

압전 에너지 하베스팅 기술개발 동향

김 재 환[†] · 고 현 우 · 문 성 철 · 김 주 형 · 김 흥 수*

인하대학교 기계공학과, *동국대학교 기계에너지로봇공학과

Recent Advancement of Piezoelectric Energy Harvesting

Jaehwan Kim[†], Hyun-U Ko, Seong Cheol Mun, Joo-Hyung Kim, and Heung Soo Kim*

Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

*Department of Mechanical, Robotics and Energy Engineering, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea

Abstract: 최근 진동과 같은 주위 환경의 기계적인 에너지로부터 전기에너지를 얻는 압전 에너지 하베스팅 기술은 무선센서, 모바일 기기 등에 무선으로 전력을 공급하는 기술의 필요에 따라 많은 관심을 받고 있다. 모바일 기기나 무선센서 네트워크는 지금까지 배터리를 전원으로 사용하여 왔으나 배터리 수명이 짧아 배터리 교체가 불편하며 어떤 경우에는 불가능하다. 따라서 모바일 기기나 무선센서의 자가전원으로 에너지 하베스팅이 필요하다. 본 글은 진동 에너지로부터 전기 에너지를 획득하는 압전 에너지 하베스팅 기술에 대한 개요, 기술개발 현황, 당면한 기술적 과제, 시장동향, 그리고 향후 전망에 대해 소개한다.

Keywords: energy harvester, vibration energy, piezoelectric, wireless sensor

1. 서 론

에너지 하베스팅은 자연에 존재하는 태양광, 열, 진동, 바람, 위치에너지, 전자기파로부터 전기적 에너지를 획득하는 기술로서 최근 무선 센서 네트워크, 모바일 기기, 웨어러블 컴퓨터 등의 등장으로 각광을 받고 있다. 자연으로부터 에너지를 얻을 수 있는 방식에는 태양광으로부터 에너지를 얻는 솔라셀, 열로부터 전기에너지를 얻는 열전소자, 진동으로부터 전기에너지를 얻는 압전소자, 그리고 전자기파로부터 에너지를 얻는 RF 방식이 있다[1]. 이들의 얻을 수 있는 에너지의 크기는, 솔라셀은 태양광 에너지로부터 약 $0.4 \sim 40 \text{ mW/cm}^2$ 의 에너지를 얻을 수 있으며, 열전소자는 열에너지로부터 약 $0.01 \sim 10 \text{ mW/cm}^2$ 의 에너지를, 압전소자는 진동에너지로부터 약 $0.005 \sim 10 \text{ mW/cm}^2$ 의 에너지를, 그리고 RF 방식은 약 $0.1 \sim 5 \text{ mW/cm}^2$ 의 전기적 에너지를 각각 얻을 수 있다. 이렇게 획득

된 전기에너지는 그 크기에 따라 원격나노센서, 웨어러블 전자회로, 의학 디바이스, 헬스케어 시스템, 무선센서 네트워크, 군용 디바이스, 자동차, RFID, 모바일 기기, 마이크로 로봇, 자동차, 교량-빌딩 안전점검센서, 해양플랜트, 철도차량, 풍력발전 등에 사용될 수 있다[2]. Table 1은 에너지원에 따른 에너지 하베스팅의 특성을 나타낸다. 한편, 이러한 기기들은 자연에서 직접 전력을 획득함으로써 안전성, 보안성, 지속가능성을 유지할 수 있고 탄소저감 및 환경공해를 줄일 수 있다.

압전 에너지 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 압전 재료 및 압전 에너지 하베스팅의 개요, 최근 압전 에너지 하베스팅 개발현황과 시장을 소개하고 향후 전망을 설명한다.

