

# Flexible Piezoelectric Energy Harvesting

글 \_ 송현철, 도영호, 강종윤, 윤석진  
한국과학기술연구원 전자재료센터

## 1. 서론

최근 화석연료의 고갈 및 이로 인한 지속적인 에너지 가격 상승과 화석연료의 온실가스 배출로 인한 환경문제가 크게 제기 됨에 따라 신재생 에너지 및 에너지 효율 향상에 대한 사람들의 관심이 크게 높아지고 있다. 자동차, IT 통신, 환경 등 산업계 전반에 걸쳐 에너지 효율 향상 및 에너지 저장 기술 개발에 노력을 기울이고 있으며,

환경을 훼손하지 않으면서도 안정적으로 공급이 가능한 미래의 새로운 에너지 자원을 개발하기 위해서도 다양한 시도를 하고 있다.

특히, 새로운 형태의 신재생 에너지인 에너지 하베스팅(Energy harvesting) 기술의 경우 최근에 크게 각광을 받고 있다. 에너지 하베스팅 기술은 우리 주변에서 버려지는 에너지를 우리가 쓸 수 있는 전기에너지로 변환하여 이용함으로써, 전자제품이나 여러 기기들의 에너지

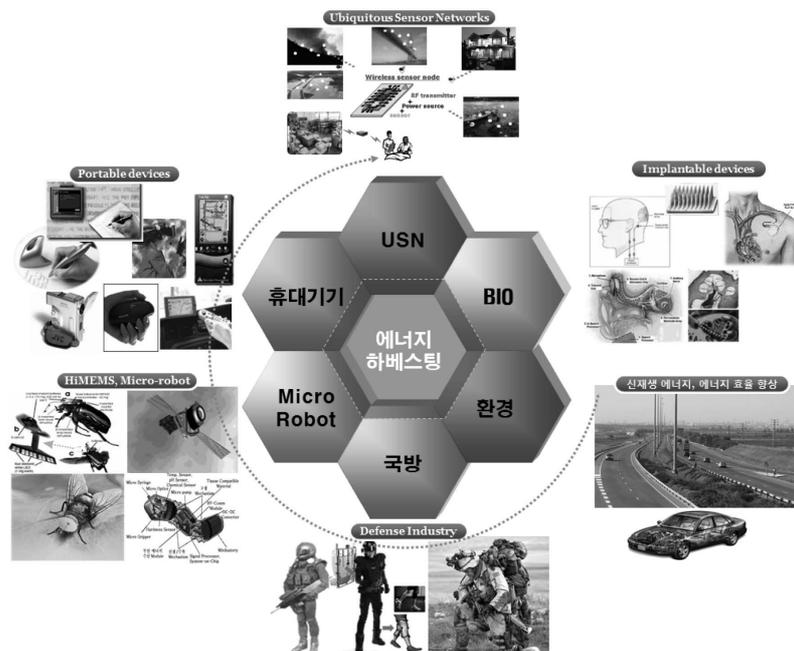


Fig. 1. 에너지 하베스팅의 다양한 응용.

효율을 크게 향상시킬 수 있을 뿐 만 아니라 궁극적으로는 추가적인 에너지 공급 없이 주변의 에너지를 이용하여 독립적으로(stand-alone) 구동이 가능하도록 하는 기술이다.

에너지 하베스팅 기술은 크게, 오래전부터 연구되어 오고 있는 태양광 발전과 열전소자의 Zeeback 효과를 이용하여 온도차로부터 전기에너지를 얻는 열전 발전, 그리고 압전체를 이용하여 주변의 진동이나 충격으로부터 전기에너지를 얻는 압전 발전으로 나눌 수 있다. 특히, 압전체를 이용한 에너지 하베스팅 기술은, 압전체에 기계적 변형이 인가되면, 전기 에너지가 발생하는 효과를 이용하여 주위의 버려지는 힘이나 압력, 진동 같은 에너지를 우리가 사용가능한 전기 에너지로 변환하여 주는 것을 말하며, 기존의 Magnetic을 이용한 발전보다 작은 진동을 전기에너지로 변환 하는데 용이할 뿐만 아니라 에너지 변환 효율 또한 높은 장점을 가지고 있다.<sup>1-4)</sup> 그리고 압전을 이용한 에너지 하베스팅은 태양광이 없는 어두운 곳이나 밤에도 발전을 할 수 있는 이점을 가지고 있다. 그래서 항상 진동이 있거나, 압력이나 힘이 작용하는 곳, 그리고 물의 흐름 있거나 바람이 부는 곳에서도 사용될 수 있을 것으로 예측된다.

압전 세라믹소재는 전기 에너지를 가함에 따라서 변형이 일어나고, 강한 힘을 발생하며 변위 발생구조가 간단한 특성 때문에 우주항공, 자동차, 정밀기계 등에 사용되는 액추에이터(actuator)와 같이 주로 기계적 변위를 나타내는 분야에서 많이 사용되어 왔다. 하지만, 이와 반대로 에너지 하베스팅의 경우, 변위를 받아서 전기에너지로 변환시켜야 하기 때문에, 압전세라믹 소재가 가지는 취성이나 단단함(rigid) 등은 곡선 형상 구현에 어려움이 있을 뿐만 아니라 내구성이 취약한 단점을 나타낸다. 이러한 이유 때문에 최근 세라믹 소재에 유연성(flexibility)을 부여하는 연구가 많이 진행되고 있다. 또한 모바일 전자기기의 발달은 저 전력과 이동이 용이한 에너지 하베스팅 소자 개발을 촉진시키는 계기가 되고 있다. 오늘날 유연 전자소자 기술은 유연 소자의 경량성, 유연성, 굽힘성으로 인하여 크게 주목 받고 있다. 폴리머 계열의 기판을 사용하는 유연 소자는 생명 공학, 전자 디스플레이,

전자 페이퍼, 대면적 유기 전자소자, 센서 등과 같은 광범위한 영역에 적용되고 있다. 특히 유연 압전 에너지 하베스팅(flexible piezoelectric energy harvesting) 소자는 소재의 유연성으로 인하여 작은 진동에도 발전이 가능하며, 복잡한 형상이나 다양한 영역에 적용이 가능하여 저용량 에너지원으로서 크게 부각되고 있다.

