

# 산화물 압전나노소재 기반 나노전력 발전소자 연구동향

김상우 / 성균관대학교

나노기술(NT)을 바탕으로 정보기술(IT), 에너지기술(ET), 등이 융합되는 유비쿼터스 기술들이 등장하고 있는 지금, 미래 생활 속에 등장하게 될 나노스케일 머신 또는 입는 컴퓨터-디스플레이의 전원 공급에 관련된 이슈가 미래 산업 발전에 있어 중요한 문제로 대두되고 있다. 각각의 나노머신들이 전기선의 연결 없이 자체 발전 전원을 가지고 구동해야 하기 때문에 자체적으로 전력을 생산해 낼 수 있는 장치의 개발이 시급한 상황이다. 이에 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 자체 전력

생산이 가능한 압전체 나노구조물을 이용한 나노 발전소자의 제작에 관한 연구가 최근 각광을 받고 있다.

## 1. 새로운 개념의 친환경 에너지 발전소자

압전성(piezoelectric property)을 이용한 발전소자의 경우 기존의 태양전지, 풍력, 연료전지등과 같은 친환경 에너지와 달리 주변에 존재하는 진동이나 인간의 움직임으로부터 발생된 소모성의 기계적 에너지를 전기에

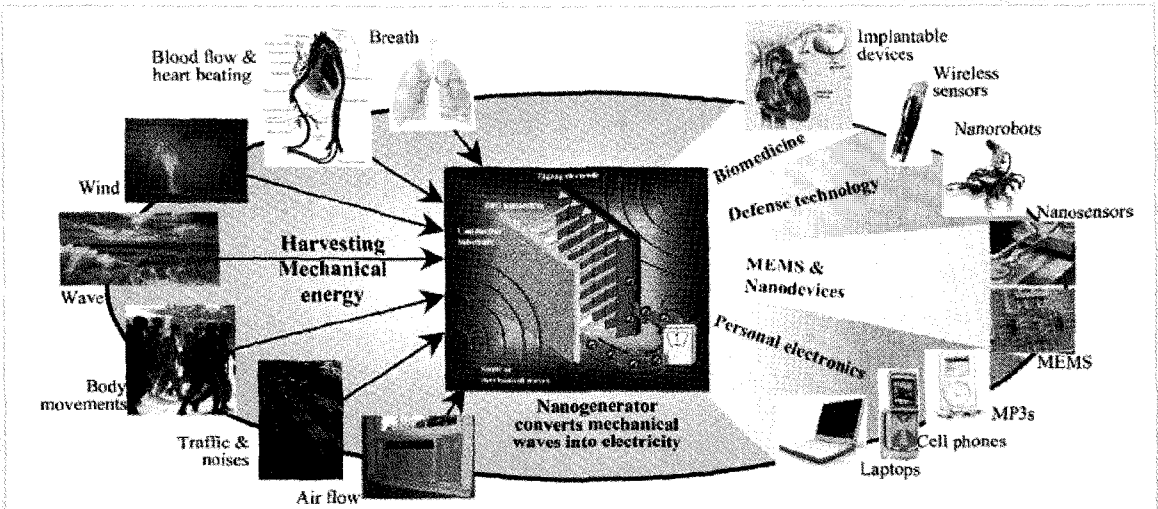


그림 1 나노구조물을 이용한 나노전력발전소자(nanogenerator)의 다양한 구동 에너지원(출처: 미국 조지아텍 Z. L. Wang 교수 그룹)<sup>1)</sup>

너지로 무한히 추출할 수 있는 새로운 개념의 친환경 에너지 발전 소자라 할 수 있다. 이러한 에너지 변환 방식은 변환 효율이 크고 소형·경량화가 가능하다는 장점을 가진다. 화석연료의 고갈 및 환경문제의 대두로 인하여 화석 에너지의 소비를 줄이기 위해 새로운 에너지 자원을 확보하기 위한 각국의 노력이 진행되고 있는 상황에서 차세대 그린에너지원으로서 새롭게 주목받는 분야라 할 수 있다.

