



## 압전 에너지 하베스팅 기술과 3D 프린팅 기술의 이해 및 융합연구

글 \_ 김보연, 남산  
고려대학교

### 1. 서론

지난 10년 간 세계 에너지소비는 지속적으로 증가하였으며 최근 에너지 소비증대는 석유, 석탄과 같은 화석연료가 주도하였다.<sup>1)</sup> 이러한 화석에너지 소비증대로 인하여 에너지의 고갈문제 뿐 아니라 연료 사용에 따른 온실가스 배출량 증가 등의 환경문제까지 대두되고 있다. 이를 해결하기 위해 친환경적이고 지속가능한 대체 에너지 개발에 대한 관심이 급증하였다. 현재 연구되고 있는 대체 에너지원으로는 우리 주변에 존재하고 있는 태양광, 열, 전자기, 풍력, 조력, 진동 등이 있다. 이같이 주변의 활용되지 않는 다양한 대체 에너지를 모아 유용한 전력원으로 사용하는 기술이 에너지 하베스팅 기술이다. 이중 압전 에너지 하베스팅은 외부에서 인가한 기계적 에너지에 의해 압전 물질이 변형될 때 발생하는 전기적 에너지를 이용하는 기술로, 주변의 미활용 에너지를 변환하여 전기에너지를 얻을 수 있다. 이러한 압전 에너지 하베스팅 기술은 주변의 일상적인 진동 (열차 이동, 장비의 떨림, 사람이나 동물의 움직임 등)으로부터도 전력 생성이 가능하고 전자노이즈가 발생되지 않으며 반영구적으로 사용할 수가 있다는 장점을 가지고 있다.

압전 에너지 하베스팅 소자는 진동 환경에 최적화 되도록 설계와 제작이 용이할 뿐 아니라 유연성 및 내구성을 위해 폴리머 등 다른 소재와의 복합화도 가능하기 때문에, 모듈의 구조와 출력되는 전력의 크기에 따라서 그 응용범위가 매우 다양하다. Fig. 1에서는 압전 에너지 하

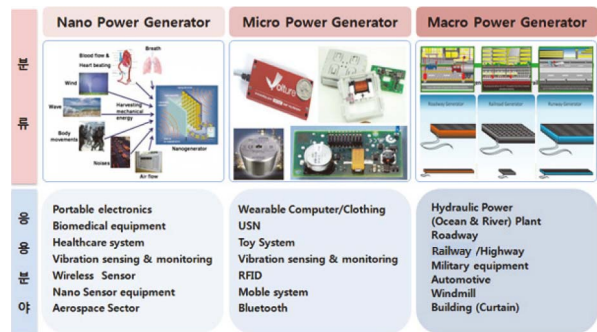


Fig. 1. 압전 에너지 하베스팅 기술의 응용분야.

베스팅 기술의 다양한 응용분야를 나타내었다. Macro-scale 압전 에너지 하베스팅 기술은 풍력, 조력, 사람의 움직임 등에 의해 발생하는 비교적 큰 물리적 에너지로부터 전기적 에너지를 얻는다. 다양한 구조의 압전 모듈을 통해 도로, 철로, 활주로 등의 사회 기반 시설 등에 대규모로 설치할 경우 수 메가와트급의 전력공급이 가능하기 때문에 신개념의 에너지원의 역할을 할 것으로 기대가 되며 꾸준히 연구되고 있다. 최근에는 전자기술이 발달함에 따라 센서 네트워크 및 웨어러블 전자기기, 생체 이식형 소자 등 초소형 기기를 배터리에 의존하지 않고 반영구적으로 구동시키기 위해, 압전 나노 제너레이터에 대한 연구가 전 세계적으로 급증하고 있다.

이러한 압전 에너지 하베스팅 시스템의 고효율 및 고효율화를 구현하기 위해서는 소재 및 구조의 개발에 관한 더 많은 연구가 필요하다. 압전 에너지 하베스팅 소자는 주로 캔틸레버라는 간단한 전력변환 구조물을 이용하여 소자 제작이 비교적 간단하다는 장점이 있지만 아직



대량생산 연구에 따른 본격적인 상용화가 이루어지지 않고 있다. 최근 각광받고 있는 3D 프린팅 기술을 압전 에너지 하베스팅 소자에 적용시킨다면 데이터 시뮬레이션을 통해 더욱 다양하고 미세한 구조와 적합한 물성 제어가 가능하며 최적의 소자를 맞춤형으로 생산할 수 있다. 따라서 3D 프린팅 기술을 통해 압전 에너지 하베스팅 소자의 성능 향상뿐 아니라 대량화를 통한 상용화를 기대할 수 있다. 본 고에서는 압전에너지 하베스팅 기술의 연구 동향을 살펴보고 3D 프린팅 기술적용을 통한 미래의 발전 전망에 대해 살펴보고자 한다.

