

제 7 장 국내외 TENG 연구그룹 소개

이번 호에서는 마찰전기 자가발전소자 (Triboelectric Nanogenerator) 관련 연구를 수행하고 있는 국내외 연구그룹들에 대한 소개를 하고자 한다.

1. Zhong Lin Wang Group (Georgia Tech, 미국)

종린 왕 그룹은 압전소자를 이용한 나노발전기를 나노발전기라는 개념을 세상에 내놓았으며, 2012 년부터는 마찰전기 나노발전기 (TENG)에 대한 새로운 패러다임을 제시한 뒤 다양한 형태의 연구를 진행하고 있다. 종린 왕 그룹에서는 소재의 조합, 새로운 소자의 구성, TENG 메커니즘 규명, TENG 를 적용한 다양한 응용분야, 발생 전기에너지의 정류화 기술 등 매우 광범위한 영역에 대해 연구를 진행 하며, 지속적으로 새로운 개념들을 제시함으로써 TENG 연구의 저변을 넓혀가는 역할을 하고 있다. 또한 종린 왕 교수는 Georgia Tech. 뿐만 아니라 중국의 "Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems"를 동시에 이끌고 있으며, 최근 중국 연구자들도 관련 분야 연구를 대거 발표하고 있다.

종린 왕 그룹에서는 2012 년부터 현재까지 약 3 년간 100 편 이상의 TENG 관련 논문을 발표하고 있으며, 본 보고서에서는 최근 발표된 대표적인 연구성과들에 대해 정리해 보고자 한다.

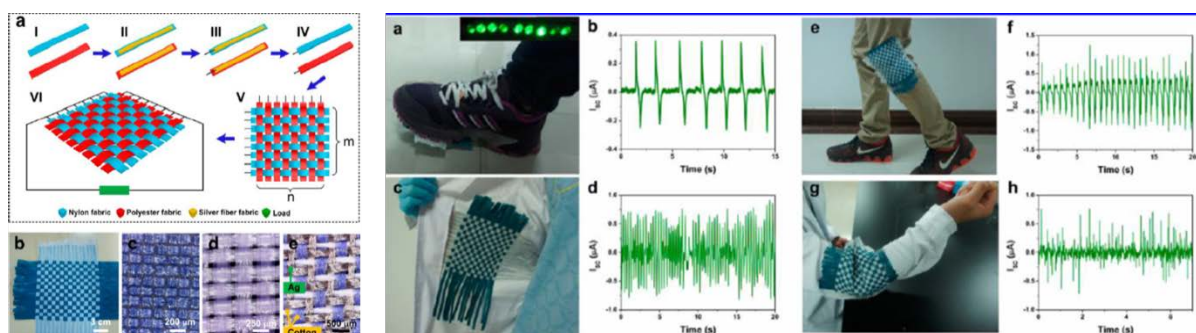


그림 1. 직조 (woven) 형태의 구조를 가지는 wearable TENG

먼저, 그림 1 의 결과를 살펴보면, 손쉽게 구할 수 있는 나일론과 폴리에스터 섬유에 전도성 섬유로 잘 알려진 은섬유를 각각 붙여서 TENG 양단의 전극 소재를 제작하였다. 이렇게 제작된 섬유들은 의류 제작에 사용되는 소재들로서, 당연히 flexible 하며 심지어 물로 세척이 가능한 소재들이다. 은 섬유가 부착된 나일론과 폴리에스터 섬유를

이용하여 씨줄, 날줄로 천을 짜듯이 16x16 형태의 flexible TENG 소자를 제작하였으며, 이는 다양한 의류, 신발에 적용이 가능하였다. 이를 이용하여 걷거나 팔꿈치를 구부리는 등 일상적인 움직임 만으로도 LED 를 구동할 수 있는 수준의 전력을 생산할 수 있었다. 단순히 구부러지거나 접히는 수준이 아니라 실제 의류에 적용이 가능하며, 심지어 세척까지 가능한 TENG 소재 및 소자에 대한 개념을 제시함으로써, wearable device 에 충분히 적용이 될 수 있다는 가능성을 보여주었다. *ACS Appl. Mater. Inter.* **6**, 14595 (2014)

