

2 압전에너지 하베스팅용 나노소재 연구 동향

글_이수연 선임연구원 | 한국화학연구원 화학소재연구본부

1. 서론

에너지 하베스팅(energy harvesting) 기술은 태양광, 진동, 열, 풍력 등과 같이 자연적으로 발생하는 에너지를 전기에너지로 전환시켜 수확하여 축적한 후 효율적으로 사용하는 기술을 일컫는다. 에너지 원료의 고갈과 환경 오염 문제로 인하여, 전 세계적으로 지속 가능한 친환경 에너지의 확보가 중요한 이슈로 떠오르고 있으며, 미래 산업 발전에 큰 영향을 끼칠 것으로 보고 있다 [1].

한편, 전자기술의 발전으로 기존 대형 전자 기기가 소형화되고 있으며 이러한 소형 전자 기기를 구동하는 에너지도 감소함에 따라 작은 규모의 소형발전에 대한 관심이 증가하고 있다. 과거의 연구는 에너지 하베스팅 소자의 크기를 키워 효율을 높이고 많은 양의 에너지를 만들어내는데 주력했다. 하지만 벌크형 에너지 하베스팅 소자는 큰 크기로 인해 응용분

야가 철도, 교량, 도로 등에만 제한되며, 민감도가 낮아 작은 움직임을 이용한 에너지 하베스팅은 불가능하다. 또한 전기 소자를 구동시키는데 필요한 전압은 아주 큰 수준이 아니기 때문에 무조건적으로 크기를 키워 출력 값을 증가시킬 필요도 없다.

자연으로부터 에너지를 얻을 수 있는 방식에는 태양광을 이용한 태양발전, 기계적인 에너지를 이용한 압전발전, 정전기를 이용한 마찰발전, 열에너지를 이용한 열전발전 등이 있다. 각각의 방법은 장단점을 가지고 있으며 주어진 자연환경에 적합한 방법이 선택되어 적용될 수 있다.

에너지 하베스팅 기술 중에서도 가장 먼저 개발된 것이 태양광에너지를 이용한 태양전지이다. 태양전지는 연구기간이 길고 많은 투자가 있었기 때문에 기술 성숙도가 매우 높고 현재 상용화 단계에 이르렀지만, 이를 제외한 나머지 에너지 하베스팅 기술은 아직까지 많은

연구가 필요한 실정이다. 하지만 태양의 빛 에너지를 이용한 태양전지는 날씨나 시간, 공간에 따라 전기 에너지 발전에 제약을 받는다는 단점이 있다. 반면에 압전 에너지 하베스팅은 주변에 흔하게 존재하는 버려지는 에너지를 원료 기반으로 전기 에너지 생성이 가능하고, 날씨, 시간, 공간에 따른 제약이 없으며 인간 친화적이라는 측면에서 주목을 받고 있다 [2].

압전에너지 하베스팅은 생활 주변의 환경에서 발생하는 미세한 진동과 압력, 충격과 같은 기계적인 에너지를 전기에너지로 변환하는 기술과 이렇게 수확한 에너지를 저장하고 효율적으로 활용하는 일련의 과정을 말한다. 본 기고에서는 압전재료 및 압전 에너지 하베스팅의 기본원리, 최근 압전에너지 하베스팅 개발 현황과 향후 전망을 설명한다.

2. 압전에너지 하베스팅의 기본원리

압전(Piezoelectricity)현상이란 진동, 충격 등의 기계 에너지를 전기 에너지로 변환하는 것으로 라이터의 점화기, 가스레인지의 점화기, 압전 MEMS 센서 등에 적용되어 왔다. 그러나 점화기, 센서는 순간적으로 발생한 전기에너지를 활용하는 것으로 순간적으로 발생한 미세한 전기에너지를 축적하여 언제든지 쓸 수 있도록 만든 에너지 하베스팅과 다르다. 실제 압전 하베스팅 기기는 기본적으로 외부의 기

계적 에너지를 압전재료에 전달, 전달된 기계적 에너지를 압전재료를 이용하여 전기에너지로 변환, 변환된 에너지를 전기적인 회로를 통하여 슈퍼 캐퍼시터(super capacitor)나 2차전지(battery)에 축전하는 크게 3가지 부분으로 나눌 수 있다.

