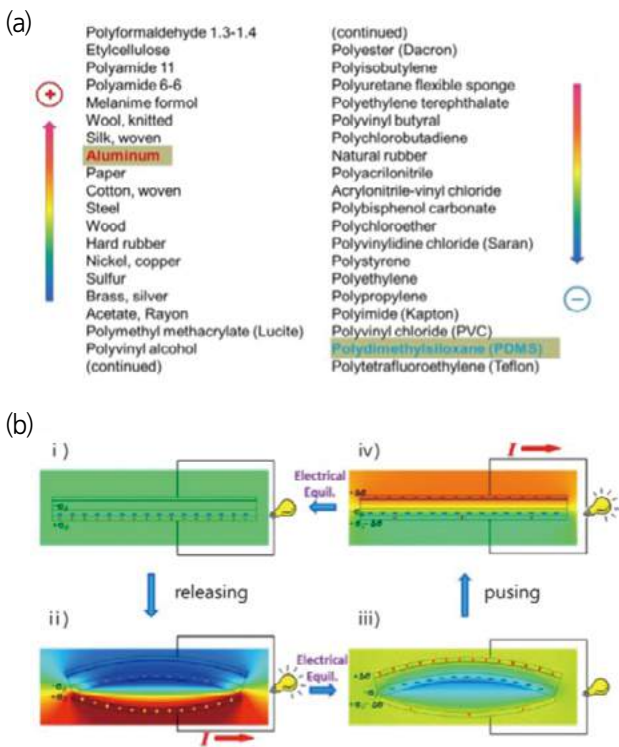
ZnO, BaTiO₃, KNbO₃, Sodium niobate (NaNbO₃)와 같은 나노구조의 압전물질을 혼합한 복합구조물은 압전물질이 소자 내부에 고르게 분포하도록 유도되어 있고, 공정의 단순함, 경제적인 이점, 그리고 높은 기계적 안정성 때문에 대면적 압전나노제너레이터로서도 주목을 받고 있다. 단결정 압전소자인 정사면체형태의 ZnSnO₃는 다른 Perovskite 구조의 압전소재들에 비해 월등히 높은 분극 특성을 띄고 있고 (~59 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$), 상온에서 성장이 가능하며, 또한 전기적으로 poling을 하지 않고서도 높은 압전특성을 나타내므로, 이를 이용하여 압전나노제너레이터를 제작하여 수직으로 응력이 가해질 때 높은 출력을 발생시킬 수 있다는 연구를 그림 3을 통하여 볼 수 있다. 단결정 압전소재인 ZnSnO₃는 100~200 nm의 입자크기로 반응 온도에 따라 성장되었으며, PDMS와 복합체를 이뤄 임의적으로 PDMS 내부에 분산되었다. 하부전극은 ITO를 사용하였으며 상부전극은 PDMS와 접합력을 높이기 위해 Cr을 20 nm 증착 후 Au를 증착하여 사용하였다. 위와 같은 방법으로 제작된 고효율 압전나노제너레이터는 상하로 가해지는 강한 힘에도 매우 안정적인 구동이 가능하다. 특히, 500회 이상 자동차가 소자를 밟고 지나가는 상황에서 20 V, 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 의 높은 출력을 안정적으로 생산해내는 것을 확인하였다. 이는 기존 1차원, 2차원 압전나노제너레이터와 달리 재료의 결정성에 구애 받지 않고, 기계적으로 안정하며, 높은 수준의 출력의 지속성을 확보할 수 있는 신개념 압전나노제너레이터라 할 수 있다[5].



[Fig. 3] Highly stable and enhanced output piezoelectric performance using single crystal ceramic and polymer hybrid structure.

정전나노제너레이터

최근 그린에너지, 신재생에너지에 대한 관심이 늘어나는 추세에서 압전현상을 이용한 에너지 하베스팅 뿐만 아니라 다양한 자연적 현상을 이용해 에너지를 수확하는 신 개념 에너지 하베스팅 기술이 연구되고 있다. 최근 연구가 이루어지기 시작한 정전기 현상을 이용한 정전나노전력발전은 주위에 버려지는 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환할 수 있는 또 다른 기술이며, 소자의 개발이 간단하고 경제적인 장점이 있다. 정전나노제너레이터의 구동원리는 그림 4로 설명할 수 있다. 먼저 두 물질이 접촉을 이루었을 때 triboelectric series에 따라 한쪽은 전하를 잃게 되고 다른 한쪽은 전하를 얻게 되며, 이동된 전하에 의해 두 물질 사이에 분극이 형성된다. 이후, 두 물질이 다시 분리될 때 생성된 분극에 의해 물질 사이에 전기장이 발생하면서 외부 전선을 통해 전자가 흐르고 전류가 발생하는 것이다. 이때 발생하는 분극의 방향은 tribo series를 통해 알 수 있다. 예를 들어 한쪽 물질을 Al으로 쓰고 반대편 물질을 PDMS를 쓰게 되면 Al은 양극이 되고 PDMS는 음극이 된다[6].