그림 2 에서는 3 차원 구형태를 가지는 TENG를 이용한 발전소자를 보여주고 있다. 파도에 의해 중심에 움직일 수 있는 전극 구슬이 바깥쪽 구의 표면에 부딪히면서 발생하는 전기를 이용하여 발전하는 원리이다. 사용된 소재는 현재 범용적으로 사용되고 있는 고분자와 금속 소재이다. 약 10 cm 가량의 TENG 1 개가 생산할 수 있는 에너지는 매우 작지만 ($100\text{mW}/\text{cm}^2$), 이러한 TENG를 그물과 같이 수 km^2 에 걸쳐서 수십 만개의 TENG를 바다 위에 띄워놓는다면 파도에 의해 지속적으로 전기를 생산할 수 있는 있으며 이때 생산 가능한 전력은 1 MW수준이 될 것으로 예상된다. 이 정도의 에너지는 비행기 엔진에서 사용되는 에너지에 버금가는 큰 에너지로서 실제 응용범위는 매우 넓을 것으로 예상된다. 이는 새로운 개념의 파력발전이 가능함을 보여주고 있다. 기존 파도가 터빈을 돌려서 유도전류를 생산하는 기존 파력발전에 비해, 운동에너지를 전기에너지로 직접 전환하는 방식이기 때문에 발전 효율은 월등히 높다. *Advanced Energy Materials* **3**, 1563 (2013)

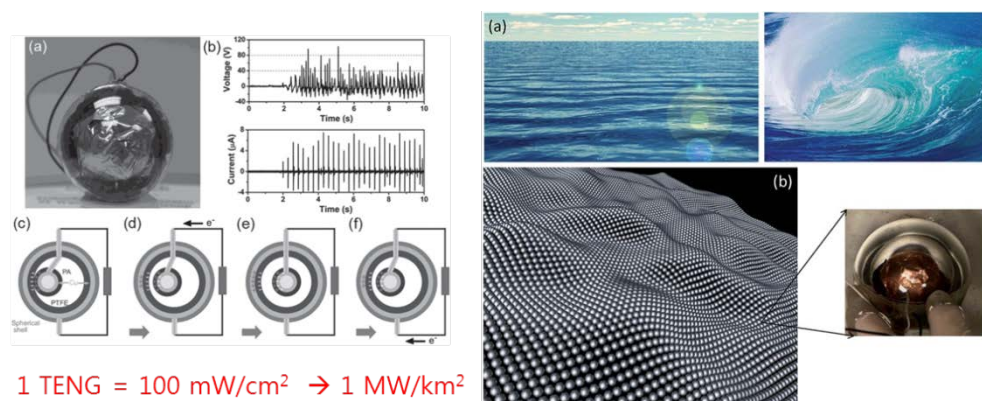


그림 2. 3 차원 구형 TENG 소자의 구조 및 구동원리, 이를 이용한 파도로부터 대용량의 전기를 생산할 수 있는 개념도

이러한 대용량 발전뿐 만 아니라, 마찰되는 범위나 마찰되는 압력에 따라 발생하는 전기량이 민감하게 반응하기 때문에, TENG 는 발전기 용도뿐 만 아니라 미세한 압력/터치 센서로 작동할 수도 있다. 특히, 기본적으로 자가발전이 가능한 시스템이기 때문에 외부 전원장치 없이 센서를 구동할 수 있어서, 향후 wearable 센싱 소자에 적합한 플랫폼이라 할 수 있다. 그림 3 에서 보여주는 예시와 같이 한 방울의 물이나 깃털과 같이 매우 가벼운 물질에 대한 압력 센싱이 가능하다. 이는 압력뿐 만 아니라 서로 다른 물체간에 발생하는 마찰 전기 효과 때문에 센서의 감도는 기존 기계적 압력센서에 비해 훨씬 민감하다. *Nano Letters 12, 3109 (2012)*

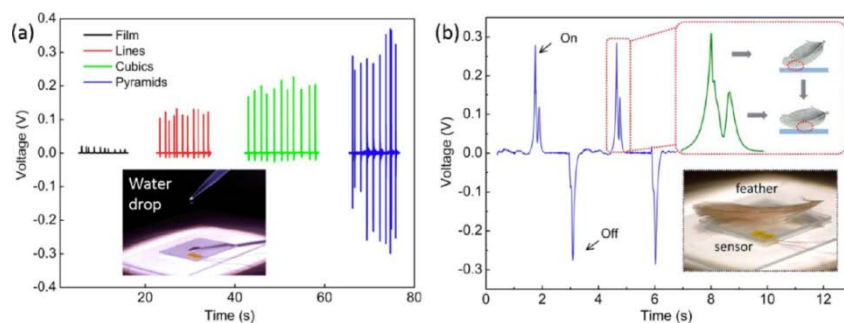


그림 3. 미세한 마찰, 압력, 충격에 의해서 전력이 발생할 수 있으며, 높은 민감도를 가지는 압력 센서

2. 김상우 교수팀 (성균관대학교, 한국)