에너지 변환효율을 높이기 위해서는 즉, 기계적인 에너지를 효과적으로 전기적 에너지로 변환, 저장하기 위한 방법으로 외부의 진동을 효과적으로 압전체에 전달할 수 있도록 기계적인 임피던스 매칭(impedance matching)이 이루어야 하고, 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 재료의 전기-기계 결합계수가 커야 하며, 생성되는 에너지를 외부회로에 전달하기 위해 전기적인 임피던스 매칭이 되어야 한다.

압전재료는 기계적 응력에 따라 분극을 일으켜 전하를 발생시키는 재료를 말하는 것으로, 기계적인 응력하에 전하를 발생시키는 정압전 효과(direct piezoelectric effect)와 전기장을 가하면 변형이 발생하는 역압전효과(converse piezoelectric effect)를 갖는다. 압전재료는 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하거나, 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 소재로 이러한 현상은 1880년 Curie 에 의해 발견된 후, 수정, 로셀염, BaTiO₃, lead zirconate titanate (PZT), polyvinylidene fluoride (PVDF) 등의 압전재료가 발견되었다. 압전재료는 소위 강유전체(ferroelectrics)에 속하며 분자구조의 분극이 일정방향으로 배열되어 있는 강유전체로서 전기 쌍극자(electric dipole)특성

을 포함하는 재료를 말한다. 일반적으로 전기적 다이폴은 일정한 방향이 없이 흩어져 있으나 큐리(curie)온도 이상으로 열을 가하고 강한 전기장을 가해주면 전기장을 따라 재배열되게 되는데, 이 과정을 분극(poling)이라 한다. 이 분극과정을 거치고 나면 재료는 압전성을 띄게 된다. 재료가 분극이 되고 나면 전기장을 가했을 때 재료에 수축 또는 팽창의 변형이 발생한다. 이때 전기장은 분극방향에 대해 임의로 가할 수 있는데 인가되는 전기장의 방향에 따라 다른 응력과 변형을 발생시킨다. 따라서, 압전상수는 방향성을 갖게 된다. 예를 들어, d_{33} 는 재료의 방향성 중 하나의 방향(여기서는 3 방향)으로 전기장을 가했을 때 그 방향(즉 3 방향)으로 변형이 발생하는 압전전하상수(piezoelectric charge constant)이고, d_{31} 은 3 방향으로 전기장을 가했을 때 다른 방향(여기서는 1 방향)으로 변형이 발생하는 압전전하상수이다. 압전상수 중 전기기계결합계수(electromechanical coupling coefficient), k 는 기계-전기에너지의 변환 또는 전기-기계에너지의 변환을 나타내고 식 (1)과 같이 표현된다.

$$k = \sqrt{\frac{\text{Electrical energy stored}}{\text{Mechanical energy applied}}} \quad (1)$$

$$= \sqrt{\frac{\text{Mechanical energy stored}}{\text{Electrical energy applied}}}$$

즉, 정압전효과에서는 기계적 에너지가 가해졌을 때 나오는 전기적 에너지의 크기를, 역압전 효과에서는 전기적 에너지가 가해졌을 때 나오는 기계적 에너지를 나타낸다. 표 1은 대

표 1 ▶ 대표적인 압전재료의 압전상수.

압전재료	d (pC/N)	k
Quartz	5	0.1
PVDF	23	0.1
BaTiO ₃	242	0.15~0.2
PZT	496	0.5~0.7

표적인 압전재료의 전기-기계결합계수를 나타낸다. 예를 들어, 대표적인 압전세라믹인 PZT의 k 가 0.7일 때 기계적인 에너지의 49%가 전기적인 에너지로 변환될 수 있다. 이는 열전, 태양광보다 아주 높은 에너지 변환효율로 변환할 수 있는 장점이 있다.

대표적으로 많이 사용되는 세라믹 압전재료로는 PZT가 있으며 폴리머 압전재료는 PVDF가 있다. 세라믹 압전재료인 PZT의 기계-전기결합계수는 $k = 0.7$ 로 PVDF의 $k = 0.1$ 보다 큰 장점이 있으나 폴리머에 비해 단단하여 적은 진동으로 에너지가 발생될 수 없으며, 잘 깨져서 큰 변형에는 사용할 수 없는 단점이 있다. 반면, 폴리머는 유연하여 큰 변위에 사용될 수 있으나 전지-기계결합계수가 작다는 단점이 있다.

