

# 에너지 수확기술의 이해

윤광석 | 서강대학교 교수



## 1. 서론

# 에너지

수확기술은 생활 환경에서 활용

되지 못하고 소멸하는 에너지를 전기에너지로 변환하는 기술을 의미한다. 큰 의미로 보면 파력발전, 태양광발전, 풍력발전 등 전통적인 발전 기술도 포함될 수 있으나, 일반적으로 에너지 수확기술이라고 하면 저전력 전 기전자 시스템의 배터리를 대체하여 주전력 또는 보조전력 공급의 목적으로 활용될 수 있는 단일 소자를 의미하는 좁은 범위로 통용되고 있다. 특히 최근에는 IT 기술의 발전과 함께 웨어러블 디바이스 기술이 발전함에 따라 이를 위한 독립적인 전기 에너지 공급원으로서 에너지 수확기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

### ENERGY HARVESTING SYSTEM

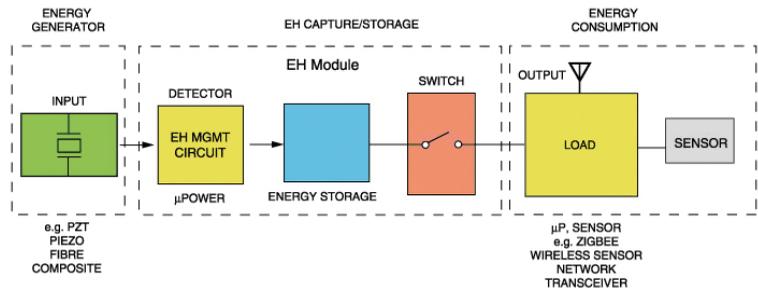


그림 1. 에너지 수확시스템 구현 예 (출처: <https://www.wirelessdesignmag.com/article/2010/04/what-energy-harvesting-and-how-does-it-work>)

에너지 수확기술은 빛에너지, 운동 에너지 (진동, 압력), 전자파 (RF), 열에너지 등 주변 환경에 존재하는 다양한 에너지 원을 활용한다. 표1은 전기에너지로 변환되어 활용될 수 있는 에너지원들과 전력량 등의 특성을 보여준다 [1].

에너지 수확소자에 의해 변환된 전기에너지는 전력 관리회로를 거쳐 에너지 저장소자 또는 부하에 전달된다. 전력 관리

표 1. 에너지 수확소자에 활용되는 에너지 원 및 에너지 수확소자의 특성

에너지원	출력 임피던스	출력 전압	출력 전력
빛	수 kΩ ~ 수십 kΩ	DC 0.5 ~ 5 V	실외: 0.15 mW ~ 15 mW 실내: < 500 μW
운동 (진동)	수십 kΩ ~ 100 kΩ	AC 수십 V	1 μW ~ 20 mW
열	1Ω ~ 수백 Ω	DC 수십 mV ~ 10V	0.5 mW ~ 10 mW
RF	수 kΩ	AC 0.5 ~ 5V	-

출처: <http://www.cymbet.com/design-center/energy-harvesting.php>

회로는 에너지 수확소자의 출력 특성에 따라 최대 전력을 전달할 수 있도록 정류, 임피던스 매칭 등의 역할을 하며, 또한 낮은 수확 전력으로 최적 동작이 가능하도록 부하 소자 구동을 제어하기도 한다. 그림 1은 압전 소자를 이용한 에너지 수확시스템의 개념도로서, 수확된 에너지는 슈퍼커패시터 등의 저장소자에 저장되며 센서 등 부하의 구동이 필요할 때 충분한 에너지가 저장된 경우 스위치를 제어하여 에너지를 부하로 전송한다 [2].