## 2. 압전 에너지 하베스팅

압전 현상이란, 어떠한 물질에 기계적 변형(수축 혹은 인장)을 가했을 때 유전분극(polarization)을 일으켜 전극과 소자 계면에서의 전하 밀도가 순간적으로 변화하여 외부로 전기에너지가 흐르는 현상이다.(Fig. 2) 이 압전 현상에서의 기계적 에너지와 전기적 에너지의 상호간 결합 형태는 선형성과 가역성의 특징을 보이며 출력되는 전기에너지는 분극의 크기가 클수록 증가한다.

이처럼 압전 특성을 갖는 물질을 압전재료라고 한다. 고체의 결정구조인 7개의 crystal systems을 32개의 정축(point groups)으로 나눌 때 21개의 비대칭성을 갖고 있는 정축 중 20개의 정축 물질만이 압전재료에 속한다. 에너지 하베스팅에 사용되는 가장 대표적인 압전재료는 높은 압전 특성을 가지는 PZT(Lead Zirconate Titanate)기반의 페로브스카이트계 복합 재료이다. 그러나 이러한 PZT는 납 성분을 포함하고 있다는 점에서 환경문제를

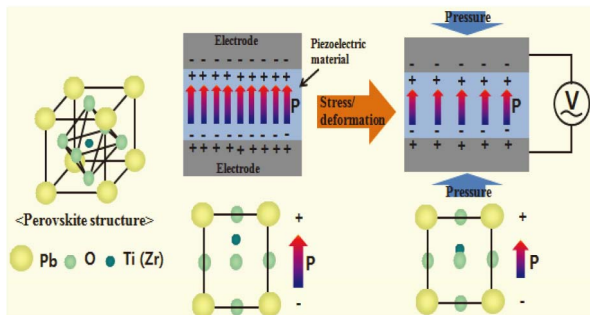


Fig. 2. 압전현상에 대한 모식도.

유발할 수 있기 때문에 PZT를 대체할 수 있는 비연계 압전 세라믹스에 대한 연구가 진행되어왔다. Yasuyoshi Saito 등이 2004년 Nature 지에 높은 압전 특성의 (NaK)NbO<sub>3</sub>-Li(NbTaSb)O<sub>3</sub> (NKN-LNTS)에 대한 연구를 발표했듯이 NKN, BNT 기반의 비연계 압전 재료의 특허 및 연구가 꾸준히 행해져 왔다.<sup>2)</sup> 뿐만 아니라 긴 체인 분자 사이에 흡입과 반발로 인하여 압전 효과를 가지는 PVDF(Polyvinylidene fluoride)와 같이 최근 압전 폴리머에 대한 연구도 활발해 지고 있다.<sup>3)</sup>

이러한 압전 소재가 외부로부터 일시적으로 혹은 지속적으로 물리적 충격을 받아 변형 진동이 일어나면 압전 효과에 의해서 교류전류가 발생한다. 이렇게 생성된 전류를 통해 자극을 감지하거나 정류소자(Bridge Rectifier)를 통해서 축전기에 저장하여 Vc 만큼의 전압차 발생에 의한 발전이 생기는데 이것이 바로 압전 에너지 하베스팅의 기본 원리이다.(Fig. 3)

압전 에너지 하베스팅 소자가 발생시키는 전력밀도는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.<sup>4)</sup>

$$U = 1/2 \times (d_{ij} \times g_{ij}) \times (F/A)^2$$

이 때 d는 압전 변형상수, g는 압전 전압상수, F는 힘, A는 면적을 나타낸다. 따라서 높은 에너지 밀도를 얻기 위해서는 재료의 압전특성인 d<sub>ij</sub> × g<sub>ij</sub>가 높아야 한다.

이러한 압전 에너지 하베스팅 기술은 태양광, 풍력, 열전 등을 이용한 다른 발전 방법에 비해 에너지 변환 효율이 높고 주변 환경의 관계없이 이용할 수 있다는 점에서 높이 평가된다. 최근엔 압전 재료의 특성 향상, 작동모드와 진동구조 개선, 주파수 선택성 등에 대한 연구를 통해 더욱 향상된 성능을 기대할 수 있다. 무엇보다 압전 에너

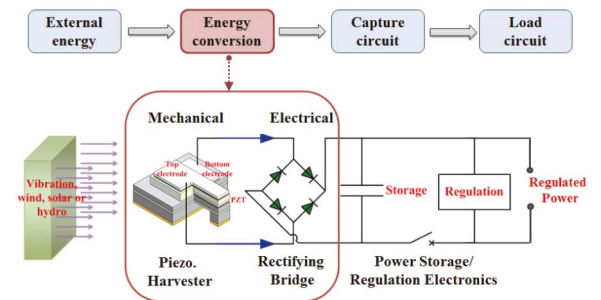


Fig. 3. 압전 에너지 발전 시스템.



지 하베스팅의 가치는 대규모의 발전 장치에서부터 나노 사이즈의 소형기기에 이르기까지 넓은 분야에 응용이 가능하다는 점으로 군수, 의료, 전자 산업 등 각종 분야에서 폭넓은 연구가 이루어지고 있다.