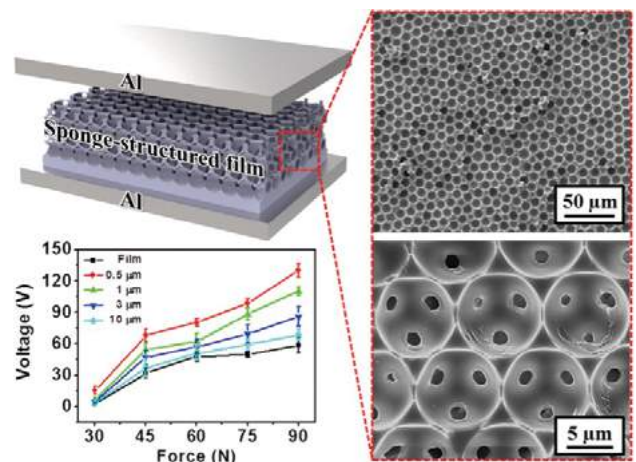


[Fig. 4] Triboelectric series and working mechanism.

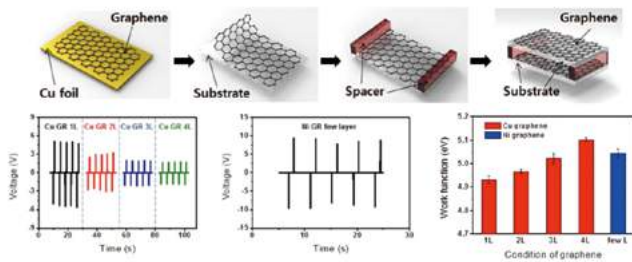
정전나노제너레이터가 개발된 이후 출력을 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 소자의 출력을 향상시키기 위해서 크게 두 가지 방법으로 접근할 수 있는데, 첫 번째가 물질 제어이고 다른 하나는 구조 설계이다.

마찰에 의해 발생하는 정전기의 방향과 크기는 triboelectric series에 나타나 있듯이 마찰이 일어나는 물질의 선택에 의해 주도적으로 결정된다. 하지만 동일한 물질이더라도 물질의 형태 혹은 전기적 특성을 제어함으로써 정전나노제너레이터의 출력을 향상시킬 수 있음이 보고되었다. 그림 5에서는 PDMS 폴리머 물질을 스펀지 형태로 제어 후 소자를 제작하여, 형태 제어를 하지 않은 PDMS를 이용하였을 때 보다 높은 출력을 얻을 수 있었다. 먼저 polystyrene (PS)를 쌓고 PDMS를 부어 굳힌 후에 아세톤에 담가두어 PS만 녹임으로써 스펀지 구조를 구현하였고, 스펀지 형태의 구조로 인하여 PDMS/Al 계면뿐만 아니라 PDMS 내부 공동(空洞)에서도 표면전하를 발생시키기 때문에 소자의 출력을 향상시킬 수 있었다. 기존의 PDMS/Al 구조의 나노제너레이터가 50 V, 0.02 mA/cm²의 출력을 보인 반면 스펀지 형태의 PDMS를 사용한 소자는 130 V, 0.1 mA/cm²의 출력을 보였다. 또한 내부 공동의 크기가 감소함에 따라 전하가 발생하는 면적이 증가하므로 출력이 증가하는 양상을 보여 같은 물질이더라도 형태 제어를 통해 소자의 출력치를 향상시킬 수 있음을 보여주었다[7].

그림 6에서는 그래핀/PET을 이용한 나노제너레이터를 제작하였는데 그래핀의 전기적 특성을 제어하여 소자를



[Fig. 5] Structure control of same material for enhancing triboelectric performance.