강유전특성을 가지는 재료는 일반적으로 압전특성이 우수하며 전기장의 크기에 대한 이력곡선을 보인다. 강유전재료를 폴링하면 일정방향으로 자발분극을 가지게 되며 분극이 배열된 재료에 힘(F)을 가하면 재료의 분극변화는(ΔP) 식 (2)와 같이 발생하며 재료를 의

부저항과 연결하면 식 (3)과 같이 전류가 발생한다.

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (2)$$

D는 전기 변위(electrical displacement)로 강유전재료에서 분극과 거의 같은 값을 가지며 d는 압전상수, T는 가해주는 응력 (F/A), ϵ^T 는 일정 응력조건에서 유전율을 나타낸다. E는 재료에 가해주는 전기장의 크기를 나타내며 대체로 압전에너지 하베스터에 전기장을 가해주지 않으므로 0값을 가진다.

$$I = \frac{A \Delta P}{dt} \quad (3)$$

여기에서 I는 생성되는 전류의 크기를 나타내며 압전재료의 면적과 분극변화에 비례하며 시간 변화에 반비례한다. 위 식에서 시간의 변화는 진동원의 주파수에 의해 결정되므로 빠른 진동환경에서 많은 전류를 생산한다. 또한 재료의 분극변화는 식 (2)에서와 같이 재료의 고유특성인 압전상수에 비례하므로 압전상수가 큰 재료를 개발하거나 재료의 면적을 크게 하여 생성되는 전류량을 크게 할 수 있다. 일반적으로 압전에너지 하베스터에 의해 생성된 전류는 그 양이 매우 적어 슈퍼 캐퍼시터 또는 2차전지에 충전한 후 센서노드를 구동하는데 이용된다. 그런데 만약 발생전압이 슈퍼 캐퍼시터나 2차전지의 전압보다 높다면 충전시간은 전류량의 크기가 클수록 짧아지므로 발생하는 전류량을 증가시켜야 한다. 따라서 충전

시간을 줄이기 위해서 분극변화가 큰 재료 개발과 생성되는 전류량을 증가시킬 수 있는 연구가 필요하다.

생산되는 전류값을 증가시키는 위하여 전극 구조를 변경하거나 압전체의 방식을(d_{31} 또는 d_{33}) 변화로 만드는 연구도 수행되었다. 전류량을 증가시키기 위한 또 다른 방법으로 다층구조의 세라믹을 활용할 수 있다. 다층구조로 제작할 경우 압전체의 두께가 얇아져 발생하는 전압은 낮아지나 생성되는 전류량은 압전체에 사용되는 전극의 면적, 즉 압전체 층수에 의해서 증가한다. 전류를 증가시키는 다른 방법은 주어진 응력에서 분극변화를 크게 할 수 있어야 한다. 이론적으로 외부 응력에 따른 분극변화의 크기는 압전 상수와 비례하는 것으로 압전 재료의 종류에 따라 다르며, 일반 PZT계 압전 재료의 경우 부드러운 재료가 단단한 재료보다 크다. 그러나 부드러운 PZT 세라믹의 특성은 수많은 영역(domain)이 통계적으로 배열되면서 나타나는 것이므로 최대의 특성을 얻기 위해서는 분극을 한 방향으로 배열하는 단결정이 보다 유리하다.

3. 압전에너지 하베스팅의 국내외 연구 동향

압전에너지 하베스팅은 큰 규모의 발전장치부터 소형 나노기계까지 다양한 분야에서 응용 연구가 활발히 진행되고 있다. 유럽에서

는 VIBES (vibration energy scavenging)이라는 컨소시엄을 구성하여 영국, 독일, 프랑스, 이탈리아 등에서 활발하게 연구하고 있다. 독일의 EnOcean사는 압전에너지 하베스터와 센서를 일체화한 센서노드를 판매하였다. 이탈리아 Tyndall National Institute에서는 PVDF를 신발에 적용한 연구를 수행하였다. 프랑스 리옹 INSA에서는 에너지 하베스팅 회로연구를 활발히 진행하였다. 벨기에 Interuniversity Micro-electronics Center에서는 MEMS기술과 압전소자를 이용해 기계적 진동으로부터 40 μ W의 전력을 얻을 수 있는 부품을 개발하였다. 일본에서는 기업을 중심으로 아이디어 상품을 많이 제조하여 판매하고 있으며 대학을 중심으로 다양한 종류의 연구를 수행하고 있다.