현재 유연 압전 에너지 하베스팅의 연구 방향은 크게 폴리머 압전 재료를 이용하는 경우, 압전 복합재료(composite)를 이용하는 경우, 나노 구조체를 이용하는 경우, 박막 전자 공정을 이용하는 경우로 나눌 수 있다. 본고에서는 유연 압전 에너지 하베스팅 기술의 개발 이슈 및 최근 연구 동향에 대해서 소개하고 향후 발전 방향에 대하여 전망해 보고자 한다.

## 1. 압전 폴리머를 이용한 유연 압전 에너지 하베스팅

1924년에 폴리머의 압전효과가 발견된 이후 수많은 연구가 1970년대에 미국, 유럽 등에서 이루어 졌다. 이러한 압전 ElectroActive Polymer (EAP)는 낮은 구동 전압에서 큰 변형률을 가지며 저밀도의 특성으로 인하여 인공근육을 실현시킬 수 있는 차세대 액추에이터로서 각광을 받아왔다. 이러한 대표적인 EAP로 잘 알려진 PVDF (polyvinylidene-fluoride)는 Fig. 2에서 보는 것처럼 단량체구조인  $(-CH_2-CF_2-)_n$ 가 반복적으로 구성되는 선상 고분자로서, 분자 내에 존재하는 강한 쌍극자기에 의해서 고분자 재료 중 가장 큰 유전율을 나타내는 물질이고 유

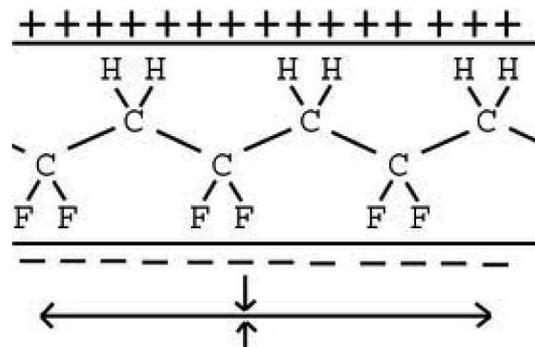


Fig. 2. 압전성을 가지는 PVDF의 구조

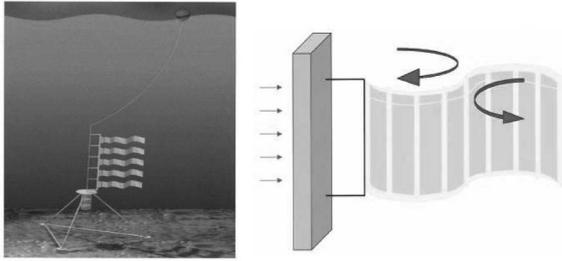


Fig. 3. Energy harvesting Eel<sup>5)</sup>.

기질 폴리머로 이루어져 부식에 강할 뿐만 아니라 열적 안정성, 화학적 저항성 등의 뛰어난 재료적 우수성을 가지고 있다.

기존 압전 에너지 하베스터는 압전소자의 취성 및 단단함 때문에 물리적 활동이 많은 부분이나 물리적 충격에 약한 한계를 보이고 있었다. 그러나 압전 폴리머의 경우 부드럽고 성형이 자유로우며, 대면적 제작이 가능하여 응용 장소의 제약을 받지 않아 여러 분야에 적용이 가능하다. 특히 기존의 압전 세라믹을 이용한 에너지 하베스팅에서는 시도할 수 없었던 새로운 형태의 에너지 하베스팅을 가능하게 되었다. Fig. 3에서와 같이 유연한 넓은 면적의 PVDF를 이용하여 해저나 강물아래에 설치하여, 물결의 흐름으로부터 전기에너지를 생산할 수 있으며, 향후 이를 이용하여 배터리 교환이나 전력공급이 힘든 해저나 대양의 바다 위의 센서나 부표의 무한 동력 전원으로 사용이 가능할 것으로 예상된다.<sup>5)</sup>