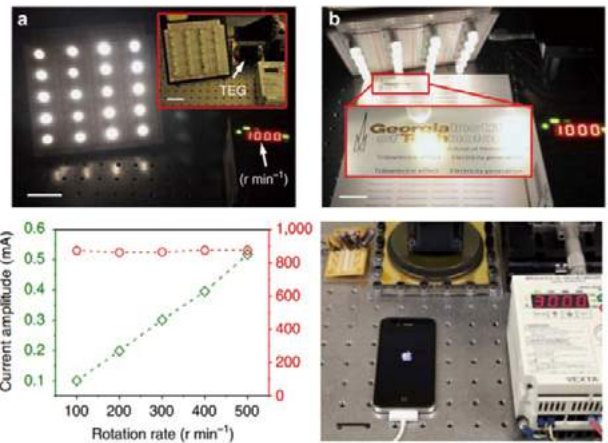
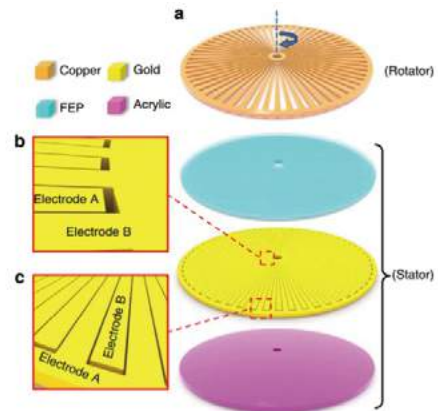
[Fig. 6] Graphene triboelectric nanogenerator and its performance dependent of graphene layers.

측정하였다. 그래핀이 한 장일 경우와 여러 장을 쌓았을 경우 일함수의 변화 및 마찰이 발생하는 양이 변하는데, 이에 따라 정전나노제너레이터의 출력 특성이 변화하는 것을 확인하였다. 그래핀의 장수가 비규칙적으로 쌓였을 때는 비록 일함수가 4.92 eV에서 5.08 eV로 증가하지만 그래핀과 그래핀 사이의 전기적 상호작용이 약해지면서, 장수가 늘면서 마찰이 줄어드는 그래핀의 특징에 의해 출력치가 감소함을 확인 하였다. 하지만 그래핀이 규칙적으로 적층 되었을 경우는 마찰은 줄어들지만 일함수의 증가에 의해 높은 출력을 나타냄을 보여주었다[8].

위에 보고된 연구 결과를 토대로 같은 물질이라도 형태 및 특성을 제어하는 경우 출력치 향상을 도모할 수 있다는 것을 알 수 있다.

정전나노제너레이터를 제작함에 있어서 높은 출력치를 얻기 위한 첫 번째 단계는 물질 선정이고 그 이후 과정이 구조 설계이다. 적절한 구조 설계가 이루어져야 기계적 에너지가 효과적으로 전달되고 마찰에 의한 정전기 현상이 극대화되므로 구조 설계는 소자의 출력을 향상시키는 데 있어서 중요한 과정이다. 그림 7에서는 회전하면서 마찰이 많이 발생할 수 있도록 회전체와 전극을 패터닝 함으로써 높은 출력치를 얻을 수 있었다. 정전나노제너레이터만을 이용하여 수십 개의 전구를 구동 시키고, 핸드폰 충전까지 가능함을 보여주어 모바일 전자기기의 자가구동의 가능성을 보여주었다[9].

정전나노제너레이터는 출력이 높고, 경제적이면서, 다양한 물질 군과 간단한 구조라는 장점 때문에 다방면으로 적용될 수 있다. 그렇기 때문에 앞서 소개한 연구뿐만 아니라 더욱 다양한 방법으로 물질을 제어하고 구조를 설계하여 각각의 상황에 맞는 소자를 제작하면 새로운 에너지 원으로 사용될 수 있을 것이라 기대된다.