한국에서는 성균관대학교 신소재공학과 김상우 교수 그룹이 TENG 분야에서 가장 두각을 나타내고 있다. 김상우 교수팀 역시 종린 왕 그룹과 마찬가지로 세라믹 기반의 압전소자에 대한 연구를 왕성하게 진행해왔으며, 2012년부터 TENG 에 대한 연구를 시작하였다. 한국에서는 TENG 분야에서 독보적인 연구 결과들을 보여주고 있다. 특히 전자 산업이 매우 발달한 한국의 분위기에 맞춰, 삼성/LG 와 같은 전자회사들과의 공동연구를 통해, 실용화에 가까운 연구를 진행하고 있다. 특히, flexible/wearable TENG 분야에서는 종린 왕 그룹에 뒤쳐지지 않을 만큼 높은 기술력을 보유하고 있는 것으로 파악된다. 김상우 교수팀의 대표적인 최근 성과를 살펴보면, 그림 4 에서 보는 바와 같이, 상용화된 직조 섬유를 이용하여 flexible 한 TENG 를 개발하였다. 사용된 직조 섬유는 은 (Ag)로 코팅이 되어 있어 전도성을 가지고 있으며, 그 반대쪽 소재로는 ZnO 나노와이어가 표면에 성장되어 있고, PDMS 로 표면이 처리된 은 섬유를 사용하였다.

섬유 형태로 소자가 구성되었기, flexible 할 뿐만 아니라 접는 것도 가능하여 실제 옷에도 장착이 가능하다. 옷에 부착이 가능한 TENG 는 매우 높은 출력값을 가지기 때문에 간단한 문지름과 일상적인 신체 동작을 통해 LED, LCD, 무선 송신기를 구동할 수 있음을 보여주었다. 이러한 flexible/wearable TENG 의 개발은 배터리가 필요 없는 자가발전형 wearable device 의 발전을 가져올 것으로 기대된다. ACS Nano 9, 3501 (2015)

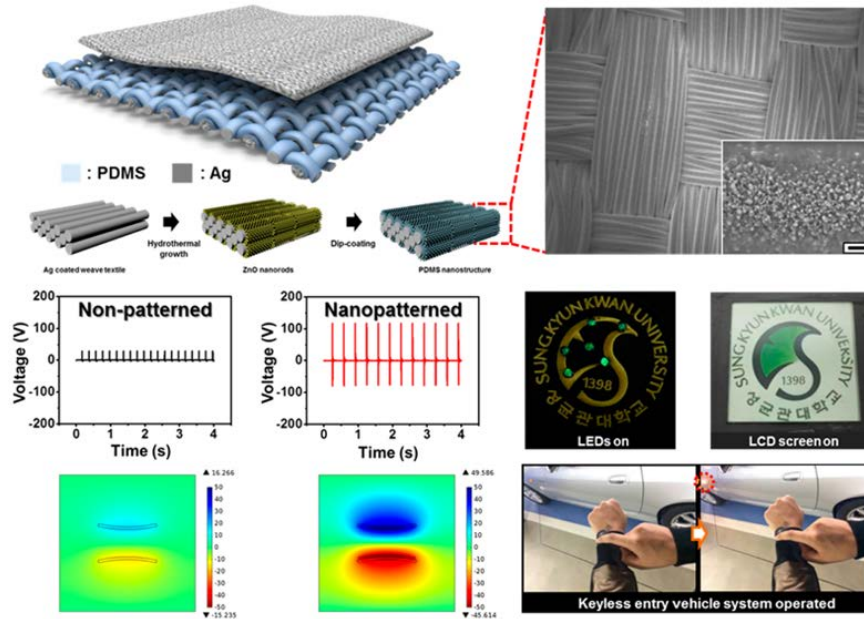


그림 4. 직조 섬유를 이용한 flexible TENG 개념도 및 이를 이용한 전자소자 작동 예시

3. 백정민 교수팀 (UNIST, 한국)

UNIST 백정민 교수팀은 TENG 소재의 나노구조화를 통해 높은 출력을 가지는 TENG 소자를 보고하고 있다. 대표적으로는 그림 5 에서 보는 바와 같이, 광결정에 사용되는 나노입자의 자기조립 구조를 템플레이트로 하여, sponge 구조를 가지는 TENG 소재를 개발하였다. Sponge 구조를 가짐으로써, 표면적이 매우 넓어져서 마찰전기를 일으키는데 도움이 될 뿐만 아니라, 초발수 성질까지 동시에 가지게 된다. 마찰전기 현상은 습도가 높으면 그 효율이 떨어지게 되는데, 초발수 성질을 가지는 TENG 소재를 개발함으로써, 습도가 높은 환경에서도 큰 변화 없이 소자가 구동할 수 있는 장점을 가지고 있다.