최근 버클리 캘리포니아 주립 대학교(University of California, Berkeley)의 Liwei Lin 연구팀은 PVDF를 기반으로 하는 유기 나노섬유(nanofibers)를 제작하여 큰 주목을 받고 있다<sup>6)</sup>. 기존에 ZnO나 BaTiO<sub>3</sub>를 이용한 나노 구조체에 대한 연구가 있었으나 PVDF를 사용함으로써 매우 유연하고 튼튼한 구조체를 만들어 낼 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이 압전 나노섬유들은 의류 형태로 제작이 가능하여 물리적 힘에 의한 변형을 통해 전기 에너지로 변화하여 소형 전자기기 등에 전력을 제공할 수 있다. 또한 신체의 미세한 움직임만으로도 간단한 전자기기를 구동할 수 있으며, 이들 나노섬유들은 PVDF라는 낮은 단가를 가지는 유기물질로부터 제작이 가능하여 경제적인 뿐만 아니라 유연하기 때문에 더욱 가치가 있다. Fig. 4에서 보는 것과 같이 전극과 PVDF 나노섬유가 올려진 가소성 막이 구부러지면 쌍극자의 배열이 이동하여 섬유의 끝에 전위차가 만들어진다. 그 중합체는 절연체로서 전류는 나노섬유 그 자체를 통해 흐르지 않지만, 두 끝이 회로로 연결되면 전기가 흐를 수 있다. Lin의 연구팀이 제작한 PVDF 나노 섬유의 경우 최대 에너지 변환 효율은 평균 12.5%로서, PVDF 박막을 기반으로 하는 에너지 하베스터의 에너지 변환 효율인 0.5~4%와 ZnO 나노선을 기반으로 하는 나노발전기에서의 에너지 변환 효율인 6.8%보다 훨씬 큰 것으로 보고 되고 있다.

또한, 최근 위스콘신 대학교(University of Wisconsin-

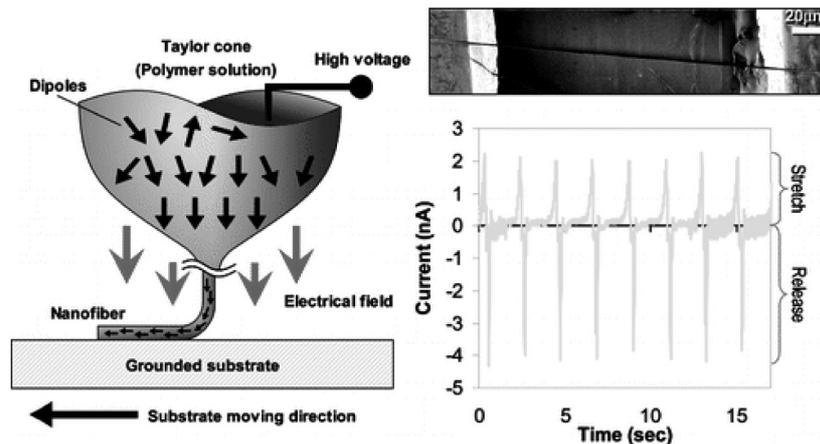


Fig. 4. PVDF nanofiber<sup>6)</sup>.

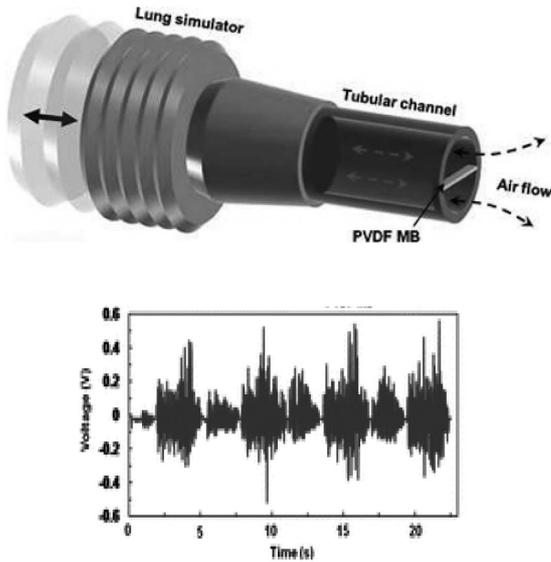


Fig. 5. PVDF micro belt를 이용한 호흡으로 부터의 에너지 발전<sup>7)</sup>.

Madison)의 Xudong Wang 교수팀은 PVDF의 유연성을 최대한 활용하여, 사람의 호흡으로부터 전기에너지를 생산할 수 있는 장치를 개발하였다.<sup>7)</sup> Fig. 5에 나타난 것처럼 튜브관 내에 PVDF 마이크로 벨트(micro belt)를 설치하여, 사람의 호흡과 같이 낮은 공기 흐름에서도 PVDF가 공진 진동(resonance vibration)을 할 수 있게 설계하였다. 이를 이용하면 인체 내장형 센서나 의료기기의 전원 공급 장치로 이용될 수 있을 것으로 예상되어, 배터리 교환을 위한 지속적인 수술이나 인체 외부에서 전원을 공급하기 위한 와이어를 설치할 필요성이 없어질 것으로 예상된다.

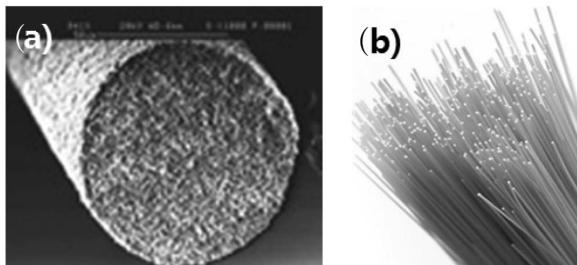


Fig. 6. (a) Smart Materials 사와 (b) Advanced Cerametrics (ACI)사에서 제조한 압전 세라믹 파이버.