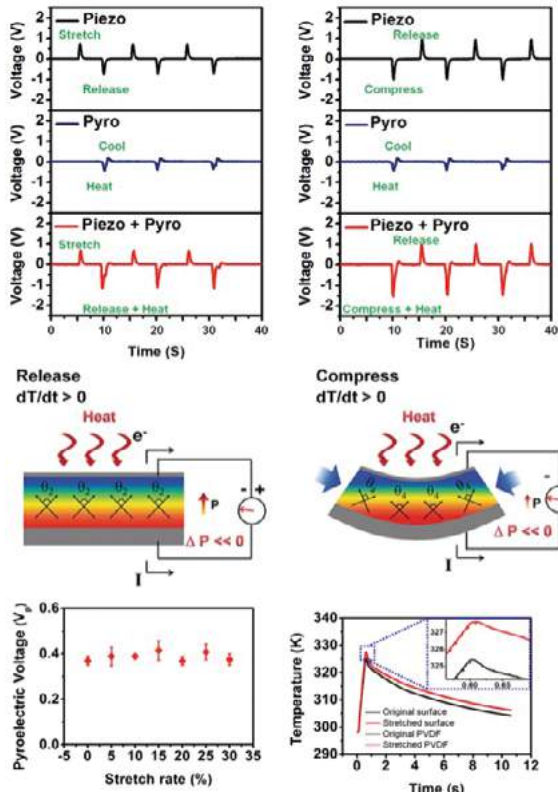


[Fig.7] Enhanced of Triboelectric nanogenerator performance using optimized structure.

하이브리드 나노제너레이터

다양한 단일 나노제너레이터 연구 이후, 각기 다른 나노제너레이터를 융합하는 연구도 활발히 진행 중이다. 주로 진행되는 연구를 보면, 외부 압력과 온도변화를 이용한 압전 및 초전 나노제너레이터, 마찰로 발생한 정전 에너지 및 태양전지를 융합하여 높은 출력을 보이는 태양&정전 나노제너레이터 등 여러 가지 방향으로 진행되고 있다. 위와 같은 예시와 같이, 서로 다른 나노제너레이터의 융합은 단일 소자로 구성되는 경우와 비교하여 높은 에너지를 얻을 수 있으며, 또한 단순한 합이 아닌 시너지 효과에 의해 더욱 증가된 에너지를 발전시킬 수 있다.

그림 8은 압전 에너지가 발생할 경우, 압력을 받는 경우와 압력을 잃는 경우에 따른 에너지 발생 방향, 초전 에너지가 발생 시 온도가 증가하는 경우와 온도가 감소하는



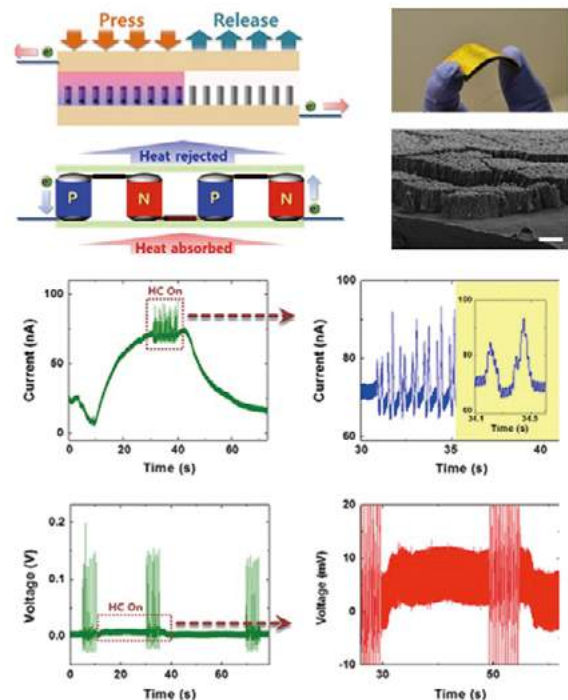
[Fig.8] Stretchable piezoelectric and piezoelectric nanogenerator under force, temperature change condition and mechanism of the best hybrid case

경우, 각각의 경우에 따른 에너지 발생 방향을 보여준다. 이 에너지 발생 방향은 중요한데, 물질 내부의 다이폴 방향이 같게 변화하여야만 동일한 방향으로 에너지가 발생하여 융합 시 높은 출력치가 발생한다. 온도가 증가함과 동시에 압력을 받을 때, 온도가 감소할 때와 동시에 받은 압력을 잃을 때 다이폴 방향이 동일하게 정렬되어 발전되는 에너지 양이 증가하게 된다. 각각의 나노제너레이터를 융합하여 높은 출력치를 얻을 뿐만 아니라, 현재 전자기기의 발전동향에 따라 다양한 형태의 외력에도 융합된 나노제너레이터는 구조적 안정성이 확보되어야 한다. 따라서 고분자 압전 물질인 PVDF-TrFE를 패터닝하여 휘어지거나, 늘어나는 경우에도 안정적으로 에너지를 발생시킬 수 있음을 보여, 향후 wearable 기기의 에너지 동력원으로 이용될 수 있는 가능성을 보였다[10].