### 2.1. Macro-scale 압전 에너지 하베스팅

사람이나 자동차 등의 기계적 동작과 같이 비교적 강한 물리적 에너지를 이용한 Macro-scale 에너지 하베스팅 기술은 통상적으로 Fig. 4와 같은 캔틸레버 전력변환 구조물을 이용한다.<sup>4)</sup> 외부 진동이 발생할 경우 캔틸레버 표면에 접합되어 있는 압전 물질의 변형을 통해 전기 에너지를 얻는다.

Macro-scale 에너지 하베스팅 기술은 국내외 기업에서 관심을 갖고 개발하는 분야이다. 대표적으로 미국의 '파워리프(PowerLeap)'라는 회사는 사람들이 뛰거나 걸을 때 밟으면서 발생하는 힘을 이용하여 전기를 생성시키는 바닥을 제작하였다.(Fig. 5) 또한 일본의 '음력발전'이라는 기업에서 만든 압전 하베스팅 '발전마루'는 진동 효과를 극대화시키는 진동판을 이용하여 사람이 걷거나 차량이 주행하는 동안 발생하는 진동 에너지를 전기 에너지로 변환하였다. 이 '발전마루'를 사람들의 이동이 빈번한 지하철의 개찰구 등에 설치하여 하루 약 6000W의 전력을 생산하였으며, 차량이 이동할 때 발생하는 에너지를 이용하기 위해 동경의 고속도로 및 고시키자쿠라 대교에 설치할 경우, 하루 약 0.24kW의 전력을 생산할 수 있다고 한다.<sup>5)</sup>

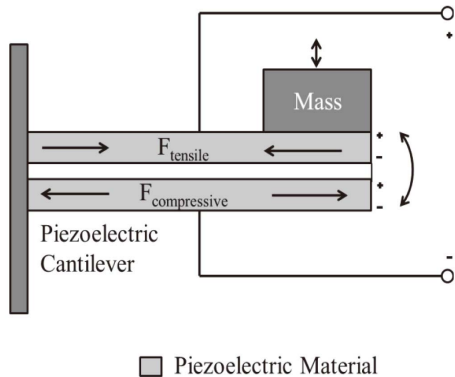


Fig. 4. 압전 캔틸레버 모델.



Fig. 5. 파워리프사의 압전 에너지 하베스팅을 이용한 바닥.

그 밖에 이스라엘의 에너지 하베스팅 시스템 개발 회사(INNOWATTECH)에서도 철로나 통행로와 같은 무거운 기계의 하단에 압전 발전모듈을 설치하여 국부적으로 전기적 에너지를 얻거나 그리드 전력에 이용이 가능한 발전시스템을 만들어 내었다. 국내에서도 역시 압전 에너지 하베스팅 기술을 이용한 '에너지블럭' (한국세라믹기술원과 (주)센블의 공동개발)을 보행자 도로나 자전거 도로 등에 설치하여 LED 전원으로 활용하는 등 기술 개발과 이용에 힘쓰고 있다.

헬리콥터 날개 부분에 설치하여 회전 진동으로 전기 에너지를 생산하는 MicroStrain Inc.사의 압전 에너지 하베스터 부품이나 사람의 움직임에 에너지원으로 사용하기 위한 미국의 MIT의 에너지 하베스팅 신발 등은 군사 시스템에 유용하게 활용될 수 있다. 특히 에너지변환 발전 신발의 경우 PZT 액츄에이터와 PVDF를 장착하여 표준 걸음 시 약 9.7mW의 자체 전력을 발생시켰다.<sup>6)</sup> 이러한 압전 에너지 하베스팅 시스템은 훈련 중 지나가 달리는 움직임만으로도 전원이 없는 곳에서도 자체 전원 공급을 하여 군사 훈련 시 수개월동안 야외에서 훈련활동을 할 수 있도록 구현하였다.

### 2.2. 나노 압전 제너레이터

전자기술이 발전함에 따라 전자기기가 소형화되고, 소형 전자기기를 구동시키는 에너지에 대한 관심이 증가하고 있다. 배터리나 외부전원 없이 반영구적으로 에너지를 공급할 수 있는 자가 구동(self powering) 시스템은

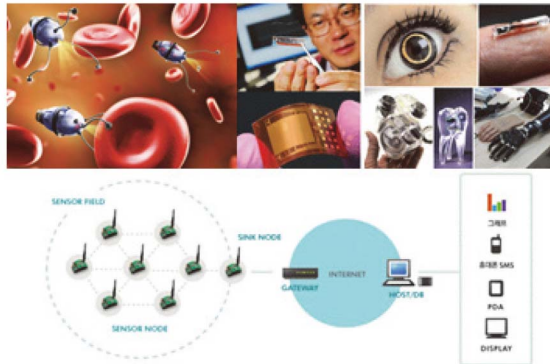


Fig. 6. 초소형 자가 구동 소자 및 USN 모식도

웨어러블 전자기기나 인체 삽입형 바이오 의료 소자, USN 시스템에 사용되는 초소형 센서의 영구적이고 안정적인 구동을 위해 매우 중요하며, 에너지 하베스팅 기술이 그 방안으로 제시되고 있다. 특히 이러한 나노 기기의 반영구적인 동력원으로 사용하기 위해서는 인체의 진동, 소리 또는 심장 박동과 같이 미세한 에너지까지 이용할 수 있어야 하며 초소형 사이즈의 하베스팅 시스템이 필요하다. Fig. 6은 압전 나노 제너레이터가 응용될 수 있는 자가 구동 소자와 USN 시스템을 보여준다.