[†]주저자 (E-mail: jaehwan@inha.ac.kr)

Table 1. 에너지원에 따른 에너지 하베스팅 특성

에너지	특성	효율(%)	획득전력(mW/cm ²)
빛	실외	10~24	100
	실내		100
열	인체	~0.1	60
	산업		~3
진동	인체	25~50	~4
	기계		~800
RF	900 MHz	~50	0.1
	2.45 GHz		0.001

2. 압전 에너지 하베스팅 개요

압전재료는 기계적 응력에 따라 분극을 일으켜 전하를 발생시키는 재료를 말하는 것으로, 기계적인 응력에 의해 전하를 발생시키는 정압전효과(direct effect)와 전기장을 가하면 변형이 발생하는 역압전효과(converse effect)를 갖는다[3]. 압전재료는 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하거나, 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 소재로 이러한 현상은 1880년 Curie에 의해 발견된 후, 수정, 로셀염, BaTiO₃, Lead Zirconate Titanate (PZT), Polyvinylidene Fluoride (PVDF) 등의 압전재료가 발견, 개발되었다. 압전재료는 주위의 자극에 반응이 뛰어난 성질 때문에 정밀성이 요구되는 마이크로/나노 단위의 스테이지 구동부, 소나(Sonar) 제품들에 주로 사용되었다.

압전재료는 소위 강유전체(ferroelectrics)에 속하며 분자구조의 분극이 일정방향으로 배열되어 있는 강유전체로서 전기적 다이폴(electric dipole) 특성을 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

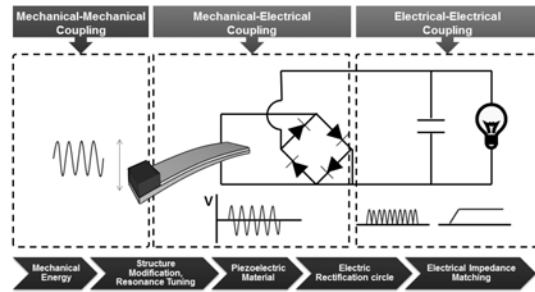


Figure 1. 압전 에너지 하베스팅 기술의 개념.

전기장의 방향에 따라 다른 응력과 변형을 발생시킨다. 따라서, 압전상수는 방향성을 갖게 된다. 예를 들어, d_{33} 는 재료의 방향성중 하나의 방향(여기서는 3방향)으로 전기장을 가했을 때 그 방향(즉 3방향)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. 압전상수중 전기기계결합계수(electromechanical coupling coefficient), k 는 기계-전기에너지의 변환 또는 전기-기계에너지의 변환을 나타낸다.

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

즉, 정압전효과에서는 기계적 에너지가 가해졌을 때 나오는 전기적 에너지의 크기를, 역압전 효과에서는 전기적 에너지가 가해졌을 때 나오는 기계적 에너지를 나타낸다. Table 2는 대표적인 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 변환효율로서 진동에너지를 친환경 에너지로 변환할 수 있는 장점이 있다. 압전상수에 대한 자세한 내용은 참고문헌에 잘 나와 있다[4].

압전효과를 가지고 있는 압전재료를 에너지수확

Table 2. 대표적인 압전재료의 압전상수들

재료	$d(\text{pC/N})$	k
Quartz	5	0.1
BaTiO ₃	242	0.15~0.2
PZT	496	0.5~0.7
PVDF	23	0.1

장치에 적용시킬 경우 동일한 기능을 하는 에너지 발전장치보다 단위 면적당 발생력이 우수하고, 자기장의 영향을 받지 않아 다른 전기장치들과 같은 공간에 있어도 간섭이 발생하지 않는다는 장점이 있다. 그러나 얇은 판의 형성으로 이루어진 압전 소자는 큰 전압을 얻기 위해서 여러 개를 적층시켜야 하고, 전압은 변형에 비례하여 커지기 때문에 보다 큰 변형을 얻기 위해 더 큰 굽힘 현상을 유발시키려하고, 굽힘이 커짐에 따라 압전체의 파손의 위험이 커지는 단점이 있다.

압전 에너지 하베스팅은 기계적인 진동 에너지를 압전재료를 통하여 전기적인 에너지로 변환하고 전기적인 정류회로를 거쳐서 필요한 전력을 얻어내는 그린에너지 기술이다. Figure 1은 압전 에너지 하베스팅 기술의 개념을 나타낸다. 본 기술의 구성요소는 구조물에 대한 모델링 및 설계, 압전재료, 그리고 전기회로 매칭 기술로 이루어진다.