그림 9는 하나의 나노제너레이터에서 압전 에너지와 열전 에너지가 동시에 발생하는 경우이다. 앞서 설명한 초전나노제너레이터는 열에 의해 내부의 온도가 변하는 순

간 에너지가 발생하지만, 열전나노제너레이터는 물질 하단부와 상단부의 온도 차이가 존재하면, 온도 차이만큼 에너지가 지속적으로 발생하는 다른 원리이다. 따라서 압전과 열전에너지를 동시에 발생시키는 구조는 규칙적으로 진동이 발생하며, 열을 생성하는 자동차 엔진과 같은 기계장비에 응용하여 에너지를 발생시킬 수 있으며, 기계가 열을 많이 내며 진동이 심할수록 높은 에너지를 발생할 수 있다. 따라서 본 구조와 같은 하이브리드 나노제너레이터의 경우, wearable 소자가 아닌 부착 식으로 용이하기 때문에 이전에 소개했던 압전&초전 나노제너레이터와는 다른 응용이 가능하다. 압전 물질로 널리 알려져 있는 ZnO나노 와이어를 이용해 소자를 제작하여 구부리는 정도에 따라 압전 특성이 나오는 것을 우선 확인했으며, 소자 상 하단부에 온도차이를 주면서 외압을 가했을 경우 열전 및 압전 효과가 동시에 발생하는 것 또한 확인 할 수 있었다. 이를 통해 실제 고온 및 진동이 존재하는 거친 환경 속에서 버려지는 에너지를 유용한 에너지원으로 변환할 수 있음을 확인 했다[11].

그림 10은 정전나노제너레이터와 태양광 에너지 발전 소자의 하이브리드 나노제너레이터이다. 태양광 에너지

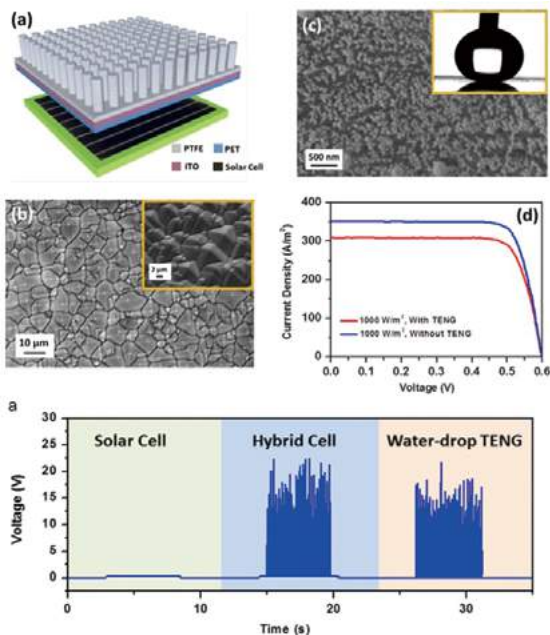


[Fig. 9] Thermoelectric and piezoelectric hybrid nanogenerator and output performance.

발전 소자는 에너지 발생 양의 한계와 외부환경에 의해 많은 영향을 받는 문제점이 있다. 하지만 정전-태양광 하이브리드 나노제너레이터를 이용하면, 악천후 속에서도 효율적으로 구동이 가능하여 기존의 태양광 에너지 발전소자의 한계를 극복할 수 있을 것으로 보고하였다. 양 소자의 동시 구동 시, 정전나노제너레이터의 높은 출력 전압을 통해 태양광 에너지 발전 소자의 낮은 에너지 발생 양을 극복할 수 있으며, 태양광 에너지 발전소자가 제대로 구동하지 못하는 비가 오는 경우를 대비하여 떨어지는 빗방울에 의해 정전나노제너레이터가 구동하는 것을 확인했다. 초 발수 물질인 투명한 테플론을 최 상부 층에 씌우므로써, 빗방울이 소자에 붙어 있지 않고 튕겨서 나가게 되는데, 이때 생기는 정전기적 차이에 의해 정전에너지가 발생한다. 또한 태양광 에너지 발전소자 위에 빛을 산란 혹은 흡수하는 물질이 있을 경우, 태양광 에너지 발전소자의 특성을 감소 시키는데, 모든 물질을 투명한 물질로 이용 하였기에 위와 같은 문제를 피할 수 있었다. 또한, 먼지와 같이 태양광 에너지 발전소자의 효율을 떨어뜨리는 요소들은 초 발수 코팅에 의한 낮은 표면 에너지로 인하여 표면에 달라 붙어 있을 수가 없기 때문에, 기존의 태양광 에너지 발전소자와 다르게 융합을 통한 다양한 이점을 보여주고 있다. 이는 악천후에도 안정적인 에너지 공급을 할 수 있다는 것을 보여주어, 태양광 에너지 발전소

자의 한계를 극복할 수 있는 방안을 제시하였다[12].

