

제 4 장 나노발전기 및 마찰전기 나노발전기 (Triboelectric Nanogenerator, TENG)

휴대용 전자소자의 끊임없는 소형화는 일반적인 배터리 기술에 의존하면서 계속적으로 문제를 유발하고 있다. 그러나 가까운 미래에 마이크로- 및 나노크기 소자들이 건강관리, 인프라구조나 환경 감시, 사물인터넷, 국방 기술 등에서 폭넓게 이용될 것이라는 것은 당연시되고 있다. 이 응용 영역들에서 배터리 디자인은 현재 일반적인 리튬-이온 배터리 이외의 방법을 찾고자 노력하고 있다. 저장된 전력에 의존하는 것에 비해 나노소자들은 새롭고 나노크기인 전력원을 사용할 가능성이 높다.

압전 나노발전기 기반의 자가 발전 나노기술은 나노소자와 나노시스템들이 작동하는 주위환경으로부터 수확된 에너지를 이용하여 전력을 공급하는 것이 목표이다. 이는 유기와 무기 물질들을 이용하여 기계적인 에너지를 수확하기 위한 완벽히 새로운 접근방법을 제공한다.

조지아 공대 왕 중린 (Wang Zhong Lin) 교수는 나노트랜지스터와 나노다이오드 등 새로운 전자소자들을 디자인하고 제조하는데 나노와이어와 나노벨트의 결합된 압전과 반도체 특성을 설명하기 위해 나노압전 소자라는 용어를 사용했다.

2006년 이후 나노발전기 (Nanogenerator) 기술을 발전시켜 온 왕 교수 연구팀은 나노발전기가 성대의 진동, 바람에 펄럭이는 깃발, 손가락의 두드림, 근육 움직임 구동 나노발전기에 의해 바이오 기계 에너지의 전기 발전이나 쳇바퀴를 돌리는 햄스터 등 불규칙적인 기계적인 움직임에 의해 구동될 수 있다는 보여주었다.

2011년으로 돌아가, 나노발전기의 개발에 대한 종합적이고 논리 정연한 리뷰를 제공하기 위해, 왕 교수는 지금까지 그의 그룹에서 게재된 논문들을 기반으로 자가 발전 소자와 시스템을 위한 나노발전기 (Nanogenerators for Self-powered Devices and Systems) 무료 전자 책을 발간했다. 이 책자는 그의 웹페이지에서 찾을 수 있다.

<https://smartech.gatech.edu/handle/1853/39262>

이 책의 목적은 독자들에게 이 기술의 개발에 대한 전체적인 내용을 제공하도록 기본적인 물질, 기초 물리학 원리와 이론, 과학적인 접근방법, 공학적인 확대와 기술적인 응용

들에 관한 나노발전기에 대하여 서술하는 것이다.

"Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors"라는 제목의 ACS Nano 지에 최근 게재된 리뷰에서, 왕 교수는 상대적인 마찰 분극을 가진 두 물질 사이에서 접촉 분리나 스침을 통해 소개된 마찰 대전과 정전기 사이의 결합 효과를 이용하여 기계적인 에너지를 전기로 전환시키는 소자인 마찰전기 나노발전기 (TENG)의 기본에 관한 최신 요약과 새로운 에너지 기술과 자가 발전 활성 센서들에 관한 최근의 발전과 가능한 응용들에 대한 소개하고 있다.

또한, TENG는 내부 회로에서 마찰 대전과 외부 회로에서 정전기 유도 과정들을 통해 기계적인 흔들림을 전기적인 신호로 전환하는 물리적인 과정이다. 1880년대로 거슬러 올라가는 마찰 대전의 기본 원리와 일반적인 대전 발전기들이 소개된 후, 왕 교수는 수직 접촉-분리 모드 기반 TENG, 수평 스침 모드 기반 TENG, 단일 전극 기반 TENG 등 다양한 형태의 TENG의 작동 원리와 나노크기에서 마찰 대전의 특성과 기본원리들을 자세히 설명하고 있다. (그림 1) 또한 왕 교수는 자신의 연구팀이 진동 에너지 수확, 인체 움직임에서의 에너지 수확, 자가 발전 활성 변형력 센서로 TENG, 자가 발전 활성 화학 센서인 TENG, 화학 센서를 위한 물 표면 기반 TENG 등을 제작했다.