3. 압전 에너지 하베스팅 기술개발 현황

3.1. 압전 에너지 하베스팅용 에너지 변환소재

압전 에너지 하베스팅용 에너지 변환소재는 에너지 하베스팅의 성능에 매우 중요한 역할을 한다. 압전 에너지 변환소재에 요구되는 첫 번째 특성은 높은 압전성능이다. 압전재료의 기계-전기결합계수 k 가 0.5에서 0.9로 향상된다면 에너지 변환효율은 25%에서 81%로 높아지기 때문이다. 두 번째 요구되는 특성은 내충격성 및 유연성이다. 압전 에너지 하베스팅은 철도, 차량도로, 인도 등 충격 또는 연속적인 진동으로부터 에너지를 얻어야 하므로 이러한 충격 및 진동에 깨지지 않아야 한다. 이것은 재료가 유연할 때 가능할 수 있다.

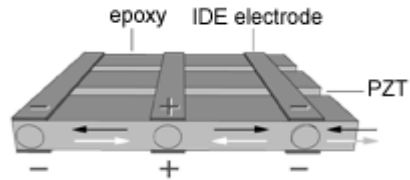


Figure 2. MFC의 구조 [8].

셋째 요구되는 특성은 내환경성, 인체 무해성, 친환경성 등이다. 이러한 재료의 특성을 만족하기 위해 다양한 압전에너지 변환소재가 개발되고 있다.

대표적인 압전재료로 압전 세라믹이 있다. PZT는 지금까지 개발된 압전재료 중에서는 압전효율이 높은 반면에 납을 사용하므로 인체 유해하고 취성이 있어 잘 깨지는 특성이 있다. 이를 극복하기 위해 비납계(lead-free) 압전세라믹을 미국, 일본 등의 국가사업으로서 연구가 진행 중이며, Murata, Kyocera, Tokin, TDK 등의 민간기업에서도 개발하고 있다[5].

또한 압전세라믹의 최대 단점인 취성에 의한 파괴를 극복할 수 있는 고분자 압전재료와 압전세라믹/고분자 복합소재에 국제적인 관심이 집중되고 있다[6]. 압전세라믹/고분자 복합소재는 소나, 영상으로 진단에 쓰이는 초음파 변환기용으로 많이 개발되었다[7]. 한편, 압전 세라믹을 파이버 형태로 제작하여 Macro Fiber Composite (MFC)를 개발하였다[8]. MFC는 기존 압전 세라믹에 비해 유연하면서 압전세라믹의 압전특성을 유지할 수 있어 압전 에너지 하베스팅에 적합하다. Figure 2는 MFC의 구조를 나타낸다.

한편, 압전성질이 기존 PZT보다 우수한 단결정 압전 소재가 1990년에 개발되었다. 일본의 Kuwata, 미국의 Shrout 등은 연계압전 단결정 $\text{Pb}[(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.91}\text{Ti}_{0.09}]\text{O}_3$ (PZN-PT91/09 단결정), $[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.7}\text{Ti}_{0.3}]\text{O}_3$ (PMT-PT70/30 단결정)의 d_{33} 가 1,500pC/N 이상인 것을 보고하였다[9]. 이 단결정 압전재료는 기계-전기결합계수, k 가 0.9 이상으로, 에너지 변환효율이 81%에 해당하므로 성능면에서 압전 에너지 변환재료로 최적이다. 그러나, 납계 압전재료이고 퀴리온도(Curie temperature)가

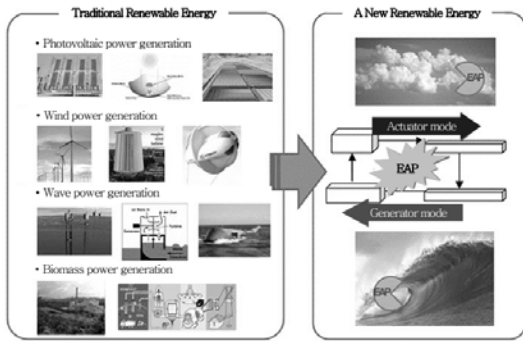


Figure 3. EAP를 이용한 신재생 에너지 개발[11].