지금까지 주위의 버려지는 에너지를 사용할 수 있는 에너지로 변환시켜 주는 나노제너레이터에 대해 알아보았다. 나노제너레이터는 기존의 신재생에너지 기술과 다르게 시공간에 대한 제약을 받지 않기 때문에 자가구동 형태의 환경 모니터링, 자가구동 형태의 신체바이오센서, 모바일 전자기기의 전력원 등 다양한 분야로의 기술 적용이 가능하여 많은 연구가 진행되고 있다. 현재 지속적인 연구를 통해 다양한 형태의 나노제너레이터 성능이 향상되고 있으며 각각의 소자를 융·복합하는 하이브리드 소자의 개발 등을 통해 다양한 응용분야에 적용이 기대된다. 이미 나노제너레이터를 통해 생성된 전력을 상용화된 전자기기 구동에 성공하였으며 모바일 전자기기 및 휴대용 전자기기의 전원 공급의 가능성을 확인 하였으므로, 앞으로 계속되는 나노제너레이터에 대한 연구에 의해 실제 상용화에 더욱 근접할 것이라 예상되며 이에 따라 에너지 산업 분야에서 매우 비중 있는 역할을 할 것이라 기대된다. 아직은 나노제너레이터가 급격히 증가하고 있는 세계의 에너지 수요를 충족시키긴 부족한 단계이지만, 효율적인 출력 향상 연구와 더불어 전력패키지의 소형화를 위한 직류 전력의 생성 및 특성 향상 연구가 계속적으로 진행된다면 미래의 대체에너지원으로서 커다란 파급을 가져올 것이라 예상된다.



[Fig. 10] Solar energy and triboelectric energy hybrid nanogenerator.

References

- [1] Z. L. Wang, J. H. Song, Science 312, 242-246 (2006).
- [2] R. Yang, Y. Qin, L. Dai, Z. L. Wang, Nat. Nanotechnol. 4, 34-39 (2009).
- [3] M.-Y. Choi, D. Choi, M.-J. Jin, I. Kim, S.-H. Kim, J.-Y. Choi, S. Y. Lee, J. M. Kim, S.-W. Kim, Adv. Mater. 21, 2185-2189 (2009).
- [4] K. Y. Lee, B. Kumar, J.-S. Seo, K.-H. Kim, J. I. Shon, S. N. Cha, D. Choi, Z. L. Wang, S.-W. Kim, Nano Lett. 12, 1959-1964 (2012).
- [5] K. Y. Lee, D. Kim, J.-H. Lee, T. Y. Kim, M. K. Gupta, S.-W. Kim, Adv. Funct. Mater. 24, 37-43 (2014).
- [6] S. Wang, L. Lin, Z. L. Wang, Nano Lett. 12, 6639-6346 (2012).
- [7] K. Y. Lee, J. Chun, J.-H. Lee, K. N. Kim, N.-R. Kang, J.-Y. Kim, M.-H. Kim, K.-S. Shin, M. K. Gupta, J. M. Baik, S.-W. Kim, Adv. Mater. 26, 5037-5042 (2014).
- [8] S. Kim, M. K. Gupta, K. Y. Lee, A. Sohn, T. Y. Kim, K.-S. Shin, D. Kim, S. K. Kim, K. H. Lee, H.-J. Shin, D.-W. Kim, S.-W. Kim, Adv. Mater. 26, 3918-3925 (2014).
- [9] G. Zhu, J. Chen, T. Zhang, Q. Jing, Z. L. Wang, Nat. commun. 5, 3426 (2014).
- [10] J.-H. Lee, K.Y. Lee, M.K. Gupta, T.Y. Kim, D.-Y. Lee, J. Oh, C. Ryu, W.J. Yoo, C.-Y. Kang, S.-J. Yoon, J.-B. Yoo, and S.-W. Kim, Adv. Mater. 26, 765-769 (2014).
- [11] S. Lee, S.-H. Bae, L. Lin, S. Ahn, C. Park, S.-W. Kim, S.N. Cha, Y. J. Park, and Z.L. Wang, Nano Energy 2, 817-825 (2013).
- [12] L. Zheng, Z.-H. Lin, G. Cheng, W. Wu, X. Wen, S. Lee, Z. L. Wang, Nano Energy 9, 291-300 (2014).