## 2. 에너지 수확 기술

### (1) 운동에너지 수확 기술

운동 에너지 수확기술의 구현은 크게 정전기적 방법, 전자기적 방법, 압전효과, 그리고 마찰전기를 이용한 방법이 있으며 각각에 대한 활발한 연구가 현재 이루어지고 있다. 정전기적인 방법은 유전체를 사이에 둔 두 개의 전도체들의 상대적인 움직임에 의해서 변화하는 정전용량을 이용하여 에너지를 수확하는 기술이며, 전자기적인 방법은 자기장 내에서의 코일의 상대적인 움직임을 이용하여 유도전류를 발생시켜 이를 에너지원으로 사용한다. 압전방식은 주어진 진동 또는 힘에 대한 압전물질(Piezoelectric material)의 상대적인 변형을 이용하는데, 외부에서 전달되는 기계적인 응력에 의한 압전체의 구조적인 변형은 압전체 내의 전하분포를 변화시키게 되며, 따라서 압전물질의 두 전극사이에 기전력을 유도하게 된다. 그림 2는 압전 세라믹 물질인 PZT를 이용한 에너지 수확소자

의 개념도 및 Spring-mass system을 이용한 기계적 시스템의 모델로서, 캔틸레버의 진동에 의해 PZT 박막에서 전하가 생성되게 되며, 이 때, 다음과 같은 식으로 이러한 출력전력을 구할 수 있다 [3].

$$P = \frac{m \zeta Y_0^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3 \omega^3}{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

이 때 m은 질량체의 무게, ζ는 감쇠비, ω<sub>n</sub>은 공진 각진동수 (rad/s), Y<sub>0</sub>는 진동의 진폭, ω는 진동의 각진동수(rad/s) 이다. 생성되는 전력은 진동 주파수 ω에 직접적인 영향을 받게 되며, 진동주파수가 구조의 고유주파수 ω<sub>n</sub>과 일치하지 않는 경우 출력과위가 급격히 감소함을 알 수 있다. 따라서 일반적인 진동 에너지 수확 소자의 경우 외부 진동주파수와 소자의 고유 진동 주파수를 일치시키기 위한 추가적인 구조 또는 제어 모듈이 필요하며 최근 이에 대한 연구가 진행되고 있다.

마찰전기 에너지 수확은 정전력에 의한 전하 유도 현상을 이용한다는 점에서 정전 방식의 에너지 수확 기술과 유사하나, 두 물체간의 직접적인 접촉에 의한 물질간의 전하 이동을 이용한다는 점에서 차이점이 있다. 일반적으로 전기음성도 차이가 큰 두 물질간의 마찰을 이용하며 마찰 표면적 증대

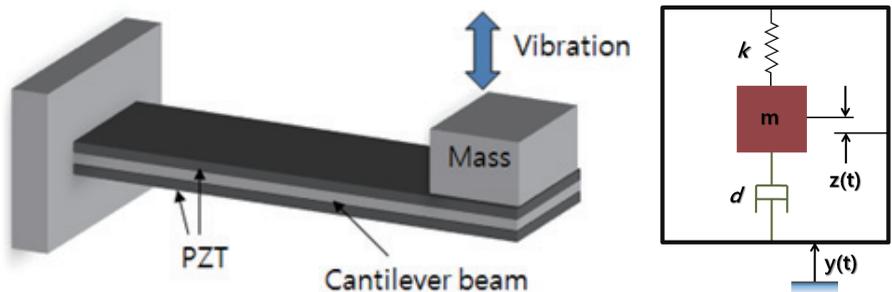


그림 2. PZT를 이용한 압전 에너지 수확소자의 개념도 및 Spring-mass-damper system을 이용한 기계적 모델

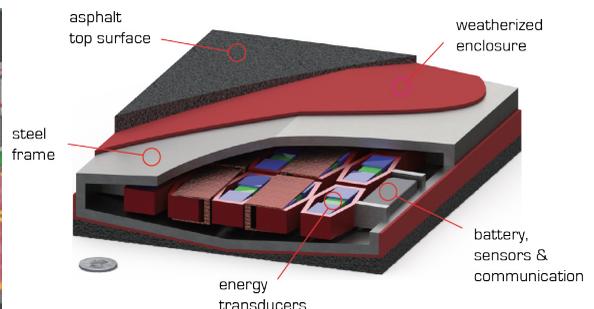
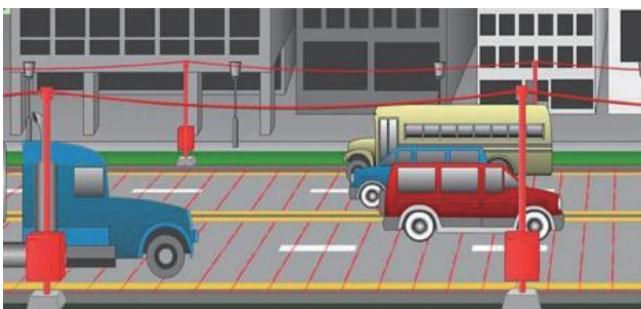


그림 3. 압전소자 도로 개념도. (출처: Innowatech (왼쪽), <http://www.pyro-e.com/> (오른쪽))

를 위하여 나노 구조의 표면을 사용하는 triboelectric nano generator (TENG)에 대한 연구가 진행되고 있다 [4].