### (1) 나노선 압전 제너레이터

나노선 압전 에너지 하베스팅은 나노선을 이용하여 미세한 진동에너지를 전기에너지로 변환시키는 기술로 2009년 MIT 테크놀로지 리뷰에서 미래 10대 유망 기술 중 하나로 선정되었다. 초소형 나노선 압전 제너레이터의 연구 개발은 Georgia Institute of Technology의 Z. L. Whang 그룹이 2006년 n-type 반도체인 ZnO 나노선을 이용하여 세계 최초로 시작하였다.<sup>7)</sup> (Fig. 7) ZnO는 압전성과 반도체성을 동시에 가지면서도 1차원의 나노선 구조의 제조가 쉽기 때문에 그 이후 이를 이용한 많은 연구가 이어져 나노선 기반의 나노제너레이터에 대한 발표 논문 수는 꾸준히 증가하고 있다.<sup>7-9)</sup> 미국 조지아 공대에서 개발한 ZnO 나노선을 이용한 나노 발전 소자에서 볼 수 있듯이 용이한 나노선 어레이를 통한 집적화 기술의 향상으로 높은 전력출력이 가능해지면서 상용화 가능성도 높아졌다.<sup>10)</sup>

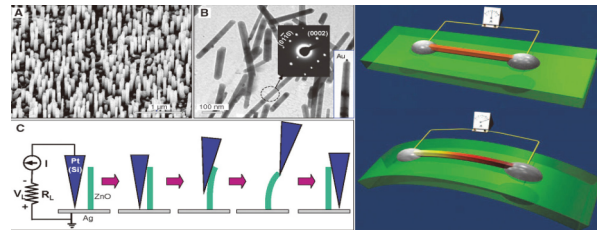


Fig. 7. Z. L. Whang 그룹에서 연구한 Vertical ZnO 나노 제너레이터.

나노선 기반의 에너지 하베스팅 소자에 대한 연구는 대부분 ZnO를 이용해왔지만, 반도체 산화물인 ZnO(압전전하상수  $d \sim 12 \text{pC/N}$ )는 압전 특성이 낮아 그 한계가 있다. 따라서 고출력의 압전 나노선 에너지 하베스팅 소자 구현을 위해 압전 특성이 우수한 PZT 나노선을 이용한 압전 나노 제너레이터에 관한 연구가 진행되었다. Stevens Institute of Technology의 Xi Chen 등의 보고에 따르면 PZT 나노선을 제조한 후 하베스팅 소자를 제작한 결과, 약 0.03 W의 전력을 얻을 수 있었다.<sup>11)</sup> (Fig. 8)

PZT 재료를 대체할 친환경 비연 압전 재료를 이용한 나노선 압전 제너레이터에 대한 연구도 진행되어왔다. 미국의 일리노이 대학의 Ming-Feng Yu 그룹은 BaTiO<sub>3</sub>

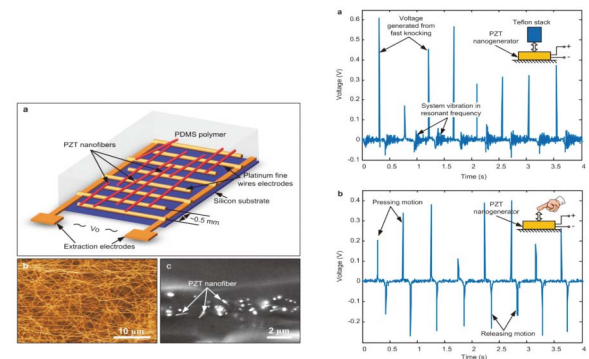


Fig. 8. PZT 나노선을 이용한 나노 압전 제너레이터.

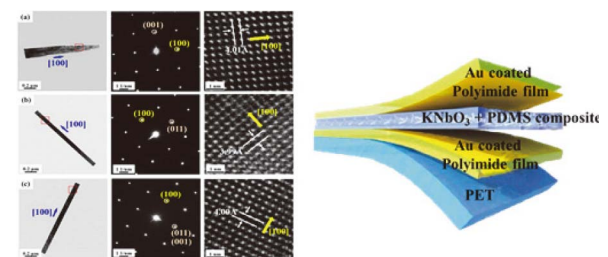


Fig. 9. KN 나노선을 이용한 나노 압전 제너레이터.