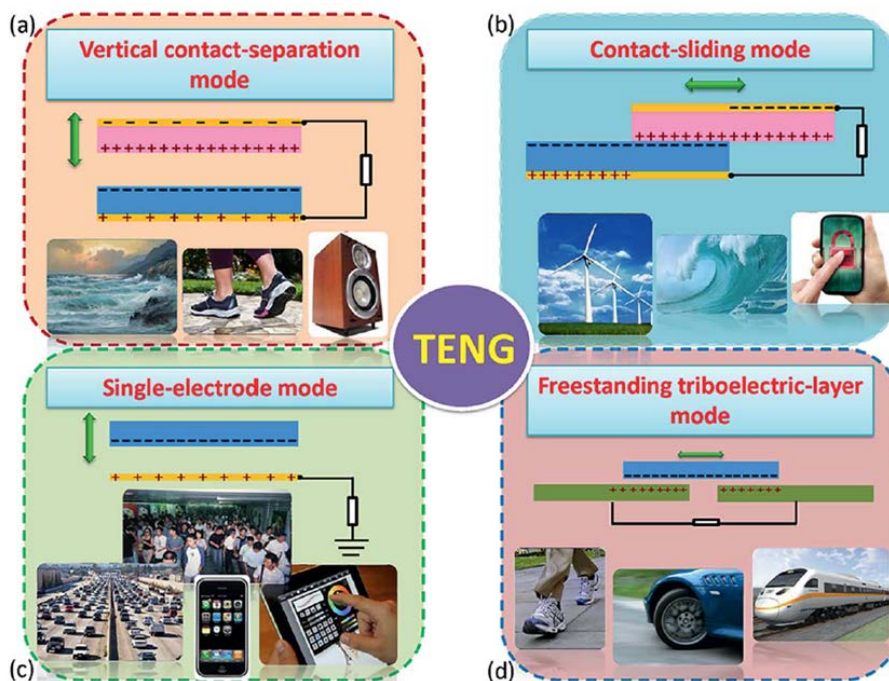


그림 1. 대표적인 TENG 모드 및 모드에 적합한 응용분야, (a) 수직 접촉-분리 모드, (b)

수평 스킴 모드, (c) 단일 전극 기반 모드, (d) Free-standing 모드

만약 신발에 이 나노발전기를 설치한다면, 걷거나 달리는 과정 중에 발바닥으로 전달되는 압축력을 통해 전기를 생산하는 것이 가능합니다. 이론적으로는, 통행량이 많은 광장이나 쇼핑몰 등지의 바닥은 물론 많은 진동이 발생하는 차도와 철로에도 이 나노발전기를 설치할 수 있다.

왕 교수는 1세대 나노발전기는 기껏해야 시간당 한자리 수의 볼트를 생산했을 정도로 조약한 발전 성능을 보이는 것이 사실이라고 고백한다. 하지만, 그는 현재의 기술은 1000개의 LED로 구성된 화면을 환하게 밝힐 수 있을 정도로 진보했다고 설명한다. 그는 기술의 발전 속도를 고려할 때, 5년안에 이 기술이 충분히 상용화 될 것이라고 예상하고 있다. 또한, 왕 교수는 마찰전기 나노발전기 기술의 미래가 물질과 소자 혼성에 대한 것이라고 지적했다. 또한 그는 자가 발전 아이디어는 감지, 의료 과학, 인프라 구조와 환경 감시, 국방 기술, 개인용 전자소자를 위해 매우 중요한 지속가능 자가 충족 마이크로/나노시스템을 실현하게 해 줄 나노기술의 새로운 패러다임을 제공할 것이라고 덧붙였다. 끝으로 그는 나노기술은 세계의 진보에 직면한 몇 가지 중요한 문제들을 해결해 줄 수 있을 것이며 이것은 현재와 미래 나노기술의 목표가 되어야 한다고 결론지었다.