압전에너지 하베스팅을 기기가 소비하는 에너지 스케일에 따라 분류하자면 매크로(macro-scale)와 마이크로(micro-scale)로 나눌 수 있다. 보통 사람이나 자동차 등 기계적 동작을 이용한 발전부터 충전을 통해 보조전력 또는 대용량발전까지를 매크로(macro)로 분류하고, MEMS기반 압전발전으로 소량의 진동이나 충격으로 발전하여 센서, 소형전자기기 전원 및 보조전원으로 사용되는 기술을 마이크로(micro)로 구분하고 있다.

나노구조소재의 압전 특성을 기반으로 하는 나노발전소자(nanogenerator)에 대한 연구는 2001년 미국의 조지아 공대 Zhong Lin Wang 교수 그룹에서 1차원 ZnO 나노벨트에 대한 논문이 발표되면서 시작되었다고 볼 수 있다. 현재까지 나노발전소자 개발과 관련하여 Z. L.

Wang 교수 그룹이 선도적인 연구 결과들을 발표하고 있으며, 개념이 제시된 이래 많은 대학과 연구소에서 연구가 이루어졌으며, 괄목할 만한 연구 결과들이 보고되고 있다. 2006년에는 산화아연 나노선(zinc-oxide nanowires)을 이용하여 진동을 전기로 전환시키는 나노발전소자를 최초로 개발하고 [3], 2007년에는 초음파 진동(ultrasonic vibrations)으로 직접 전기를 생산하는 산화아연 나노선 어레이까지 개발하였다 [4]. 이후 2008년에는 좀 더 실용적인 입는 컴퓨터에 적용하여, 옷에 공급하는 에너지의 순화/배기를 위한 마이크로섬유-나노선의 복합구조를 개발해 나노선 기반의 마이크로 전기 섬유를 보고하였다 [5].

나노발전소자는 일반적으로 기저전극, 기관에 수직하게 성장된 나노선, 상부전극(counter electrode)의 3층으로 구성된 3차원 배열 구조이다. 나노선은 CVD, PVD, wet-chemical법 등의 여러 가지 제조 기술을 사용하여 기저전극 상에 성장할 수 있다. Wang 교수팀이 수직 성장된 단일 ZnO 나노선의 변형을 일으키기 위해 AFM 팁을 사용하여 그림 1과 같이 압전특성을 측정하였다 [3]. 국내에서도 그림 2와 같이 삼성종합기술원과 성균관대학교의 공동 그룹은 습식 화학 합성법으로 저온(90°C)에서 유연 기관(PES) 상에 수직으로 잘 정렬된 ZnO 나노기둥을 직접 성장하여, 대면적 투명 플렉시블 나노 발전 소자를 구현하였다 [6].

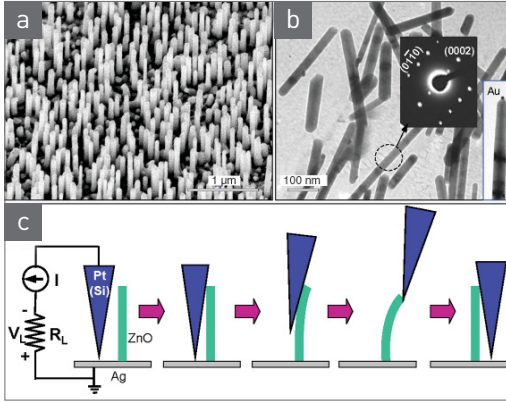


그림 1 ▶ ZnO 나노선 기반의 나노발전소자.