낮으며 단결정 제조가 어려워 가격이 비싼 단점이 있다. Morgan사, TRS사에서 상용제품을 냈으며, 국내에서는 세라콤에서 Solid State Crystal Growth 법을 새로이 개발하여 PMN-PT 단결정을 제조하여 시판하고 있다[10].

전기활성 고분자(EAP; Electroactive Polymer)는 전기적인 자극을 가하면 기계적인 움직임을 얻을 수 있고, 기계적인 자극이 주어지면 전기를 얻을 수 있는 소재로서 EAP 액추에이터는 차세대 스마트 액추에이터로서 최근 주목을 받고 있으며, 역-액추에이터 모드를 사용할 경우 기존의 에너지 변환소자(전자기소자, 압전소자)들에 비해 훨씬 큰 에너지를 얻을 수 있다. 기존의 에너지 변환소자의 에너지 밀도가 약 0.05 J/cc를 넘지 못하나 현재 연구에서 사용되는 EAP 소자들은 0.4 J/cc로써 기존의 전자기소자 및 압전소자를 이용한 마이크로 발전기에 비해 저단가, 저소음, 연성 및 다접목성 등의 많은 장점을 가지고 있어 다방면에 이용 가능하며 우수한 성능을 가진다[11]. Figure 3은 EAP를 이용한 신재생 에너지 개발의 개념도를 나타낸다. Figure 4는 EAP와 경쟁기술 간의 특성 분석결과를 나타낸다[12].

EAP은 전기장에 의해 작동하는 EAP와 이온에 의해 작동하는 EAP로 대별되며, Electric EAP에는 압전 고분자, 전왜 고분자, dielectric elastomer가 있고, ionic EAP에는 폴리머 젤, 이온박막, 탄소나노튜브, 도전성 고분자 등이 있다[13]. Electric EAP는 일반적으로 작동속도가 빠르고 온도 습도

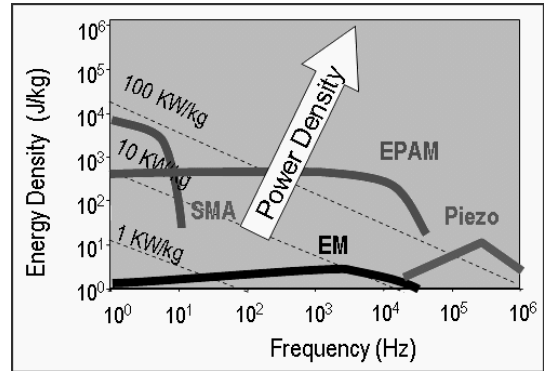


Figure 4. EAP와 스마트 재료의 특성비교[12].

등 주위환경에 의한 성능변화가 적으나 작동전압이 높은 단점이 있다. 반면에 ionic EAP는 작동전압이 낮고 큰 변형을 내지만 수분이나 전해질이 잘 유지되어야 하며 작동속도가 늦은 단점이 있다. Dielectric elastomer에 관한 연구는 최근에 매우 활발하게 진행되고 있는 분야 중의 하나이며, 기존의 에너지 변환소자에 비해 큰 전기기계적 효율, 빠른 반응속도와 마찬가지로 큰 에너지 밀도와 변형을 나타내므로 선형 액추에이터, diaphragm형 펌프, 로터리 모터, 그리고 햅틱소자 및 전원장치 등과 같은 다양한 종류의 액추에이터 개발을 가능케 한다.

EAP를 이용한 신재생 에너지 개발 분야에서 국내의 기술은 압전소자보다 더 늦게 연구가 진행되어 미국, EU 및 일본에 비해 크게 뒤떨어져 좀 더 활발한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료되며, 성균관대학교, 건국대학교, 한국과학기술원, 전남대학교에서 EAP 재료에 대한 연구와 응용분야에 대한 연구가 진행 중이다. 인하대학교 생체모방중이작동기 창의연구단에서는 셀룰로오스를 가지고 Electroactive Paper (EAPap)를 개발하여 생체모방 작동기, 스피커, 햅틱 작동기, 센서, 에너지 하베스터 등에 응용하는 연구를 수행하고 있다[14].