나노와이어를 성장시켜 나노 센서에 전원 공급을 위한 압전 나노발전기를 제작하여 출력특성을 평가하였다.<sup>12)</sup> 최근에는  $\text{KNbO}_3$ (KN) 나노선을 합성하고, 고분자와 혼합하여 만든 나노제너레이터가 10.5 V 와 1.3 A의 출력 전압과 출력전류를 발생시켰다고 보고되었다.<sup>13)</sup> (Fig. 9)

### (2) 박막형 압전 제너레이터

나노 압전 에너지 하베스팅 기술 개발을 위해 나노선 구조 이외에도 박막형 구조의 압전 제너레이터에 대한 연구도 꾸준히 이어지고 있다. 특히 KAIST의 K. I. Park 등의 연구에서 flexible 기관 위에 BT 박막을 형성한 경우 약  $7\text{mW}/\text{cm}^3$ 의 높은 전력 밀도를 얻을 수 있었다.<sup>14)</sup> Fig. 10에서 볼 수 있듯이 BT 박막 나노제너레이터는 전통적인 마이크로 단위의 소자 제작법과 Soft Lithographic 기술을 이용하여 압전 성질의 손실 없이 BT 박막을 플라스틱 기관으로 옮기며 박막형 나노 압전 제너레이터의 발전 가능성을 열어 주었다.

BT 박막 나노제너레이터에 이어 압전 특성이 높은 PZT 박막을 이용한 나노제너레이터가 개발되고 있는데 특히 건식 유형의 Inorganic-Laser Lift Off(ILLO) 공법을 사용하여 사파이어 기관위의 PZT 박막을 플라스틱 기관에 옮겨 10 A 전류를 얻었다.<sup>15)</sup> Fig. 11에서는 단결정 PMN-PT를 사용한 에너지 하베스팅 연구를 보여준다. PMN-PT를 사용한 유연 압전 에너지 하베스팅 소자는 Ni Exfoliation 기술을 이용하여 0.22mA의 이전의 유연 압전 제너레이터 보다 수십 배 향상된 전류를 만들어 냈

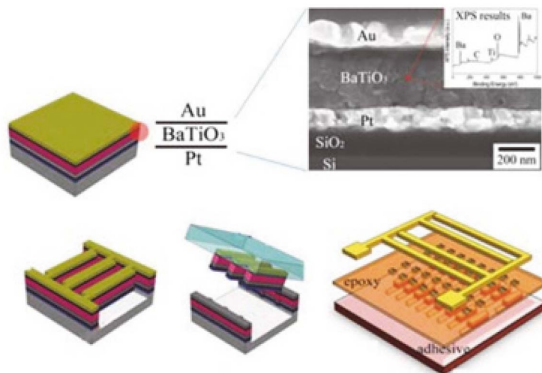


Fig. 10. BT 박막을 이용한 나노 압전 제너레이터.

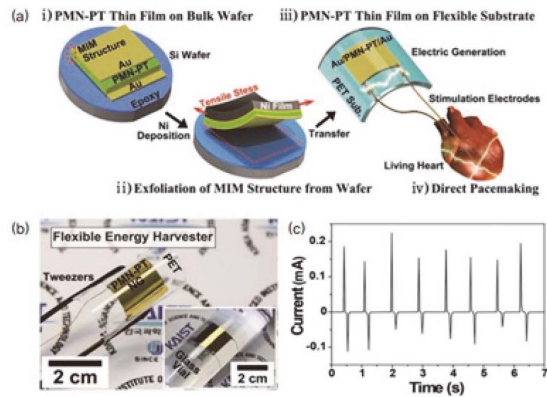


Fig. 11. PZT 박막을 이용한 나노 압전 제너레이터.

으며, 이는 인공 심장박동기 등 체내에 이식이 가능한 소형 장치를 구동시킬 수 있는 수치로 압전 에너지 하베스팅을 통한 체내 자가발전 의료소자 시스템의 구현 가능성을 보여주었다.<sup>16)</sup>

### (3) 응용분야

미래의 네트워크 전자기기 시스템에서 에너지 하베스팅 소자를 에너지원으로 활용한 무선 통신 방식은 필수적이다. 압전 나노제너레이터는 센서 네트워크 시스템에서 각종 소형 센서의 영구적인 구동 전압으로 사용될 수 있으며 이를 웨어러블 기술과 통합시키면 구굴 글래스, 스마트 워치, 전자 섬유로 이루어진 패치형 직물, 센서 제품 등 다양한 분야로의 활용이 가능할 것으로 기대된다. 하지만 무엇보다도 나노 압전 하베스팅 기술이 가장 기대되는 분야는 바이오-의료 산업이다. 소형구조와 작은 진동에도 민감하게 반응할 수 있는 압전 나노제너레이터는 혈류, 혈당을 측정하는 나노센서, 약물전달시스템에 응용될 수 있다. 뿐만 아니라 플렉시블한 압전 에너지 하베스팅 소자는 굴곡진 표면을 갖는 심장, 눈 등 각종 신체 장치에 부착하여 사용이 가능하므로 인공 망막, 뇌 심부자극술(Dep Brain Stimulation, DBS), 인공 심장 박동기 등에 활용 가능성이 높다.