## 2. 나노소자와의 융합을 통한 획기적인 ET-IT 기술 도약을 이끌 새로운 기술

최근 나노기술의 발달로 인해 저전력 소모형 나노소자를 구현할 수 있는 높은 기술 수준에 이르고 있다. 하지만 전력을 공급해 주기 위한 배터리는 나노소자에 비해 매우 큰 면적을 차지 할 뿐만 아니라 제한된 수명으로 인해 나노소자의 성능을 제한시키는 단점이 있다. 반면 1차원 나노구조물 기반 나노전력발전소자(nanogenerator)의 경우 소자 전체 시스템을 나노 크기로 만들 수 있을 뿐만 아니라 지속적이고 독립적인 소자의 구동을 가능하게 한다. 따라서 나노전력발전소자의 개발은 나노소자의 기술적인 한계를 극복 시켜줄 획기적인 기술로 평가받고 있다.

1차원 나노구조물 기반 나노전력발전소자의 경우, 그림 1에서 보여 지는 것과 같이 바람, 조류, 소음, 신체움직임 등의 자연의 기계적 에너지 뿐만 아니라 압전소재의 나노화에 따라 기존의 벌크 및 박막형 압전소재와 비교하여 압전 효율의 매우 큰 증가(수십 수백배)로 소자 특성을 대폭 향상시킬 수 있어 심장박동, 혈류 등의 체내 미세진동과 같은 매우 작은 힘에 의해서도 구동이 가능하다. 또한, 파괴 없이 큰 변형이 가능한 1차원 나노구조물을 이용함에 따라 투명하며 플렉서블한 소자의 제작이 가능하다. 이는 인체 삽입/내장형 의료기기, 태그용 전원, 센서 노드, 마이크로 및 나노로봇의 전원장치와 같은 다양한 분야에의 본 나노전력발전소자의 응용가능성을 의미한다.

## 3. 고효율 나노전력발전소자구현을 위한 다양한 노력

마이크로 에너지 추출 기술의 경우에는 미국을 중심으로 센서 노드 등과 같은 소형 디바이스의 직접 전원으로

로 적용하는 연구들이 활발히 진행되고 있으며, 국내의 경우에는 초기 연구 단계에 머물러 있다. 기계적 에너지를 전기에너지로 변환시키는 기술은 소재/변환 방식에 따라 압전효과 방식, 정전효과 방식, 전자기효과 방식으로 나누어진다. 국내의 경우에는, 압전시스템 분야에서 상대적으로 연구가 활발하지만 압전소재 관련 원천 소재개발 기술이 취약하고 대부분이 MEMS/NEMS 구조체 연구에 집중되어 있어, 합성된 나노구조물의 압전효과 방식을 이용한 에너지 변환소자 개발 현황은 거의 전무한 상황이다. 현재 고효율 나노전력발전소자 개발과 관련하여 미국 조지아텍 Z. L. Wang 교수 그룹이 선도적인 연구결과들을 발표하고 있으며 구체적으로 단일 ZnO 나노와이어를 이용한 에너지 변환 메카니즘 연구, DC 형태의 에너지 발전소자 제작, 황으로 ZnO 나노와이어를 패키징 함으로써 새로운 에너지 변환 메카니즘 보고 및 불규칙한 인체 또는 동물의 움직임으로부터 전기적 에너지를 생산함으로써, 인간 구동 에너지 발전소자의 가능성을 보여주었다. 최근에는 인체 무해하며 소형의 발전소자 제작을 통해 인체에 삽입하는 소자의 에