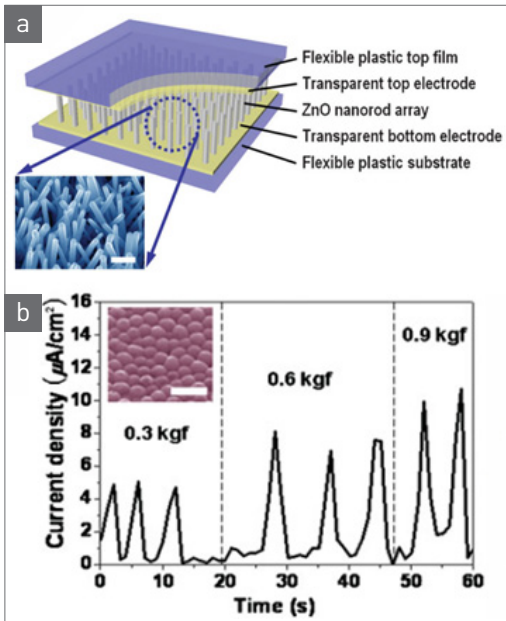


그림 2 ▶ (a) 유연기판에 제작된 ZnO 기반 나노발전소자, (b) 발전소자에 적용된 힘에 따른 출력전류밀도.

4. 유연 압전에너지 하베스팅 소자

유연 압전 에너지 하베스팅 소자가 처음 개발되었을 때 사용되었던 나노선 구조의 산화 아연은 출력 값이 작기 때문에 현재는 주로 페

로브스카이트형 재료를 사용한다. 페로브스카이트(perovskite)형 재료인 BTO, PZT, PMN-PT는 산화 아연보다 압전 결합 상수 d_{33} 가 각각 3, 25, 90배 크기 때문에 이 구조를 가진 물질을 기반으로 한 연구가 활발히 진행되었다. 2010년 이후에는 결정화된 BTO, PZT, PMN-PT의 페로브스카이트형 박막을 벌크형 기판에서 플라스틱 기판으로 압전 성질의 손실 없이 이동시켜 유연하게 만드는 연구가 보고되었다 [7-9].

유연 압전발전소자는 외부 압력 및 굽힘 등과 같은 물리적 힘이 가해질 때 전기를 생성하는 압전효과를 이용한 에너지 생성 소자로서 아무런 제한 없이 언제 어디서나 공급될 수 있는 기계적 힘을 이용하여 에너지를 생성한다는 것이 다른 신재생 에너지 소자들과의 차별성이자 장점이다. 또한, 얇은 플라스틱 기판을 이용해 제작된 플렉서블 압전발전소자는 인체에 부착이 가능하며 사람이 활동할 때 발생하는 신체 움직임들과 심장박동, 눈깜빡임, 들숨/날숨 등과 같은 미세한 움직임들도 전기에너지로 변환할 만큼 민감도가 높기 때문에, 언제 어디서나 전력원으로 사용할 수 있는 웨어러블 자가발전 에너지 생성소자로 알려져 있다. 연구개발 초기에는 그림 3과 같이 금속-절연체-금속(metal-insulator-metal, MIM) 구조를 가진 BTO 박막 압전 에너지 하베스팅 소자를 제작하였다 [10]. 이 소자는 플라스틱 기판의 취약한 열 특성과 무관하게, 딱딱한 실리콘 기판에서 열처리를 한 후 분리시키는 방식을 이용하여 제작되었다. 전통적인 마이크로 단위의 소자 제작법과 Soft Lithographic 기술을 이

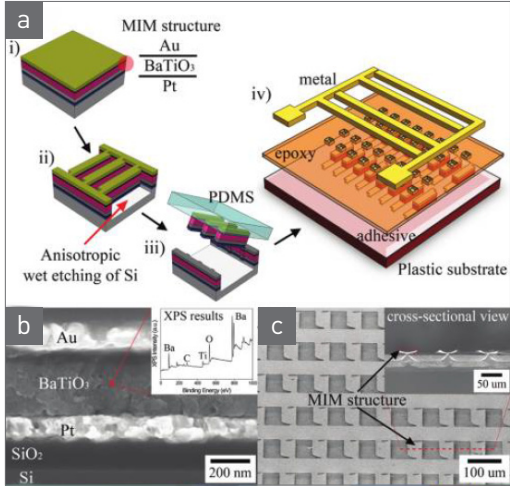


그림 3 ▶ (a) 플라스틱 기판에 제조된 BaTiO₃ 기반의 유연 압전 소자, (b) MIM 구조의 단면 SEM 이미지, (c) 비등방적 인식각공정에 의해 제조된 MIM 구조의 이미지.