## 3. 압전 에너지 하베스팅 기술의 전망과 3D 프린팅 기술



압전 에너지 하베스팅 소자는 다양한 분야에서 활용 가치가 높고 비교적 간단한 구조를 가지고 있다. 하지만 사업화 및 상용화를 위해서는 대량화 양산 공정에 대한 연구가 필수적이다. 그 동안 이에 대한 연구가 미비하여 상용화 가능한 압전 에너지 하베스팅 소자의 구조에도 많은 제한을 받는 상황이다. 그러나 최근 3D 프린팅 기술이 발달함에 따라 새롭고 다양한 구조의 압전 에너지 하베스팅 소자의 구현과 그에 따른 향상된 소자 기능, 그리고 대량 양산을 통해 상용화를 앞당기는 효과를 기대할 수 있다.

### 3.1. 3D 프린팅 기술의 종류와 원리

최근 전 세계의 제조 산업 선진국을 중심으로 제조업 혁신을 위한 3D프린팅 기술 및 응용 기술 연구가 매우 활발하다. 3D프린팅 기술은 3차원 스캔이나 3차원 모델링을 통하여 획득된 디지털 데이터를 적층가공 방식(Additive Manufacturing: AM)으로 제작하는 가공기술이다.<sup>17)</sup> 기존의 금형, 몰딩 등 다른 제조방법에 비해 비용 및 시간을 절감할 수 있고 다양한 구조 설계가 가능하다는 장점을 가지고 있지만 무엇보다 분말이나 액상의 금속, 세라믹, 고분자 등 다양한 물질을 가공할 수 있다는 점에서 그 활용도가 매우 높다. 이러한 3D 프린팅을 구현하는 방법에는 크게 SLS(Selective Laser Sintering), DLP (Digital Light Processing), FDM(fused deposition modeling) 방식이 있다.(Fig. 12)

먼저 Selective Laser Sintering (SLS)는 최초의 상업용

3D 프린터방식으로 파우더 형태의 재료에 레이저를 입사시켜 한층 씩 소결하며 적층시키는 방법이다. 사용가능한 재료가 다양하여 큰 과급효과를 기대하는 기술이다. Digital Light Processing (DLP) 방식은 광경화 방법으로 레이저를 이용하여 점 단위로 소결시키는 SLS와는 달리 광경화성 액상 수지와 프로젝터를 이용해 면 단위로 적층한다. 따라서 빠른 속도의 프린팅이 가능하면서도 매끄러운 표면을 구현할 수 있다. FDM 방식의 경우 필라멘트 형태의 열가소성 플라스틱을 노즐에서 가열한 후 분사하여 적층함으로써 제품을 제작한다. 구조가 단순하고 상대적으로 제품의 단가가 저렴하다.

### 3.2. 3D 프린팅 기술의 응용

3D 프린팅 기술은 다양한 프린팅 방식과 세라믹, 금속, 생체재료, 고분자등 다양한 재료의 가공이 가능하기 때문에 폭넓은 분야에 적용이 가능하다. 특히 3D 프린팅 기술은 디지털 데이터로부터 목적에 맞게 맞춤형 설계를 통한 직접 생산이 가능하다는 점에서 매우 효율적이다. 이러한 장점으로 가장 기대되는 활용분야는 의료 바이오 산업이다. 플라스틱이나 세라믹소재를 이용하여 3D 프린팅으로 제작된 인공 골격이나 신체 보조기구는 디지털 설계를 이용한 맞춤형 소량생산의 장점을 잘 살린 사례이다. 뿐만 아니라 생체소재를 이용하여 인공 장기를 제작하는데 이용할 수도 있다. 독일 프라운호퍼연구소에서 제작된 인공혈관은 3D 프린팅 기술을 이용하여 특수 잉크로 인공혈관을 인쇄하고 그 위에 인공세포가 융합되도