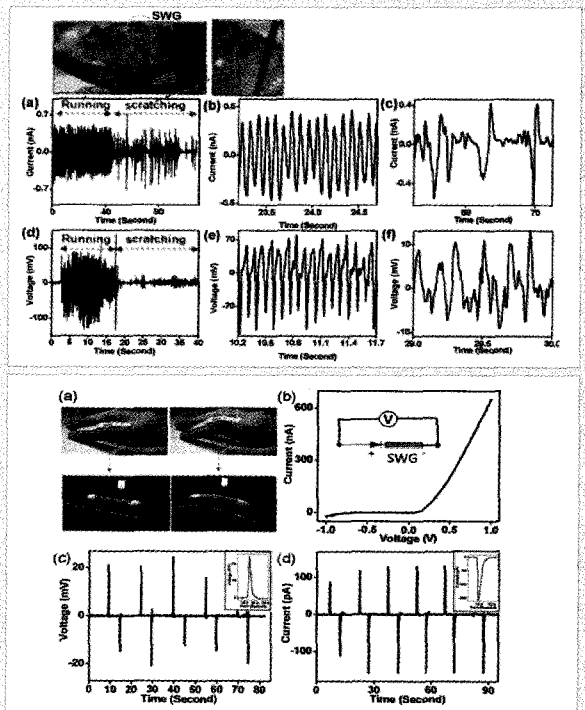


그림 2 단일 ZnO 마이크로와이어 기반 나노전력발전소자를 이용하여 햄스터의 쳇바퀴 운동을 통한 전력발전(상) 및 사람의 손가락 움직임을 통한 전력발전(하)을 구현한 연구결과 (출처: Nano Letters 2009, 미국 조지아텍 Wang 교수 그룹)<sup>[2]</sup>

너지원으로서의 가능성 확인하고 있는 상황이다. 그러나 현재까지 나노발전소자를 제작 및 실제로 측정된 출력 전류 값은 수  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 에 불과하여 대면적 고효율 소자 구현을 위해서는 더 높고 안정적인 전력 생산이 반드시 필요한 상황이다. 최근 국내의 경우 성균관대의 본 저자 연구실과 삼성종합기술원 공동연구그룹, 한국전자통신연구원, 한국과학기술연구원, 한국세라믹기술원 및 국외의 미국 조지아텍 Z. L. Wang 교수 그룹을 포함한 국내외의 다수 그룹에서 최근 활발히 연구를 진행하고 있으나 나노구조물을 이용한 대면적 소자의 제작, 그 신뢰성 및 특성을 평가하는 연구는 초기 단계로 많은 추가 연구가 절실히 필요한 실정이다.

본 연구분야를 세계적으로 선도하고 있는 그룹은 전술한 미국 조지아텍 Z. L. Wang 교수 그룹으로서 세계적인 선도 연구결과물을 지속적으로 발표하고 있다. 2007년 GaN 기판 위에 성장된 ZnO 나노와이어를 이용하여 초음파 진동을 외부에서 가해 전기를 발생시킬 수 있는 나노발전기(나노제너레이터)를 개발 결과를 Science지에 보고한데 이어,<sup>[3]</sup> 2008년에는 외부에서 초음파 진동과 같은 에너지 공급이 전혀 필요 없는 마이크로 섬유-ZnO 나노와이어 복합구조 나노제너레이터 개발 및 특

성평가에 관련한 연구결과를 Nature지에 발표하였다.<sup>[4]</sup> 논문에서는 c-TEOS(two layers of tetraethoxysilane)를 주입시킨 섬유에 직경 50 nm 급 ZnO 나노와이어를 성장시킨 후 금으로 코팅된 다른 ZnO 나노와이어 섬유를 고정시켜 이 섬유에 다른 섬유를 꼬아 잡아당김으로써 마찰을 일으켜 생산되는 전류 시그널을 측정, 1 m<sup>2</sup> 당 80 mW의 전기를 생산해 낼 수 있다고 발표하였다. 이 섬유로 옷을 해 입으면 소매가 접히거나 옷깃이 바람에 날리는 정도의 매우 약한 에너지로도 전기를 발생시킬 수 있으므로, 단지 걷거나, 숨을 쉬거나, 심장의 박동만을 이용해도 차세대 입는 컴퓨터-디스플레이 구동원으로서의 훌륭한 역할을 할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