### 3. 압전 복합재료(composite) 이용한 유연 압전 에너지 하베스팅

압전 복합재료(composite)는 유연성 있는 폴리머와 우수한 압전 특성을 가지는 세라믹재료를 결합하여, 상호 단점을 보완하여 유연성을 가지면서도 비교적 우수한 특성을 나타내도록 제작된 재료이다. 특히 최근 유연 에너지 하베스팅에 대한 관심이 높아짐에 따라 압전 복합재료에 대한 관심도 또한 높아지고 있다. 압전 복합재료는 세라믹과 폴리머의 혼합된 형태에 따라 0-3 또는 1-3 composite으로 크게 나뉘어 질 수 있다. 0-3 composite은 폴리머 매트릭스에 압전세라믹 분말이 섞여져 있는 형태이며, 1-3 composite은 폴리머 매트릭스에 압전 파이버가 결합되어 있는 형태를 말한다. 0-3 composite은 비교적 유연성이 뛰어나지만, 벌크 세라믹에 비해 크게 낮은 압전 특성 가진다. 이 때문에 에너지 하베스팅에서는 파이버의 면적 대비 긴 길이로 인하여 다른 압전 세라믹에 비해 에너지 발전에 효과적인 1-3 composite을 주로 이용한다.

압전 파이버 복합재료는 대한 국내의 연구는 기술의 중요성에 비해 연구 개발 그룹이 미미하거나, 기술 수준이 매우 낮은 편이다. 반면, 국외에서는 미국을 중심으로 압전 특성이 뛰어난 PZT 세라믹파이버를 기반으로 기술

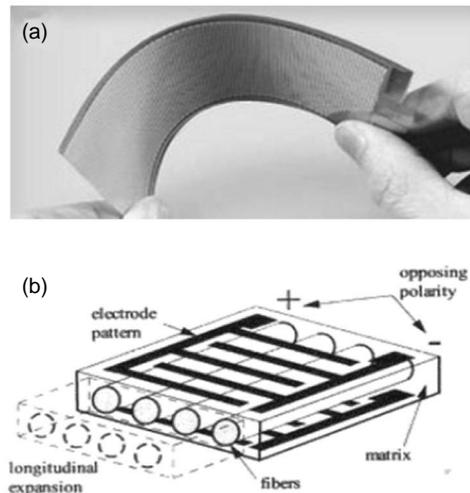


Fig. 7. (a) Active Fiber Composite (AFC)와 (b) 구조도.

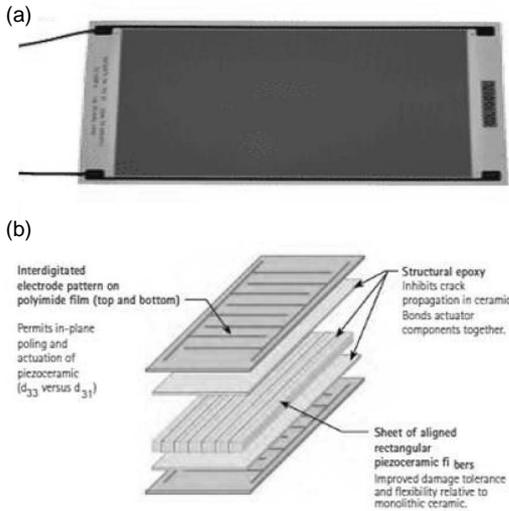


Fig. 8. (a) Macro fiber Composite (MFC)와 (b) 구조도

개발이 활발히 이루어지고 있는데 대표적으로 Smart Materials 사와 Advanced Cerametrics (ACI) 사를 들 수 있다.<sup>8,9)</sup>

이러한 압전 세라믹 파이버를 적용하여 다양한 유연 압전 복합소재들이 연구되고 있는데, 대표적으로 Active Fiber Composite (AFC)와 Macro Fiber Composite (MFC)를 들 수 있다.

미국 MIT 대학의 Hagood 교수 팀이 개발한 Active Fiber Composite (AFC)는 에폭시 물질에 압전 세라믹 파이버를 삽입하는 Piezoceramic Fiber Composite (PFC)

기술에 IDT 전극 기술이 결합한 형태로서, 압전 세라믹 파이버와 폴리머를 경화시켜 만들 수 있다.<sup>8)</sup> Fig. 7에서 보는 바와 같이 폴리머 매트릭스와 압전 세라믹 파이버로 이루어진 낱장의 AFC 표면에 IDT 전극을 파이버와 수직하게 배열하면 파이버의 축 방향으로 전기장이 발생하여 기존의 압전 작동기보다 더 큰 출력을 얻게 된다. 이러한 AFC 복합 소재는 기존의 재료들보다 강도가 우수하고, 곡률 형상의 구조물에 부착이 용이하며, 출력 특성이 우수하고 이방성 구동이 가능하다.

다른 유연 압전 복합소재인 Macro fiber Composite (MFC)는 NASA Langley 연구소에서 개발하고, Smart Materials 사에서 상용화 하였다.<sup>9)</sup> MFC는 폴리머 매트릭스에 단방향 압전 세라믹 Fiber (PZT-5A)를 가공하여 삽입한 것으로 에칭된 IDT pattern을 갖는 Copper-clad Kapton 필름을 샌드위치 형태로 부착한 구조를 갖는 평판형 액추에이터다 (Fig. 8). MFC는 압전 세라믹 파이버를 기초로 하여 유연하고, 곡면 형상의 구조물에 응용이 용이한 장점이 있으며, 압전 상수를 사용하여 큰 작동 효율을 낼 수 있고, 작동기의 적용 방향에 따라 작동 변형률이 달라지는 방향성을 가지고 있다. MFC에서 발생하는 전하량은 변위 주파수에 비례하게 되고, 낮은 변위와 높은 주파수 (>20 Hz)가 연속적인 전하 생성에 적합하다.