EAP를 이용한 마이크로 전원발전기술은 전 세계적으로 태동 단계에 있으며, 발전소자 선정 기술, EAP 설계 기술, 발전소자 가공기술, 마이크로 발전 기술, 에너지 변환 기술 등 많은 기술적 과제

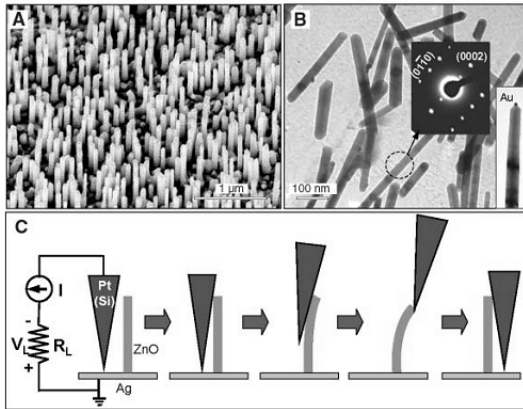


Figure 5. ZnO 나노선기반의 나노발전기[15].

들이 해결되면 미래의 자연·청정에너지 수확을 위한 한 기술 축이 될 것으로 전망된다.

3.2. 나노구조 압전 에너지 하베스팅

나노선(Nanowire)을 기반으로 하는 압전 에너지 발전기술은 미세 진동 에너지를 전기에너지로 변환시키는 친환경/청정에너지로, 현재 전 세계적으로 원천기술을 확보하기 위한 경쟁단계에 있으며, 나노선의 압전 세라믹 소재기술, 나노선 발전 특성 평가기술 및 나노선 집적화 소자기술은 수년 내 급속한 성장이 예상된다. 압전 나노선을 이용한 전력발생소자기술은 2009년 MIT Technology Review에서 미래 10대 유망 기술들 중 하나로 선정되어 관련기술에 대한 관심이 급증하고 있다.

산화아연(ZnO) 나노선을 이용한 나노발전기가 2006년 조지아공대 팀에 의해 처음 발표된 이래 많은 연구가 보고되었다[15]. 출력전압 6~9 mV, 출력전력 10 pW/um²을 내는 ZnO 나노발전기는 ZnO의 압전효과와 반도체 성질, 그리고 쇼트키 장벽(Schottky barrier) 형성에 의한 것으로 밝혀졌다. 최근에는 ZnO 나노선 발전기를 이용하여 자가발전 무선센서를 시연하였다[16].

한편, PZT 나노선을 이용한 나노발전기를 웨어러블 섬유 에너지 하베스팅에 응용한 예도 있다 [17]. PZT 나노선을 전해방사(electro-spinning)로 제조하여 나노선을 평행하게 배열함으로써 6 V,

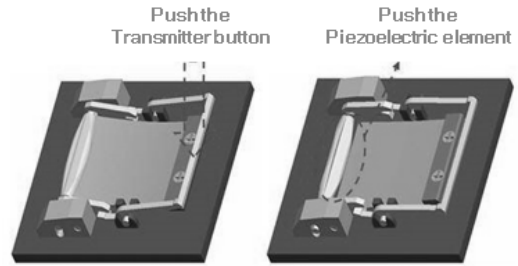


Figure 6. 압전 자가발전 무선 스위치[20].



Figure 7. (썩음)력발전의 발전마루[23].

45 nA의 전력을 얻어냈다. 이 외에도 PZT 리본을 PDMS 고분자 위에 스퍼터링 기법으로 올려서 신축가능한 나노발전기를 만들기도 하였고[18], PZT 나노파이버를 PDMS 고분자와 섞어 유연한 나노발전기를 만들어 1.63 V, 30 pW의 전력을 얻었다 [19].