#### 4. 대면적 투명 플렉서블 나노전력발전소자 구현

본 저자의 연구그룹과 삼성전자 종합기술원은 공동 연구를 통하여 ZnO 나노로드의 압전성을 이용한 세계 최초 대면적 투명 플렉서블 나노전력발전소자 구현에 성공하였다. 하판 전력발전 층 구현을 위해 플렉서블 기판(PES) 상에 저온(90도)에서 용액공정을 이용한 습식 화학합성법을 통하여 수직으로 잘 정렬된 ZnO 나노로드 직접 성장 및 모폴로지 제어를 구현하였으며, 하판 ZnO 나노로드에서 발생된 전자의 효율적인 흐름 제어를 위해 AAO (Aluminum Anodic Oxide) 템플레이트 방식을 도입하여 쇼트키 접합 용 플렉서블 상부전극 구현을 위해 플렉서블 기판 상 투명하고 플렉서블한 고효율 나노발전소자를 제작하였다(그림 4). 일반 성인의 검지 손가락으로 본 연구에서 구현된 나노전력발전소자를 상부에서 눌렀을 경우(성인 검지 손가락이 휴대폰의 터치스크린 및 컴퓨터 키보드를 누르는 힘이 약 0.3 ~ 0.9 kgf 정도임), 누르는 힘에 따라 발생되는 전류 값의 변화를 확인할 수 있었다. 투명하며 플렉서블한 나노전력발전소자 구현을 통하여 디스플레이소자의 에너지 발생형 터치스크린과 같은 좀 더 폭 넓은 범위의 IT-ET 소자 응용 가능성을 확인하였고, 차세대 모바일, 디스플레이 소자 적용을 목표로 투명 플렉서블 나노전력발전소자의 상용화를 위해 본 저자 연구그룹과 삼성전자는 지속적인 협력연구를 수행하고 있다.

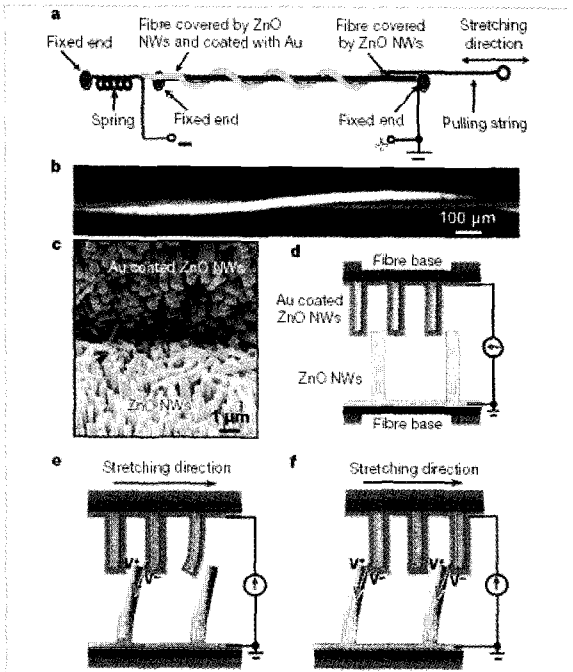


그림 3 ZnO 나노와이어-마이크로파이버 하이브리드 발전섬유 구동 모식도 및 전류발생 메커니즘<sup>[4]</sup>

## ● 기 획 시 리 즈

연구에서 구현된 나노전력발전 소자의 상부에 응력을 가해질 경우 나노막대기와 나노스케일로 요철화 된 상부전극간의 배치에 따라 나노막대기가 수평방향으로 휘어지거나 수직방향으로 응력을 받게 됨. 수평방향으로 굽어진 나노막대기의 경우(I, II 및 III'), 압축된 나노막대기로부터 전자가 상부전극으로 방출되어 전류가 발생하게 되며, 수직방향으로 응력을 받는 나노막대기의 경우(III 및 IV)는 상부전극과 닿아있는 나노막대기로부터 전자가 방출이 되게 됨(III). 또한 ZnO 나노로드의 기계적 안정성을 평가하기 위해 상부 압력에 따른 밴딩 발생 시 나노로드 내부의 응력분포에 따른 포텐셜 변화 시뮬레이션 결과 1 GPa의 매우 큰 압력에 의해서도 ZnO 나노로드의 파괴가 일어나지 않는 기계적으로도 매우 안정한 특성을 가짐을 유추할 수 있었다(그림 5).<sup>[5]</sup>