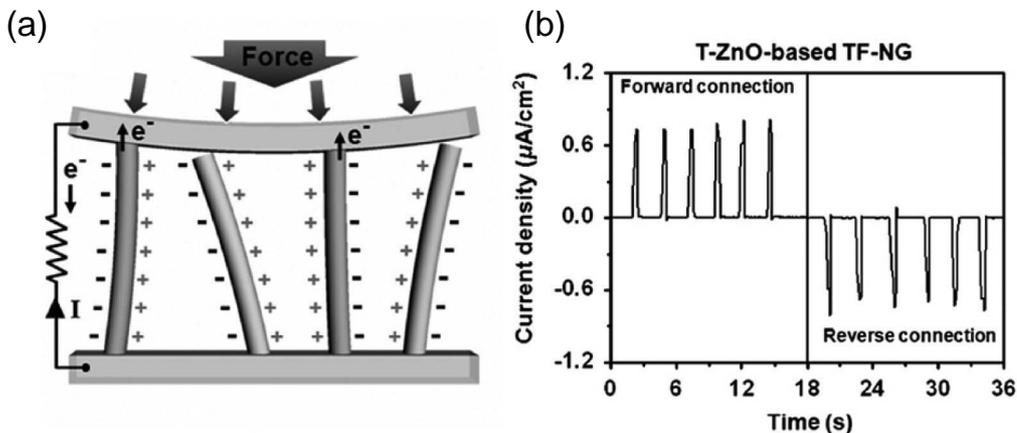


Fig. 9. ZnO 나노선의 Schottky contact에 의한 DC 전하 발생 메커니즘<sup>10)</sup>.

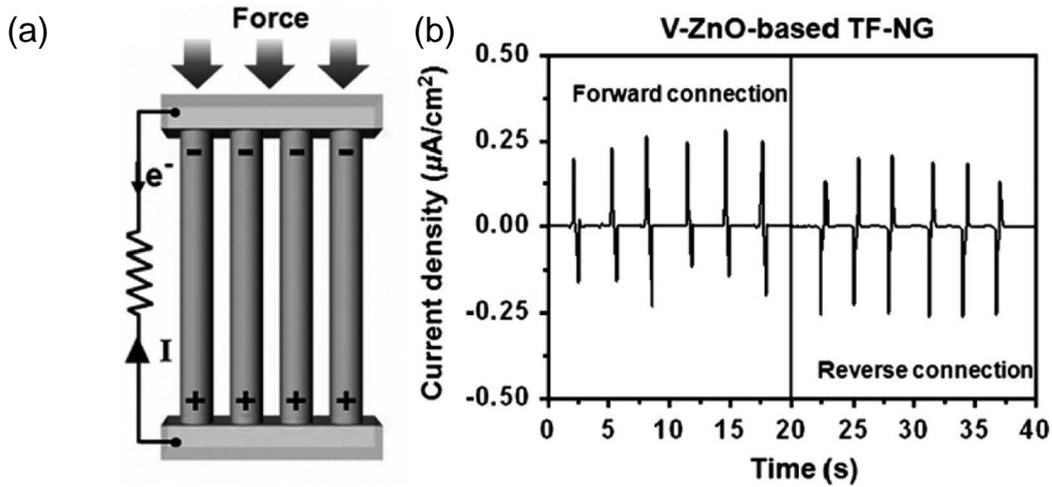


Fig. 10. ZnO 나노선의 압전 효과에 의한 AC 전하 발생 메커니즘<sup>10)</sup>.

#### 4. 나노선(nano wire)을 이용한 유연 압전 에너지 하베스팅

최근 나노기술의 발달로 인하여 다양한 나노 구조체의 개발 및 응용이 활발히 연구되고 있다. 압전 연구 분야에서도 나노선을 이용한 연구가 각광을 받고 있는데, 나노선 구조의 에너지 하베스팅 소자는 압전 효율이 높고 아주 미세한 압력과 진동에도 반응하기 때문에 응용가능성

이 매우 높은 장점이 있기 때문이다. 대표적으로 산화아연(ZnO)은 압전성과 반도체성을 동시에 가지면서도 1차원의 나노선 구조의 성장제어가 용이하기 때문에 이를 이용한 나노 구조체를 이용한 유연 압전 에너지 하베스팅에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.

나노선 기반 에너지 하베스팅 소자의 전기에너지 발생 메커니즘은 Figs. 9, 10와 같이 반도체성과 압전성에 의한 두가지의 메커니즘으로 나눌 수 있다. 첫번째로 전극과 나노선간의 Schottky 접합을 이루고 있는 상태에서 나노선이 휘어질 때 나노선 내부에서 발생하는 전위 에너지(Potential energy)의 분포가 변화되어 전극과 나노선간의 위치에 따라 바이어스(Bias)의 방향이 바뀌게 되어 전하가 발생된다. 그리고 이때 발생된 전하는 Fig. 9 (b)와 같이 DC 형태를 나타낸다.

두 번째 전기에너지 발생 메커니즘은 Fig. 10에 나타난 바와 같이 나노선에 길이 방향으로 힘이 가해질 경우, Polarization 변화에 따른 나노선 양단의 전위차 발생해 전류가 생성되게 된다. 이때 생성된 전류는 AC 형태를 나타내며, 일반적인 압전 현상과 동일하다.