용하여 압전 성질의 손실 없이 BaTiO₃ 박막을 플라스틱 기판으로 옮길 수 있었다. BTO는 납을 포함하고 있지 않기 때문에 인체에 무해한 재료로 주목 받고 있다. 하지만 BTO는 PZT나 PMN-PT와 같은 박막 압전 물질에 비해 압전 결합 상수가 낮아 적은 전력을 소모하는 전기 소자에만 사용될 수 있다는 한계가 존재한다.

최근 연구에서 BTO의 단점이 보완된 효율이 높은 유연 박막 에너지 하베스팅 소자가 개발되었다. 이 연구에서는 압전 결합 상수 d_{33} 이 높은 PZT를 재료로 사용했고 소자 크기를 키워 출력 전압을 높였다 [11]. 여기서 주목해야 할 점은 엑시머(excimer) 레이저를 사용하여 PZT를 플라스틱 기판에 옮기는 건식 유형의 Inorganic-Laser Lift Off(ILLO) 공법을 사용했다는 것이다. 이로 인해 생산 공정이 단순화되고 소자의 상업화가 가까워졌다. 그림 4(a)는 ILLO를 사용한 PZT 박막 에너지 하베스팅 소

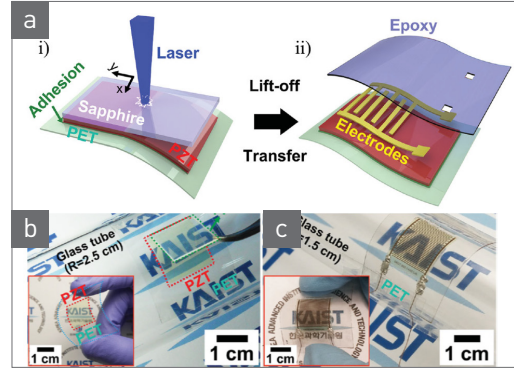


그림 4 ▶ (a) 플라스틱 기판에 전사된 PZT 박막 기반의 유연 압전 소자, (b) 사파이어 기판으로부터 떼어낸 PZT 박막 이미지, (c) 최종 제작된 유연 PZT 압전소자.

자의 공정 과정을 나타낸다. 그림 4(b)는 ILLO 공정으로 깨끗하게 떼어낸 사파이어 기판을 나타내며, 그림 4(c)는 ILLO 및 패시베이션 에폭시 코팅된 PZT의 유연성과 안정성을 보여준다. 이 소자는 기존까지 보고된 유연 에너지 하베스팅 소자에 비해 매우 높은 출력을 나타내었음에도 불구하고, 높은 전압에 비해 낮은 전류 특성을 가져 실제 이용되는 장비를 구동 시키기에는 전류 값이 부족하다는 한계가 있다.

유연 박막의 특성 한계를 극복하기 위해서 압전특성을 갖는 압전나노입자와 MW-CNTs(multi-walled carbon nanotubes), RGO(reduced graphene oxide)와 같은 흑연질 탄소를 탄성체 PDMS(polydimethylsiloxane)에 섞은 압전복합재료에 대한 연구가 시작되었다 [12-14]. 이때 흑연질 탄소는 압전나노입자를 분산시키는 분산제 역할과 압전층을 단단하게 만드는 강화제 역할을 하여 출력 전압과 전류

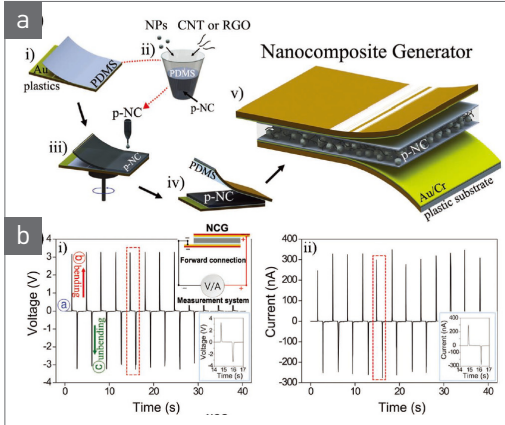


그림 5 ▶ (a) 압전복합재료 기반의 유연 압전소자, (b) 소자 굽힘 시 발생하는 출력 전압과 출력 전류.

를 증가시킨다(그림 5). 이렇게 제조된 소자는 가격이 저렴하고 대면적이 가능하다는 장점이 있다 [12].