3.3. 무선 센서용 압전 에너지 하베스팅

무선 센서는 근거리에 많은 곳에 설치하여 네트워크를 이루어 센서 네트워크(WSN, Wireless Sensor Network)를 이루므로 센서 또는 센서 네트워크 자체에서 전력을 생산하여 공급하는 것은 매우 중요한 기술이다. 압전 에너지 하베스팅은 WSN에 매우 적합한 기술이다. 적용 예로는 원격 환자 감시, 유독 물질 감지, 효율적인 사무실 비상제어, 경찰 및 안전감시, 적군의 이동경로 감지 및 감시, 농작물 관리 시스템, 홈 오토메이션, 임플란트 센서, 교량 안전성 원격감지, 항공기 수명 진단 등이 있다 [2]. 대만의 SUNNYTEC은 압전세라믹회사로서 압전세라믹 복합재를 이용하여 무전원 원격스위치를 개발하였다[20]. 미국의 MIDE사에서는 유연하면서 큰 변형에도 깨지지 않고 안전하게 밀봉을

한 압전세라믹 기반의 QuickPack 압전 변환기를 사용하여 무선 압전 에너지 하베스터를 개발하여 제품화 하였다[21]. 이 하베스터는 무선 구조물 안전 진단센서 등에 자가 발전장치로 쓰일 수 있다. 독일의 EnOcean사는 송신단(Transmitter Module)에 압전 에너지 하베스터를 적용하여 배터리가 필요 없이 스위치를 눌렀을 때 발생하는 에너지를 센서 구동, RF 무선신호 송신, 각종 변환기를 작동시키는데 활용하였으며, 또한 Button push 방식의 경우 3 mm × 5 N의 힘을 가하였을 때 200 μW의 에너지를 얻을 수 있음을 발표했다[22].

3.4. 매크로 에너지 하베스팅 기술

국내의 여러 회사에서 관심을 갖고 압전 에너지 하베스팅 제품을 출시하고 있다. 대표적인 것으로 다음과 같은 제품이 있다. ㈜음력발전은 2006년 일본 후지사와에 설립된 대학벤처기업으로 사람의 이야기 소리와 소음 등 소리에너지로부터 전기 에너지를 얻어내는 음력발전기술을 개발하였다[23]. 또한 사람이 걸을 때 발생하는 진동이나 자동차, 자전거, 레저 스포츠 등의 움직임으로 인해 발생하는 진동에너지를 전기로 발전하는 진동력발전 기술 또한 확보하고 있다. 발전마루는 사람이 보행하거나 차량이 주행하는 동안 발생하는 진동 에너지를 전기에너지로 변환하는 발전기이다. 50 × 50 cm² 크기의 압전 발전마루에서 한번 밟으면 최대 0.3 W, 하루 최대 200 kW의 전력을 생산할 수 있다. 2010년 신 에노시마 수족관에 발전마루를 도입하여 일본도로공사와 공동으로 포장매설형식 발전마루를 개발하였다. 이 외에도 배터리-리스크리모콘, 발전 지팡이, 발전 나막신 등을 개발하였다. 이스라엘의 INNOWATTECH에서는 압전-고분자 복합재를 사용한 IPEG 압전 에너지 발전기를 개발하였다[24]. 이 회사는 IPEG을 도로, 철도, 공항활주로에 설치하여 전력을 생산하여 신호등, 철도 차단기, 가로등 등에 전력을 공급하는 Smart Way용 자가발전기술을 제안하고 도로실장실험을 수행한 바 있다. 만일 72 km/h의 속도로 시간당 600대의 차량이 지나는 도로 1 km에 IOPEG을 설

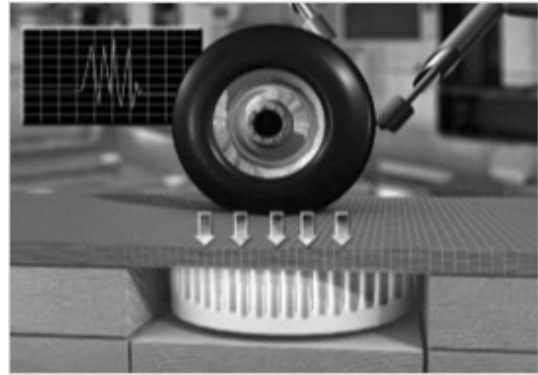


Figure 8. Smart Way용 자가발전 시스템[24].