전 세계적으로 ZnO 나노선을 기반으로 하는 유연 압전 에너지 하베스팅 연구가 활발히 이루어지고 있는데, 미국에서는 Gerogia Tech., UC Berkerly 등 유명대학을 중심으로 ZnO 나노선 기반 나노선 하베스팅 소자에 관

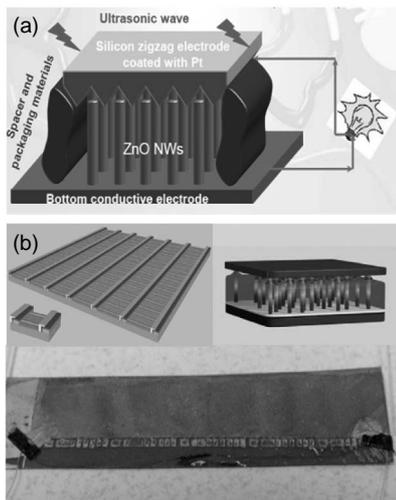


Fig. 11. (a) 진동을 이용한 ZnO 나노선 발전 소자 (b) ZnO 나노선 에레이를 이용한 대면적의 집적화 발전소자.

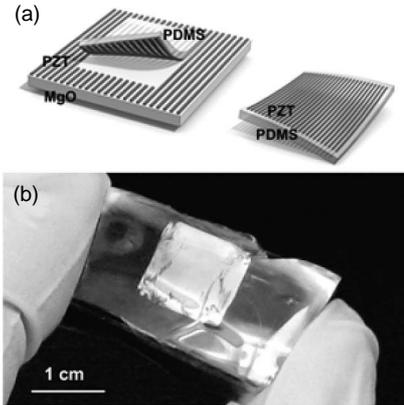


Fig. 12. PZT 리본을 이용한 유연 압전 발전 소자.

한 연구가 이루어지고 있으며, 국내에서는 한국세라믹기술원, KIST, 성균관대학교 등 소수의 그룹에서 주로 진행이 되고 있다. 미국 조지아 공대의 Zhong Lin Wang 교수는 ZnO 나노선 하베스팅 소자를 제작하여 전극 소재와 Zigzag 구조의 전극개발을 통해 Schottky 접합 특성의 개선함으로써 출력특성을 향상시켰으며, 나노선 어레이의 집적화 연구를 통해 출력 효율의 개선을 위한 연구가 수행하였다<sup>11)</sup>. 최근에는 UV 센서, pH센서의 나노선 하베스팅 소자 실용화를 위한 데모 연구가 성공을 거듭으로써 나노선 기반 하베스팅 소자의 상용화가 한층 가까워지게 되었으며, ZnO 나노선 어레이를 집적화하여

제작한 수직형(좌), 수평형(우) 하베스팅 소자가 연구되고 있다<sup>12)</sup>. 또한, 나노선 어레이가 외부 충격에 손상되기 쉬워 불안정한 문제점도 코팅기술을 이용하여 고분자를 나노선 어레이와 전극내부에 충전시킴으로써 구조적인 안정성도 확보하였다<sup>13)</sup>.

나노선 기반의 압전 에너지 발전에 관한 최근의 연구는 대부분 ZnO 나노선을 이용하고 있지만, ZnO의 낮은 압전 특성(압전전하상수  $d \sim 12$  pC/N)으로 인하여 고효율을 내는 압전 나노선 에너지 하베스팅을 개발하기 위해서는 보다 높은 압전 특성을 가지는 새로운 물질의 나노선 구조의 개발이 요구되고 있다. 수년 전부터 미국에서는 BaTiO<sub>3</sub> 소재를 이용한 나노선 에너지 하베스팅 연구가 시작되어 Bi, (Na,K)TiO<sub>3</sub>, PVDF 압전소재를 비롯한 다양한 압전 나노선 기반 소재개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 미국의 일리노이 대학의 Ming-Feng Yu 그룹은 BaTiO<sub>3</sub> 나노와이어를 기반으로 하는 압전 나노발전기를 제작하여 출력특성을 확인하였다.<sup>14)</sup> 국내 삼성전자와 성균관대학교의 공동연구팀은 ZnO 나노선을 기반으로 하는 투명 유연 나노전력발전소자로 Graphene 박막이 상하의 전극을 이루는 압전 발전 소자를 보고하였다.<sup>15)</sup> 이러한 투명 유연 나노전력발전소자는 자체충전이 가능한 터치스크린 디스플레이어나 작은 바람에 의해서도 충전이 되는 나노소자와 같이 새로운 형식의 에너지 하베스팅 기술 등에 폭넓게 응용될 수 있다.

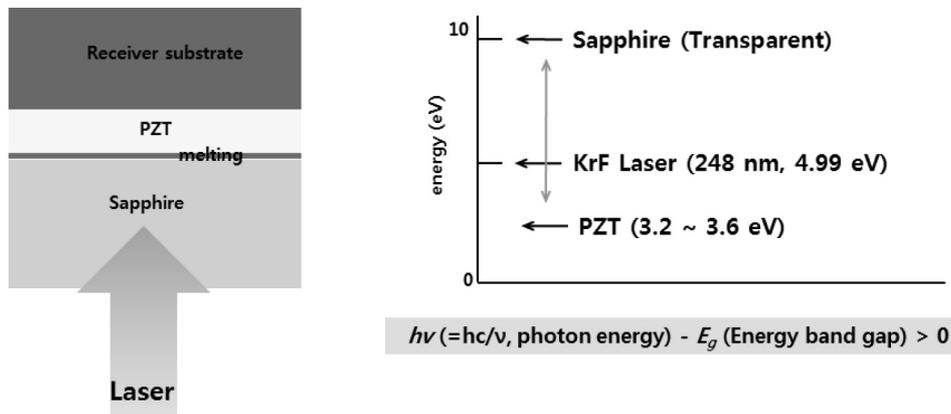


Fig. 13. Laser lift-off 방법의 원리.