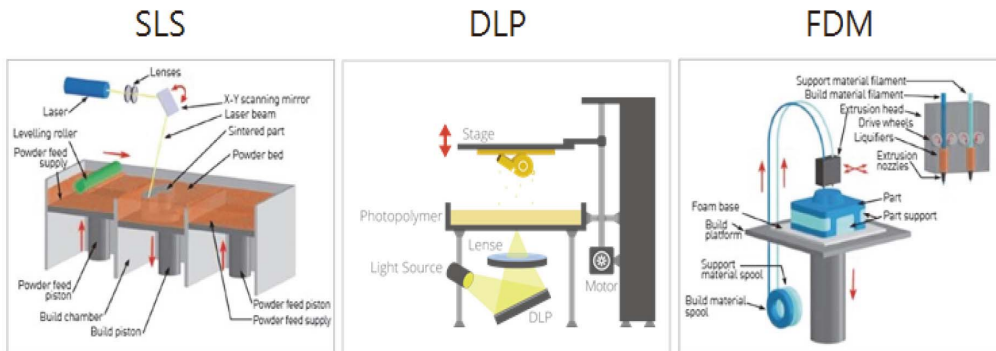


Fig. 12. 다양한 3D 프린팅 기술



일반 제조	바이오 의료	생활용품 및 기타
<ul style="list-style-type: none"> <li>• (전체) 시제품, 육안, 사출금형용도</li> <li>• (항공) 제트엔진 부품, 공조부품, 날개 등</li> <li>• (자동차) 엔진부품</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 의지장구: 의수/의족</li> <li>• 의료보조기구: 수술 가이드, 임플란트, 보청기</li> <li>• 생체조직: 귀, 간, 피부</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공예품: 액세서리, 인테리어 용품</li> <li>• 생활용품: 구두, 컵, 펜, 안경, 옷 등</li> <li>• 교보재: 건축시뮬레이션 3차원모형(디오라마)</li> <li>• 장난감: 인형, 조립장난감</li> <li>• 기타: 식품, 복제유물, 건물 등</li> </ul>

Fig. 13. 3D 프린팅 기술의 응용 사례.

록 유도한 후 특수 단백질 세포를 혈관 내벽에 흡착시켰다. Fig. 13는 기존에 행해졌던 3D 프린팅 기술의 다양한 응용 사례를 보여준다. 특히 인체의 미세한 진동으로 에너지를 얻는 인공 생체 압전 에너지 하베스팅 소자 제작이 있어 3D 프린팅 기술을 사용한다면 맞춤형 설계를 통해 복잡한 구조의 소자를 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3.3. 3D 프린팅 기술을 응용한 압전 에너지 하베스팅

앞서 압전 에너지 하베스팅과 3D 프린팅 기술 동향에서 살펴봤듯이 압전 에너지 하베스팅 기술을 현재 활발히 연구되고 있는 3D 프린팅 기술과 접목시킨다면 그 효율성뿐만 아니라 생산성에서도 큰 시너지 효과를 가져올 것이다. 특히 3D 프린팅은 데이터 설계를 통해 맞춤형 생산이 가능하기 때문에 기존에 압전 에너지 하베스팅 소자로 구현하기 어려웠던 인체 모방 형태의 소자 및 인체 삽입형의 초소형 소자를 제작하는데 있어 큰 발전을 가져올 것으로 기대된다. Fig. 14에서 볼 수 있듯이 최근 3D 프린팅 기술을 이용하여 압전 나노입자와 폴리머를 혼합한 하베스팅 소자에 대한 연구를 진행하였다.<sup>18)</sup> 비연계 압전 물질과 폴리머를 이용한 이 압전 에너지 하베스팅 소자는 현재의 절삭 기술로는 불가능한 크기와 형태제어의 제한을 3D 프린팅 기술로 극복하고 고차원의 3D 구조의 압전 소자를 구현했다는 점에서 큰 의의가 있다.

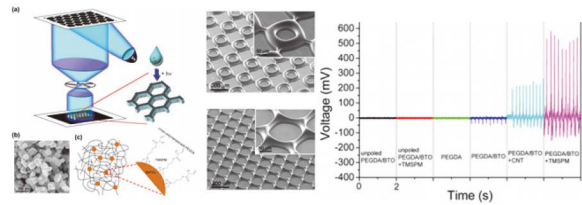


Fig. 14. 3D 프린팅 기술을 이용한 압전 에너지 하베스팅 소자.

이처럼 자가발전이 가능한 하베스팅 소자에 3D 프린팅 기술을 활용하여 다양한 구조에 대한 형상화가 가능하다면 고출력 및 고효율을 가져올 것으로 보인다. 압전 효율이 최적인 구조를 시뮬레이션으로 도출해내고 이를 3D 프린팅 기술로 그대로 재현에 낸다면 압전 에너지 하베스팅 소자의 상용화 및 고성능화로 이어질 것이다. 뿐만 아니라 3D 프린팅 기술은 압전 하베스팅 소자의 구조적인 향상에 그치지 않고 소재의 특성도 제어할 수 있기 때문에 더욱 유용하다.

## 4. 결론

주위 환경의 버려지는 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 압전 에너지 하베스팅 기술은 비용 소모가 거의 없고, 다양한 응용 분야에 활용이 가능하다는 점, 그리고 유연성, 소형화가 유리하다는 점에서 지속적으로 각광받고 있는 기술이다. 특히, 모든 전자기기의 네트워크가 형성되는 미래에는 압전 에너지 하베스팅을 이용한 자가 구동 시스템이 중요한 분야로 자리 잡을 것이다. 뿐만 아니라 스트러처블, 웨어러블 기술과 융합한 에너지 하베스팅 기술은 전자 섬유로 이루어진 스마트 전자기기 및 패치형 센서 제품 등에서 중요하게 활용될 것이다. 무엇보다 인체의 미세한 움직임으로 발생하는 에너지로도 전원을 공급받을 수 있어 바이오 센서, 인공 장기 등 다양한 인체 삽입형 소자에 응용되어 생명 공학 및 의료 분야에 큰 발전을 가져올 것으로 기대한다. 특히 이 기술을 현재 각광받고 있는 3D 프린팅 기술과 융합시킨다면 더욱 다양하고 미세한 구조와 적합한 물성 제어가 가능하며 데이터 시뮬레이션을 통한 최적의 압전 에너지 하베스팅 소자 개발이 가능하다. 따라서 3D 프린팅 기술은



압전 에너지 하베스터의 성능뿐 아니라 상용화로의 발전 가능성을 증가시켰으며 이러한 융합 연구가 활발해 질 것으로 보인다.