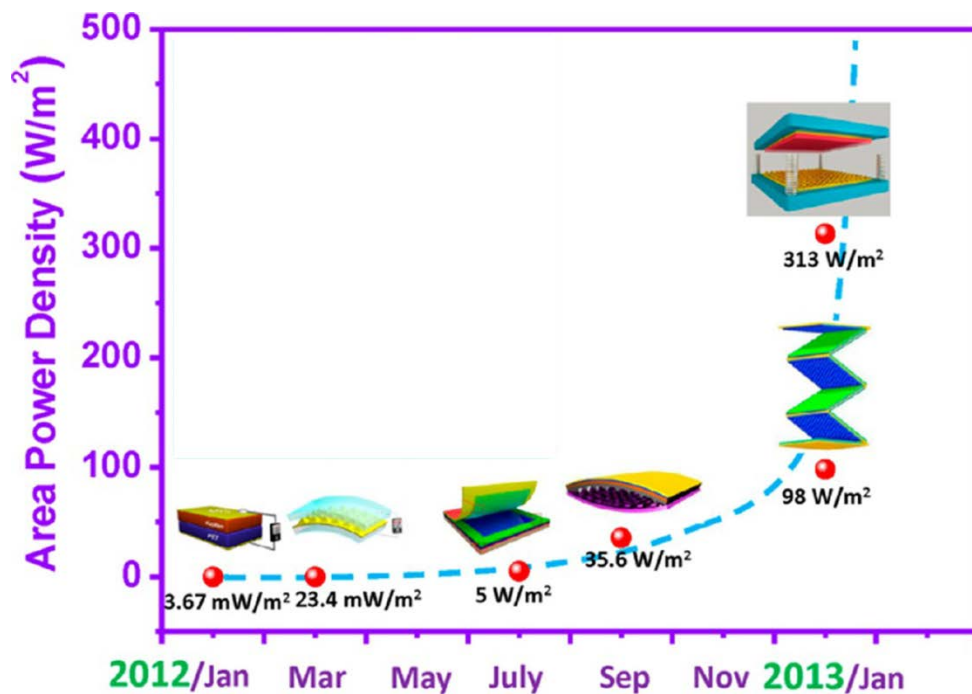


그림 2. 왕 교수 그룹에서 2012-2013년간 개발하고 있는 TENG 출력결과의 발전

2013년 종린 왕 그룹에서 발표한 리뷰 논문에는, 왕 교수 그룹에서 1년동안 발전시킨

TENG 소자의 출력전력에 대한 그래프를 한눈에 볼 수 있다. 불과 1년 사이에 TENG 소자의 출력값은 3.67 mW/cm^2 에서 313 W/m^2 으로 10^5 배 이상 급속도로 증가했으며, (그림 2) 2015년 현재, 뛰어난 소재 적용과 소자 구성의 최적화를 통해, TENG의 출력값은 1000 W/m^2 을 훌쩍 넘기고 있다. 이는 그림 3에서 나타낸 바와 같이 전자기기와 같이 가정용 전자제품에서 요구되는 매우 큰 전력량으로서, 압전, 열전과 같은 다른 나노발전기에서는 ($\sim \text{nW/m}^2$ 수준) 얻을 수 없는 매우 높은 전력량으로서 실용화에 가장 근접한 나노제너레이터 기술로 분류되고 있다. TENG 발전의 특성상, 교류 밖에는 생산할 수 없다는 단점이 있지만, 잘 개발된 정류장치들을 도입함으로써, IoT 시대의 나노/마이크로 센서는 ($\sim 1\mu\text{W}$) 물론 스마트폰 충전과 ($\sim 1\text{W}$) 같은 다양한 분야에 TENG를 적용할 수 있을 것으로 예상된다. 특히, 1년 안에 엄청난 효율 향상에서 보듯이, 연구 분야의 진입장벽이 낮고, 이미 개발된 다양한 고분자/금속 소재들을 그대로 적용할 수 있기 때문에, 가격 경쟁력 측면에서 기존 전자기유도 발전 시설을 대체할 수 있는 portable 자가발전 시스템으로 충분히 적용 가능 하리라 생각된다.

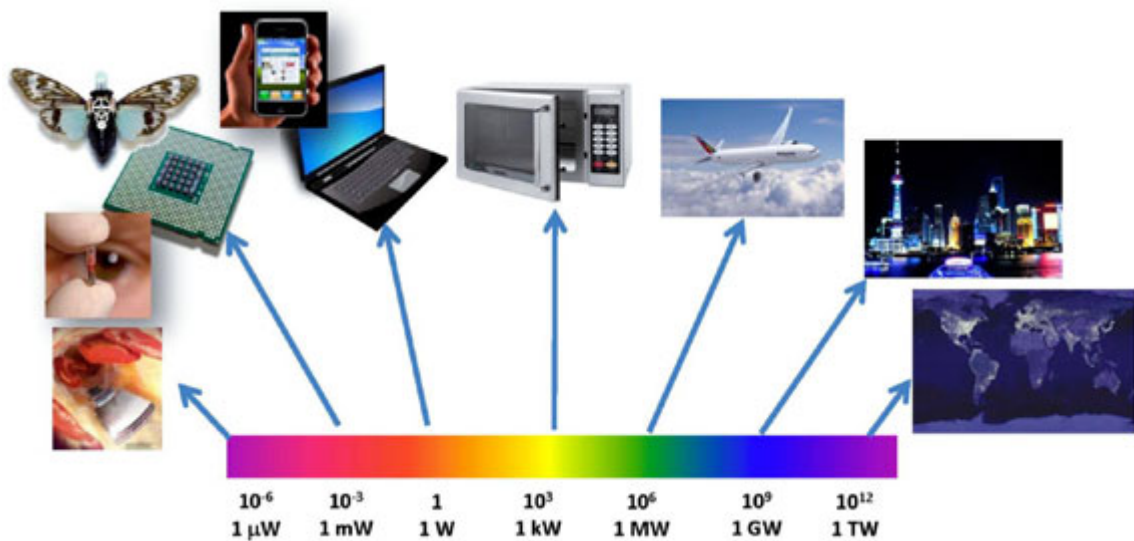


그림 3. 다양한 응용분야에서 필요로 하는 전력의 크기