### 5. 전사(transfer) 기술을 이용한 유연 압전 에너지 발전

일반적인 압전 세라믹 물질들은 고온에서 생성되는 한계를 가지고 있어 유연 기판상에 바로 성장할 수 없는 한계를 가지고 있다. (유연 기판들의 공정 한계 온도는 대략 300 °C 정도이다.) 이를 극복하기 위하여 다른 기판상에 압전 세라믹 물질을 고온 성장하고 유연 기판상에 전사하는 기술이 최근 활발히 연구되고 있다. 이러한 전사 기술은 우수한 특성의 압전 세라믹 물질을 활용할 수 있을 뿐만 아니라 다양한 기판상에 적용이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

압전 특성 효율이 좋은 압전 재료로 알려진 것이 PZT이지만, 이것의 결정 구조는 고온에서 성장해야 하므로 일반적으로 유연한 기판은 녹아 버린다. 프린스턴 대학의 Mc Alpine 연구팀은 고온에서 PZT를 성장시킨 후 실리콘 위에 얇은 리본을 전달하는 공정을 개발하여 PZT 리본을 기반으로 하는 유연 압전 재료를 개발하였다.<sup>16)</sup> 리본 전사 공정은 MgO 기판상에 제작된 PZT 리본을 제거하도록 PZT를 화학 처리한 다음 PDMS 스탬프를 사용하여 리본을 분리하는 방법으로 PZT 리본을 활용한 에너지 변환 효율이 매우 우수하다는 장점을 가지고 있다. 이러한 유연 압전재료는 신발 밑창에 삽입하여 휴대용 전자기기에 전력을 공급하기도 하며, 또한 심장질환자의 심박조율장치를 충전하는 장치로도 활용될 수 있다.

또한, 한국과학기술연구원(KIST)에서는 레이저 lift-off 및 전사법을 이용하여, 유연압전 소자를 개발하였다. Fig. 13에서 보는 바와 같이, 사파이어 기판위에 PZT를 성장시킨 후 KrF 레이저를 사파이어 기판 뒤쪽에 조사하게 되면, 사파이어 기판의 밴드갭 에너지(~10 eV)가 KrF 레이저의 광에너지(4.99 eV)보다 크기 때문에 레이저가 사파이어 기판을 통과하여, PZT와 사파이어 기판 사이에 계면에 쪼여지게 된다. 이로 인해 밴드갭 에너지가 사파이어 기판보다 작은 PZT 표면이 녹으면서 PZT층이 사파이어 기판으로부터 떨어지게 된다. 이러한 원리를 이용하여 PZT 박막을 PDMS 스탬프를 이용하여, 폴리이

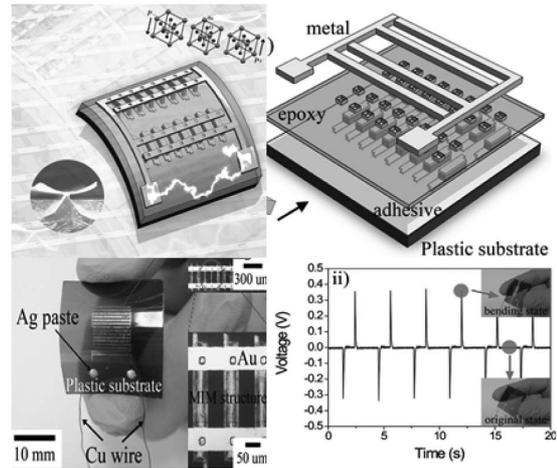


Fig. 14. BaTiO<sub>3</sub> 를 이용한 유연 압전 발전 소자.

미드 기판이나 다른 유연기판으로 전사하여 유연성을 가지는 압전 재료를 개발하였다. 레이저 lift-off 방법의 경우 사파이어 기판으로 사용하기 때문에 양질의 PZT막을 형성할 수 있으며, 위의 예칭방법에 비해 간단하고 시간이 짧게 걸린다는 장점을 가진다.

최근 환경오염 및 건강에 대한 관심이 높아짐에 따라, Pb를 50% 정도 함량하고 있는 PZT는 인체에 부착하거나 이식하기에는 부적합하다고 할 수 있다. 따라서 실제 인체 적용을 위해서는 비납계 물질의 연구가 필요한데 카이스트 이진재 교수팀은 ZnO보다 압전특성이 10~30 배 우수한 BaTiO<sub>3</sub>를 이용하여 심장 박동, 혈액 흐름과 같은 미세한 움직임으로도 전기를 만들 수 있는 새로운 형태의 유연한 나노발전기술을 개발하였다.<sup>17)</sup> 연구팀에서 개발한 나노발전기술은 이 교수가 2004년 세계 최초로 공동발명한 '고성능 단결정 휘어지는 전자소자'를 토대로, 세라믹 나노박막물질을 유연한 플라스틱 기판 위에 옮기는 기술로서, 휴대용 전자제품 뿐만 아니라 몸속에 집어넣는 센서나 로봇의 에너지원으로도 사용이 가능하기 때문에, 그 활용영역은 응용기술 여하에 따라 얼마든지 넓어질 수 있을 것으로 보고 있다.