최근에는 간단한 잉크젯 프린팅 기술을 사용해 150 nm(나노미터)의 아주 작은 압전입자가 분산된 잉크와 유기물을 플라스틱 기판에 차례로 도포하여 대면적 형태의 유기-무기 하이브리드 압전후막을 제조하였다(그림 6). 연구팀은 고온공정 및 전사공정 없이 잉크젯 프린팅 공정만으로 얇은 플라스틱 기판 상에서 고효율 하이브리드 압전후막은 물론 상·하부

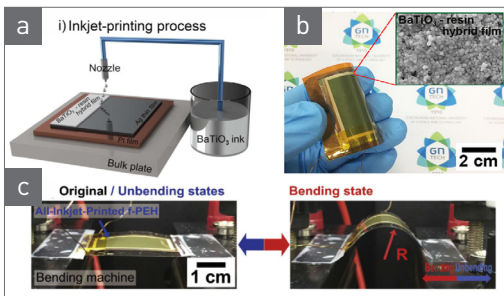


그림 6 ▶ (a) 잉크젯 프린팅 공정 과정, (b) 개발된 유연 압전발전 소자, (c) 소자의 반복적인 굽힘 과정.

전극을 구현함으로써, 구부러질 때마다 약 7 V의 전압과 3 μ A의 전류를 생성하는 플렉서블 압전발전소자를 개발하였다 [15].

한편, 압전복합소재가 상용화되기 위해서는 압전나노입자가 고분자내에서 고함량으로 균일하게 분산되어 있고 고효율의 압전복합소재가 필요한데, 가장 큰 문제점은 입자의 함량이 높아지면 분산성이 저하되고 발전용량이 급격히 감소하게 된다는 점이다. 최근에는 이를 해결하기 위해 압전(piezoelectricity) 나노입자와 고분자 사이의 화학적인 결합을 새롭게 디자인하여 기존 소재의 한계를 극복한 고효율 압전복합소재를 개발하였다. 아민기(amine group)로 표면 기능화된 압전나노입자를 스티렌-에틸렌-부틸렌-스티렌(SEBS)계 블록공중합체(block copolymer) 내부에 입자를 균일하게 분산시켰으며 복합소재 내 입자의 함량을 크게 증가시켰다(그림 7). 또한 표면 기능화된 압전나노입자와 블록공중합체 사이의 화학적인 결합을 통해 외부에서 인가된 스트레스가 압전나노입자에 효과적으로 전달되어 에너지 발전용량을 극대화할 수 있었다. 유연 압전복합

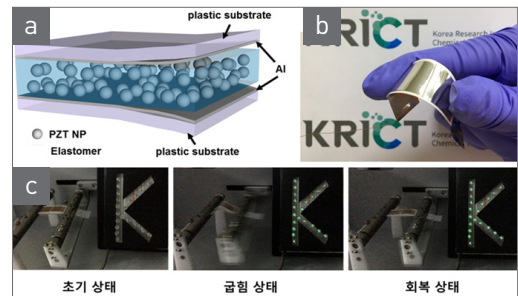



그림 7 ▶ (a) 유연 압전발전소자의 모식도, (b) 고효율 압전복합소재 기반 유연 압전발전소자, (c) 소자의 굽힘 시 LED의 구동.

소재는 굽힘의 물리적 형태변형시 65 V의 출력전압과 1.6 μ A의 출력전류가 발생하였고, 외부의 배터리 연결 없이 20개 이상의 LED를 구동시켰다 [16].

따라서 에너지 하베스팅 소자를 에너지원으로 활용한 무선 통신 방식은 필수적이다. 뿐만 아니라 웨어러블 기술과 통합된 에너지 하베스팅 기술은 구글 글래스, 스마트 워치, 전자 섬유로 이루어진 패치형 직물, 센서 제품 등 다양한 분야로의 활용될 것이다. 