Advanced Materials, 26, 5037-5042 (2014)

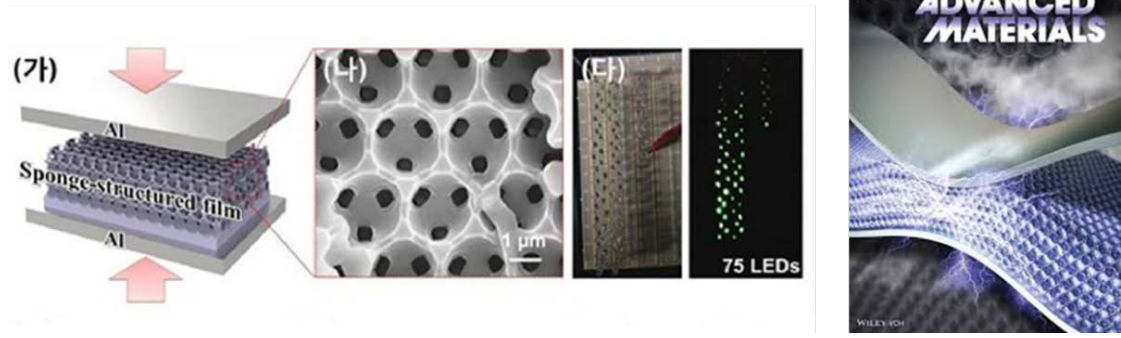


그림 5. 미세나노구조화를 통해 초발수 성질을 가지며 효율이 극대화된 TENG 소자 개발

4. 김호영 교수팀 (서울대학교, 한국)

서울대 김호영 교수팀은 재료, 화학 전공을 가지는 다른 한국 연구자들과 달리 기계공학과를 전공으로 하고 있으며, TENG 연구에 대한 접근 방식도 조금 다르다. 김 교수팀 연구의 특징은 깃발의 움직임은 물리적으로 해석하고, 깃발이 이중 표면과 접촉/마찰 운동에 의해 발생하는 마찰전기를 이용한다. 바람의 속도나 깃발의 크기에 따라 접촉할 수 있는 패턴이 서로 상이하므로, 이를 최적화 함으로써, 보다 효율적인 TENG 를 개발할 수 있는 가능성을 제시하였다. 또한, 직접 제작한 깃발 기반의 TENG 소자를 빠르게 운행하는 자동차에 장착함으로써, 운행시 발생하는 바람에 의해 전기를 생산, 충전할 수 있음을 보여주었다. *Nature Communications, 5, 4929 (2014)*