치한다면 시간당 200 kWh의 에너지를 얻을 수 있다고 한다. 미국의 MIT공대 및 DARPA (Defence Advanced Research Project Agency)에서는 전투화에 dielectric elastomer EAP를 적용하여 0.9~3 mW 정도 발전이 가능한 시제품을 제작하였으며, 신발에 적용한 사례 중 가장 우수한 결과를 내놓고 있다[25]. 최근 국내 연구그룹에 의해 셀룰로오스 기반 압전종이가 개발되어 압전 에너지 하베스터에 응용하는 연구가 이루어지고 있다[26]. 셀룰로오스 필름위에 산화아연 나노막대를 성장시킨 나노복합재에서 약 40 μW/cm³의 전기에너지를 얻었는데, 이는 친환경적이고 유연한 압전재료로서 새로운 가능성을 보인다.

4. 시장 동향

압전 에너지 하베스팅 기술은 무선 센서 네트워크, 구조물 건전성 평가, 자동차 도로, 보행자 도로 등 적용분야가 매우 넓어, 시장의 성장성이 매우 높다. 2018년에는 압전 에너지 하베스트 시장이 1억 45백만 불이 될 예정이며, 2022년에는 6억 67백만 불로 시장이 성장할 전망이다[27]. 압전 에너지 하베스터는 2012년에 1억 개에서 2022년에는 3억개로 성장하여 점점 고부가가치 제품으로 성장할 전망이다. 에너지 하베스팅에 사용될 수 있는 압전재료에는 약 200가지가 있는데 사용 용도에 따라 각각 적합한 재료를 선정해야 한다. 전통적

으로 많이 쓰이는 PZT가 아직 대세이나 이를 대체할 다른 압전재료에 많은 관심이 모이고 있다. 그 이유로는 효율이나 온도에 대한 압전재료 성능뿐만 아니라 유연성, 경량, 친환경성 등이 고려되어야하기 때문이다.

5. 향후 전망

무선센서 네트워크, 모바일 전자기기의 자가 전력 공급의 중요성과 함께 압전 에너지 하베스터 기술의 가능성과 동향에 대해 살펴보았다. 압전 에너지 하베스터 소재에 요구되는 성질은 우수한 에너지 변환효율, 경량, 유연성, 제조용이, 저가격, 내구성, 내환경성, 환경친화성 등이 요구된다. 지금까지 주로 사용된 PZT는 에너지변환효율이 우수한 반면 취성이 있고 무거우며 납 성분으로 인해 환경친화적이지 못한 단점이 있다. EAP의 경우 압전소자에 비해서 유연성이 있고 에너지 변환 효율 및 내구성 면에서 PZT에 비해 비교적 우수한 것으로 실험적으로 알려졌지만, 작동능력과 재료의 안정성, 그리고 내구성 향상의 문제점이 있다. 압전 에너지 하베스터는 극지, 오지 및 인간이 직접적으로 투입되어 정보활동이 어려운 곳, 생존 위기에 처해있는 어류나 동/식물의 건강상태 모니터링 등과 같이 장시간의 정보수집과 추적이 필요한 곳에서는 배터리 사용이 제한적이기 때문에 진동에너지로부터 에너지를 변환하는 기술이 매우 중요하다. 또한 최근의 석유파동과 온실가스 문제와 같은 에너지위기에 대응하는 기술로서 압전 에너지 하베스팅 기술이 일조할 것으로 전망하며, 보다 우수한 성능을 가지는 재료 개발과 에너지를 최적으로 수확하는 구조설계기술, 그리고 연결 전자회로 및 에너지 저장 기술이 같이 개발된다면 실생활에 유용하게 활용될 것이다.

참 고 문 헌

1. A. Erturk and D. J. Inman, *Piezoelectric Energy Harvesting*, Wiley, New York (2012).

2. A. Velenzuela, *Energy Harvesting for No-Power Embedded Systems*, Texas Instruments, October 28 (2008).

3. H.-S. Kim, J.-H. Kim, and J. Kim, *Int. J. Prec. Eng. Manufactur.*, **11**, 1129 (2011).

4. T. Ikeda, *Fundamentals of Piezoelectricity*, Oxford University Press, New York (1996).

5. 한국세라믹학회, “Lead-Free 압전 세라믹 재료의 연구동향”, pp. 14-15 (2005).