5. 맺음말

지금까지 압전에너지 하베스팅 소재 및 소자에 대한 국내외 연구동향을 기술하였다. 압전 에너지 하베스팅은 유비쿼터스 센서 등의 소형동력원에서부터 도로, 철로, 활주로 등 각종 교통수단을 통해 발생하는 미활용 에너지의 매크로 하베스팅 및 음파, 심장박동, 혈압 등 각종 인체활동의 미세한 진동을 이용한 나노 하베스팅에 이르기까지 전자산업에서 자동차, 에너지 산업, 의료산업, 도시환경 산업 등에 다양하게 활용될 것으로 기대되며 그 응용가능성은 무한한 아이디어의 창출에 의해서 실현될 수 있을 것으로 생각된다.

세계적으로 압전발전에 대한 기초연구는 상당히 많이 이루어져 있다. 앞으로 연구방향은 가해지는 힘이 작은 환경에서 작은 힘에서도 변형이 크게 일어날 수 있는 나노구조 또는 유연발전기가 필요할 것이다. 특히, 미래에는 사물 인터넷의 시대가 도래하여 모든 사물에 네트워크가 형성되기 때문에 무선 통신 기술과 정보 기술이 필수적일 것이다. 그러나 모든 사물에 네트워크용 배터리를 부착하고, 주기마다 배터리를 갈아 끼우는 것은 현실적으로 어

참 / 고 / 문 / 헌

- [1] F. R. Fan, W. Tang, and Z. L. Wang, *Adv. Mater.*, 28, 4283 (2016).
- [2] G. T. Hwang, M. Byun, C. K. Jeong, and K. J. Lee, *Adv. Healthcare Mater.*, 4, 646 (2014).
- [3] Z. L. Wang and J. Song, *Science*, 312, 242 (2006).
- [4] X. Wang, J. Song, J. Liu, and Z. L. Wang, *Science*, 316, 102 (2007).
- [5] Y. Qin, X. Wang, and Z. L. Wang, *Nature*, 451, 809 (2008).
- [6] 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).
- [7] S. H. Shin, Y. H. Kim, M. H. Lee, J. Y. Jung, and J. Nah, *ACS Nano*, 8, 2766 (2014).
- [8] C. K. Jeong, I. Kim, K. I. Park, M. H. Oh, H. Paik, G. T. Hwang, K. No, Y. S. Nam, and K. J. Lee, *ACS Nano*, 7, 11016 (2013).
- [9] J. Chun, N. R. Kang, J. Y. Kim, M. S. Noh, C. Y. Kang, D. Choi, S. W. Kim, Z. L. Wang, and J. M. Baik, *Nano Energy*, 11, 1 (2015).
- [10] K. I. Park, S. Xu, Y. Liu, G. T. Hwang, S. J. L. Kang, Z. L. Wang, and K. J. Lee, *Nano Letters*, 10, 4939 (2010).
- [11] K. I. Park, J. H. Son, G. T. Hwang, C. K. Jeong, J. Ryu, M. Koo, I. Choi, S. H. Lee, M. Byun, Z. L. Wang, and K. J. Lee, *Adv. Mater.*, 26, 2185 (2014).
- [12] K. I. Park, M. Lee, Y. Liu, S. Moon, G.-T. Hwang, G. Zhu, J. E. Kim, S. O. Kim, D. K. Kim, Z. L. Wang, and K. J. Lee, *Adv. Mater.*, 24, 2999 (2012).
- [13] K. I. Park, C. K. Jeong, J. Ryu, G. T. Hwang, and K. J. Lee, *Adv. Energy Mater.*, 3, 1539 (2013).
- [14] C. K. Jeong, K. I. Park, J. Ryu, G. T. Hwang, and K. J. Lee, *Adv. Funct. Mater.*, 24, 2620 (2014).
- [15] J. Lim, H. Jung, C. Baek, G. T. Hwang, J. Ryu, D. Yoon, J. Yoo, K. I. Park, and J. H. Kim, *Nano Energy*, 41, 337 (2017).
- [16] E. J. Lee, T. Y. Kim, S. W. Kim, S. Jeong, Y. Choi, and S. Y. Lee, *Energy Environ. Sci.*, 11, 1425 (2018).

저 / 자 / 약 / 력



성명 이수연

학력 2005년
2007년
2011년

경력 2011년-2012년
2012년-2014년
2014년-현재

연세대학교 화학공학과 공학사
KAIST 생명화학공학과 공학석사
KAIST 생명화학공학과 공학박사

KAIST 박사후연구원
University of Pennsylvania 박사후연구원
한국화학연구원 선임연구원