## 참고문헌

1. bp.com/statisticalreview BP Statistical Review of World Energy, June, 2014.
2. Y. Saito, H. Takao, T. Tani, T. Nonoyama, K. Takatomi, T. Homma, T. Nagaya, and M. Nakamura, "Low Temperature Sintering of the Alkali-Niobate Ceramics," *Nature*, **432** 84 (2004).
3. S. J. Yoon, A. Kazuo, and M. Uchino, "Development of an Energy Harvesting Damper Using PVDF Film," *Int. J. Energy Res.*, **39** [11] 1545-53 (2015).
4. S. Priya, "Advances in Energy Harvesting Using Low Profile Piezoelectric Transducers," *J. Electroceram.*, **19** 165 (2007).
5. <http://www.soundpower.co.jp>
6. N. S. Shenck and J. A. Paradiso, "Energy Scavenging with Shoe-Mounted Piezoelectrics," *IEEE Macro*, **3** 30-42 (2001).
7. Z. L. Wang and J. Song, "Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays," *Science*, **312** 242 (2006).
8. Y. F. Lin, J. Song, Y. Ding, S. Y. Lu, and Z. L. Wang, "Alternating the Output of a CdS Nanowire Nanogenerator by a White-Light-Stimulated Optoelectronic Effect," *Adv. Mat.*, **20** 3127 (2008).
9. S. Xu, Y. Qin, C. Xu, Y. Wei, R. Yang, and Z. L. Wang, "Self-Powered Nanowire Device," *Nature Nanotech.*, **5** 3553 (2010).
10. D. Choi, M. Y. Choi, W. M. Choi, H. J. Shin, H. K. Park, J. S. Seo, J. 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 Electrodes," *Adv. Mater.*, **2** 2187 (2010).
11. X. Chen, S. Xu, N. Yao, and Y. Shi, "1.6 V Nanogenerator for Mechanical Energy Harvesting Using PZT Nanofibers," *Nano Lett.*, **10** 2133 (2010).
12. 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).
13. M. R. Joung, H. Xu, I. T. Seo, D. H. Kim, J. Hur, S. Nahm, H. M. Park, S. Jin. Yoon, and H. M. Park, "Piezoelectric Nanogenerators Synthesized Using KNbO<sub>3</sub> Nanowires with Various Crystal Structures," *J. Mater. Chem. A*, **2** [43] 18547-53 (2014).
14. K. I. Park, S. X. Y. Liu, G. T. Hwang, S. J. L. Kang, Z. L. Wang, and K. J. Le, "Piezoelectric BaTiO<sub>3</sub> Thin Film Nanogenerator on Plastic Substrates," *Nano Lett.*, **10** 4939 (2010).
15. K. I. Park, J. H. Son, G. T. Hwang, C. K. Jeong, J. Ryu, M. Koo, I. Choi, S. H. Lee, M. H. Byun, Z. L. Wang, and K. J. Lee, "Highly Efficient, Flexible Piezoelectric PZT Thin Film Nanogenerator on Plastic Substrates," *Adv. Mater.*, **26** [16] 2514 (2014).
16. G. T. Hwang, H. Park, J. H. Lee, S. K. Oh, K. I. Park, M. H. Byun, H. L. Park, G. Ahn, C. K. Jeong, K. S. No, H. S. Kwon, S. G. Lee, B. Y. Joung, and K. J. Lee, "Self Powered Cardiac Pacemaker Enabled by Flexible Single Crystalline PMN PT Piezoelectric Energy Harvester," *Adv. Mater.*, **26** [28] 4880 (2014).
17. F. Rengier, A. Mehndiratta, H. von Tengg-Koblighk, C. M. Zechmann, R. Unterhinninghofen, H.-U. Kauczor, and F. L. Giesel, "3D Printing Based on Imaging Data: Review of Medical Applications," *INT J COMPUT ASS RAD*, **5** [4] 335 (2010).
18. K. Kim, W. Zhu, X. Qu, C. Aaronson, W. R. McCall, S. Chen, and D. J. Sirbully, "3D Optical Printing of Piezoelectric Nanoparticle-Polymer Composite Materials," *ACS nano*, **8** [10] 9799 (2014).

### ●● 김보연



- 2011년 고려대학교 신소재공학과 학사
- 2013년 고려대학교 신소재공학과 석사 (현 고려대학교 KU-KIST 융합대학원 박사과정)

### ●● 남산



- 1983년 고려대학교 재료공학과 학사
- 1990년 University of Maryland 재료공학과 박사
- 1992년 한국전자통신연구원(ETRI) 선임연구원
- 1996년 고려대학교 교수