6. Measurement specialties inc., *Piezo Film Sensors Technical Manual*, Measurement Specialties, Inc., (2006).

7. 한국세라믹학회, “최근의 압전세라믹스 개발 동향”, pp. 57-63 (2005).

8. <http://www.smart-material.com/>

9. J. F. Tressler, *J. Acoust. Soc. Am.*, **113**, 2311 (2003).

10. 황용길, 연계 고성능 압전단결정의 연구개발 동향, KISTI, <http://www.reseat.re.kr/>

11. 김성현, 이수재, 윤두협, 양용석, 문제현, 임상철, 박진아, 김진식, EAP를 이용한 청정 에너지 수확 기술 개발, 한국전자통신연구원, *전자통신동향분석*, **23**(6), (2008).

12. DARPA and SRI International.

13. 김재환, *Electroactive polymers (EAP)의 개발 및 응용기술 동향조사*, 과학기술부 (2001).

14. J. Kim, S. Yun, and Z. Ounaies, *Macromolecules*, **39**, 4202 (2006).

15. Z. L. Wang and J. H. Song, *Science*, **312**, 242 (2006).

16. Y. Hu, Y. Zhang, C. Xu, L. Lin, R. L. Snyder, and Z. L. Wang, *Nano Letters*, **11**, 2572 (2011).

17. W. Wu, S. Bai, M. Yuan, Y. Qin, Z. L. Wang, and T. Jing, *ACS NANO*, **6**, 6231 (2012).

18. Y. Qi, J. Kim, T. D. Nguyen, B. Lisko, P. K. PUrohit, and M. C. McAlpine, *NANO Letters*, **11**, 1331 (2011).

19. X. Chen, S. Xu, N. Yao, and Y. Shi, *NANO Letters*, **10**, 2133 (2010).

20. <http://www.sunnytec.com.tw/english/>
 21. <http://www.mide.com/>
 22. <http://www.enocean.com/>
 23. <http://soundpower.co.jp/>
 24. <http://www.innowattech.co.il/>
 25. 윤소남, 함영복, 박중호, 압전효과를 이용한 신 발 장착용 에너지 수확기 기술동향, 기계와 재

료, pp. 68-78, 2008년 12월.
 26. 적립동, 김재환, 고현우, 고소원, 김홍수, 셀룰로오스-산화아연 하이브리드 나노복합재의 진동에너지 획득 평가, 한국정밀공학회 2013년도 춘계학술대회논문집, 2013년 5월 29~31일.
 27. <http://www.IDTechEx.com/piezo/>

저자소개



김 재 환

2009 인하대학교 기계공학과
인하펠로우 교수
2012 한국과학기술한림원 정회원
2012 Smart Materials & Structures
부편집인
2012 Smart Nanosys. Eng.
Medicine 부편집인
1999 Institute of Physics, Fellow
2003~2012 생체모방종이작동기
창의연구단 단장
2004~2005 NASA Langley 연구소
방문과학자



고 현 우

2010 인하대학교 학사
2012 인하대학교 석사
2012 인하대학교 박사과정



문 성 철

2010 인하대학교 학사
2012 인하대학교 석사
2012 인하대학교 박사과정



김 주 형

2013 인하대학교 기계공학과 조교수
2009~2013 조선대학교 전자공학과 조교수
2008~2009 인하대학교 창의연구단
연구교수
2006~2008 독일 프라운호퍼 나노전자
연구소 책임과학자
2000~2002 삼성SDI중앙연구소 책임연구원
1995~2000 대우전자 중앙연구소
주임연구원
2010 소음진동공학회 산하 설비
진단 자격인증원 열화상
분과 간사



김 홍 수

2010 동국대학교 기계로봇에너지
공학과 조교수
2011 Journal of Mechanical Science
and Technology, 부편집인
2012 한국전산구조공학회 이사
2011 대한기계학회 CAE 및 응용
역학부문 이사
2009 한국소음진동공학회 편집위원