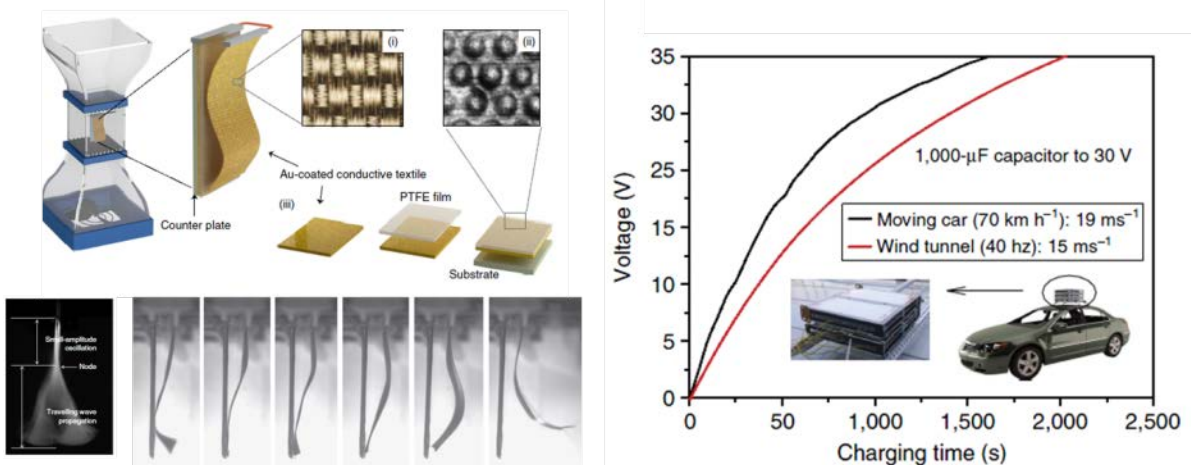


그림 6. 깃발의 마찰을 이용한 TENG 모드와 자동차 움직임을 통한 전기 생산

5. 기타

TENG 연구분야는 모식도에서 보는 바와 같이, 소자 구조가 매우 간단하고 적용 가능한 소재들도 매우 다양하기 때문에, 진입장벽이 낮은 특징을 가지고 있다. 그 결과 기존의 압전 소자를 연구하던 그룹이나 다양한 금속, 고분자 소재를 다루는 연구그룹에서도 손쉽게 TENG 연구를 위해 뛰어 들고 있는 상황이다. 대표적으로는 KAIST 이근재 교수팀, 단국대 이민백 교수팀, 삼성중기원 배지현 박사팀, 충남대 나정호 교수팀, 경희대 이민형 교수팀 등에서 다양한 형태의 TENG 에 대한 연구를 활발히 진행 중에 있다. 최근에는 잘 알려진 소재 표면을 간단하게 화학적으로 처리함으로써, 아주 손쉽게 대면적의 TENG 를 제작할 수 있는 방법이 소개되었다. 그림 7 에서 보는 바와 같이 평범한 PET 기판을 (+) 전하를 띄게 하는 Poly-L-lysine 과 (-) 전하를 띄게 하는 F-OTS 로 처리하여 쌍으로 조합함으로써, PET 간의 조합에 비해 수천배 이상 향상된 TENG 를 제작할 수 있는 기법이 발표되었다. 새로운 소재 개발 없이도, 기존 소재에 간단한 공정을 도입함으로써, 실생활에 충분히 적용함을 보여주었다. *ACS Nano 9, 4621 (2015)*

대부분의 TENG 분야의 한국 연구자들은 TENG 의 물리적인 메커니즘, 신규 소재 개발 보다는 대부분 잘 알려진 소재를 이용하여 높은 출력 값을 낼 수 있고 실용화에 근접한 값싸고 대용량의 소자 개발 쪽으로 연구를 진행하고 있음을 알 수 있다. TENG 라는 연구분야가 태동하는 시기이기 때문에, 현상 위주의 연구들이 많이 수행되고 있기 때문이라 생각된다. 또한, 한국의 연구그룹들의 대부분이 종린 왕 그룹과 직/간접적으로 관련이 되어 있다는 것도 특징이다.

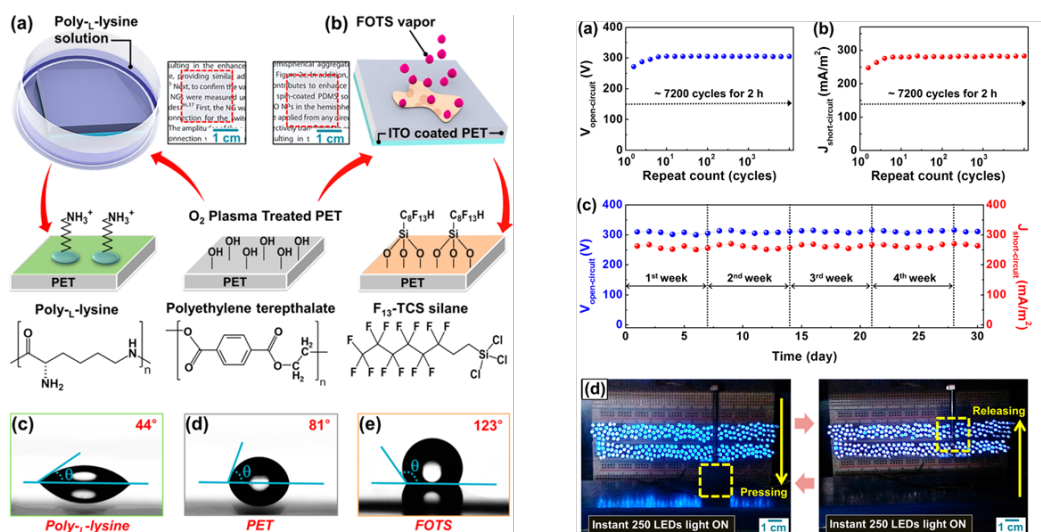


그림 7. PET 기판의 간단한 표면 처리를 통한 TENG 소재 및 이를 이용한 LED 구동예시