### 5. 나노전력발전소자의 전망

나노구조물의 압전 특성을 이용한 에너지 발전소자의 개발은 기존 나노소자의 제조 기술과 결합하여 전체

소자가 나노시스템으로 이루어진 구조로 제작할 수 있을 것으로 예상된다. 이로 인해 나노센서, 나노전자소자, 나노광소자, 나노바이오 소자와 같은 매우 작은 크기의 소자를 외부의 에너지 공급원 연결선이 없이 독립적이고 지속적으로 구동시킬 수 있음에 따라서 각 분야에서 획기적인 기술 도약이 이루어 질 것으로 예상된다. NT-IT-ET 기술 융합을 통해 에너지 발생 소자 또는 관련 산업 분야의 원천기술 확보와 함께 국내는 물론 국외의 차세대 에너지 시장에 대해 매우 큰 파급효과를 나타낼 수 있을 것이다. 또한 이 기술을 통하여 미래형 플렉서블 전자소자 개발을 목표로 하는 부품소재 원천기술 연구 분야의 발전에도 크게 기여할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 나노전력발전소자의 개발은 휴대용 가전기기과 같은 전자제품을 사용자가 자가적으로 충전할 있는 사용자 발전 (UCP : User Created Power) 시스템과 같은 새로운 에너지 시장을 형성할 것으로 보여 진다. 이는 다른 신재생 에너지와 같이 화석연료 사용 절감 효과를 통한 경제적 이점뿐만 아니라 환경보호적인 이점도 함께 얻을 수 있을 것으로 기대되어 진다.

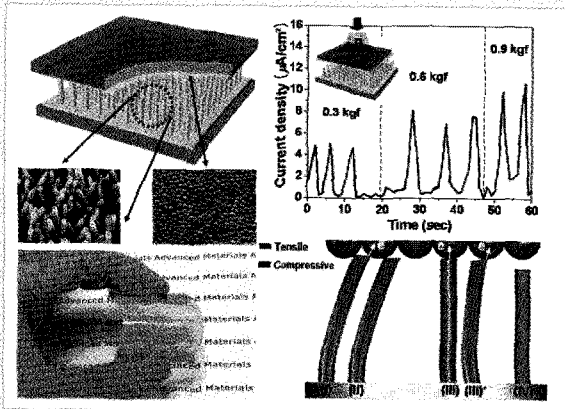


그림 4 대면적 투명 플렉서블 나노전력발전소자모식도 및 ZnO 나노로드와 상부전극 전자현미경 이미지(상부좌측). 투명 플렉서블한 특성(하부좌측). 사람 손으로 누르는 힘에 의한 전력발생 특성결과(상부우측) 및 전류발생 메커니즘 모식도(하부우측)<sup>[5]</sup>

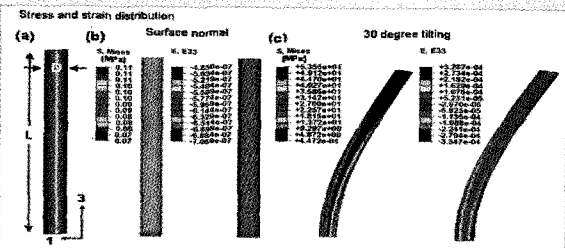


그림 5 굽힘(압력)에 따른 각 나노로드 내부의 포텐셜 변화 시뮬레이션 결과

### 참고문헌

- [1] Z. L. Wang, Adv. Func. Mater. 18, 1 (2008).
- [2] R. Yang, Y. Qin, Cheng Li, and Z. L. Wang, Nano Lett. 9, 1201 (2009).
- [3] X. D. Wang, J. H. Song, J. Liu, and Z. L. Wang, Science 316, 102 (2007).
- [4] Y. Qin, X. D. Wang, and Z.L. Wang, Nature 451, 809 (2008).
- [5] M.-Y. Choi, D. Choi, M.-J. Jin, I. Kim, S.-H. Kim, J.-Y. Choi, S. Y. Lee, J. M. Kim, and S.-W. Kim, Adv. Mater. 21, 2185 (2009).

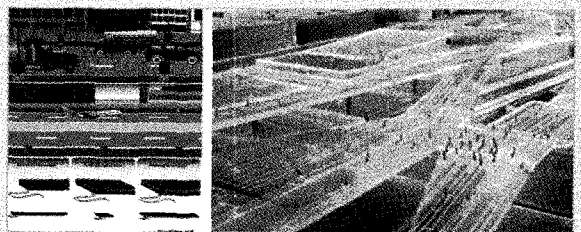


그림 6 압전체를 바닥에 깔아 차가 달릴 때마다 전력을 생산하는 시스템. MIT에서 설계한 도시 전체 바닥에 압전체를 깔아 줌으로써 무공해 전력을 생산하는 시스템