### 6. 결론

유연 압전 에너지 하베스팅은 도로, 철로, 활주로 등



각종 교통수단을 통해 발생하는 미활용 에너지의 매크로 하베스팅에서부터 음파, 심장박동, 혈압 등 각종 인체활동의 미세한 진동을 이용한 에너지 나노 하베스팅에 이르기까지 다양하게 활용될 것으로 기대될 뿐만 아니라 그 응용가능성은 새로운 에너지 시장의 형성과 화석연료 사용절감 효과를 통한 경제적 이점뿐만 아니라 환경보호 관점에서도 반사이익이 클 것으로 예상되며, 의료용 바이오 소자에 대한 응용 확대를 통한 신산업 창출 등으로 무한히 실현될 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 많은 응용 가능성을 실현화하기 위해서는 고효율 유연 압전 소재기술, 고효율 압전 하베스터 구조 설계 및 회로설계기술 등 NT-IT-BT 각 분야의 기술 융·복합기술이 필요하며 이를 통해 유연 압전 에너지 하베스팅 기술의 가치는 더욱 커지리라 예상된다.

### 참고문헌

1. Shad. Roundy "Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion", Ph.D. Dissertation, U. C. Berkeley (2003).
2. J. A. Paradiso and T. Starner, "Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics", *IEEE Pervasive Computing*, **4** 18 (2005).
3. G. K. Ottman, H. F. Hoffman, A. C. Bhatt and G. A. Lesieutre, "Adaptive Piezoelectric Energy Harvesting Circuit for Wireless Remote Power Supply", *IEEE Trans. Power Electron*, **18** 696 (2003).
4. M. Philipose, J. R. Smith, B. Jiang, A. Mamishev, S. Roy, and K. Sundara-Rajan, "Battery-Free Wireless Identification and Sensing", *IEEE Pervasive Computing*, **4** 37 (2005).
5. George W. Taylor, Joseph R. Burns, Sean M. Kammann, William B. Powers, and Thomas R. Welsh, "The Energy Harvesting Eel: A Small Subsurface Ocean/River Power Generator", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **26** [4] 539 (2001).
6. C. Chang, Van H. Tran, J. Wang, Y. K. Fuh, and L. Lin, "Direct-Write Piezoelectric Polymeric Nanogenerator with High Energy Conversion Efficiency", *Nano Lett.*, **10** 726 (2010).
7. C. Sun, J. Shi, D. J. Bayerl, and X. Wang, "PVDF Microbelts for Harvesting Energy from Respiration", *Energy & Environmental Science*, **4** 4 508 (2011).
8. <http://www.smart-material.com>.
9. <http://www.advancedcerametrics.com/>.
10. B. Kumar and S.-W. Kim, "Energy Harvesting based on Semiconducting Piezoelectric ZnO Nanostructures", *Nano Energy* (2012), doi:10.1016 / j.nanoen. 2012.02.001
11. X. Wang, J. Song, J. Liu, and Z. L. Wang, "Direct-Current Nanogenerator Driven by Ultrasonic Wave", *Science*, **316** 102 (2007).
12. R. Yang, Y. Qin, C. Li, G. Zhu, and Z. L. Wang, "Converting Biomechanical Energy into Electricity by a Muscle-Movement-Driven Nanogenerator", *Nano Lett.*, **9** 201 (2009).
13. S. Xu, Y. Qin, C. Xu, Y. Wei, R. Yang and Z. L. Wang "Self-powered Nanowire Device", *Nature Nanotech.*, **5** 3553 (2010).
14. Z. Wang, J. Hu, A. P. Suryavanshi, K. Yum and M. F. Yu, "Voltage Generation from Individual BaTiO<sub>3</sub> Nanowires under Periodic Tensile Mechanical Load", *Nano Lett.*, **7** 2966 (2007).
15. D. H. Choi, M. Y. Choi, W. M. Choi, H. J. Shin, H. K. Park, J. S. Seo, J. B. Park, S. M. Yoon, S. J. Chae, Y. H. Lee, S. W. Kim, J. Y. Choi, S. Y. Lee, and J. M. Kim, "Fully Rollable Transparent Nanogenerators Based on Graphene Electrode", *Adv. Mater.*, **2** 2187 (2010).
16. Y. Qi, N. T. Jafferis, K. Lyons, Jr., Christine M. Lee, H. Ahmad, and M. C. McAlpine, "Piezoelectric Ribbons Printed onto Rubber for Flexible Energy Conversion", *Nano Lett.*, **10** 524 (2010).
17. K.-I. Park, S. Xu, Y. Liu, G.-T. Hwang, S.-J. L. Kang, Z. L. Wang, and K. J. Lee, "Piezoelectric BaTiO<sub>3</sub> Thin Film Nanogenerator on Plastic Substrates", *Nano Lett.*, **10** 4939 (2010).

●● 송현철



- 2004년 고려대학교 재료금속공학과
- 2006년 고려대학교 재료금속공학과 석사
- 2006년~현재 한국과학기술연구원 전자재료 센터 연구원

●● 도영호



- 2002년 한양대학교 물리학과
- 2004년 한양대학교 물리학과 석사
- 2009년 한양대학교 물리학과 박사
- 2010~현재 한국과학기술연구원 박막재료연구센터 박사후 연구원

●● 강종윤



- 1993년 연세대학교 전기공학과 학사
- 1995년 연세대학교 전기공학과 석사
- 2000년 연세대학교 전기컴퓨터공학과 박사
- 2002년~2004년 The University of Birmingham, Post-doc.
- 2000년~현재 KIST 전자재료연구센터 책임연구원

●● 윤석진



- 1992년 연세대학교 전기공학과 박사
- 1995년 Pennsylvania State University 박사 후 연구원
- 1988년~현재 한국과학기술연구원 책임 연구원
- 2003년~현재 한국과학기술연구원 박막재료 연구센터 센터장
- 2008년 한국과학기술연구원 영년직 연구원