운동 에너지 수확소자는 웨어러블 전기전자 기기의 에너지원, 자동차 등 수송 수단의 진동 에너지 수확, 그리고 차량 통행에 따른 도로 및 교량의 압력 또는 진동을 수확하는 등에 활용될 수 있다. 그림 3은 압전소자를 도로에 매설해 차량 통행으로 발생하는 압력 또는 진동 에너지를 전력으로 전환·저장하고 이를 독립 전력원으로 활용하는 압전소자 도로의 개념도이다 [5]. 2010년 이스라엘 업체 이노와텍은 압전소자 도로의 상용화를 시도하였으며, 1km에 걸쳐 압전소자를 설치할 경우 약 400kWh의 전력 생산을 예측하였으며, 미국의 경우 2014년 작성된 전문가 보고서 이후 2017년 실제 환경에 적용하여 타당성을 확인하는 프로젝트를 진행중이다. 또한 국내에서도 2016년 한양대학교에서 96개의 압전소자를 연결한 구조를 사용하여, 차량속도 10 km/h에서 최대 출력 280 mW를 수확할 수 있음을 보고하였다 [6].

### (2) 광에너지 수확 기술

태양전지로 대표되는 광에너지 수확은 현재 대규모 상용화가 이루어진 기술로서 현재로서는 다른 에너지 수확 기술에 비해 안정적으로 높은 출력을 기대할 수 있다. 태양광 시스템은 반도체의 광기전력 (PV) 효과를 이용하는데, 표 1에서 보듯이 실내보다는 실외 환경에 적합한 방식이다. 가시광선이 PV 효과에 의해 바로 전류로 변환되므로 추가적인 전류 구동회로가 필요 없다.

태양전지와 같은 광에너지 수확소자는 IoT센서, 가로등, 위성용 센서, 웨어러블 디바이스 등 실외환경에서 장시간 노출되는 제품에 적용될 수 있다. 다만, 실내나 어두운 환경에서 사용이 불가능하다는 단점이 있으며, 최근 다른 물리적 에너지 수확소자와 광에너지 수확소자를 결합하는 연구도 발표되었다. 그림 4는 미국 Georgia Institute of Technology에서 발표한 하이브리드 에너지 수확소자로서, 태양광 및 정전방식의 에너지 수확소자를 결합하여 비가 오는 날씨에도 에너지를 수확할 수 있도록 하였다 [7].

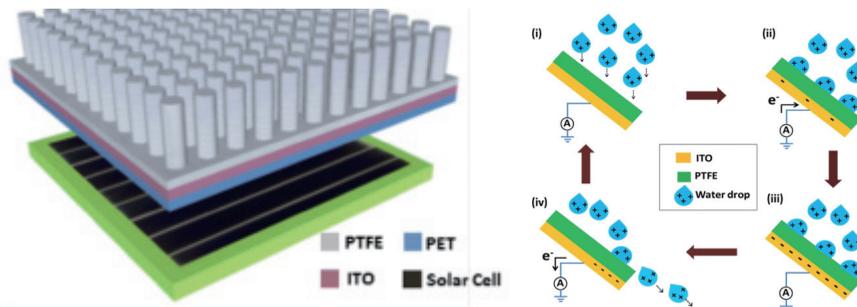


그림 4. 태양광 및 빗물에 의한 정전에너지를 수확할 수 있는 하이브리드 에너지 수확 소자 (출처: 참고문헌 [7])

### (3) 열에너지 수확 기술

재료에 인가된 전위차에 의해 온도차이가 발생하는 효과를 Peltier 효과라고 하며, 반대로 양단의 온도 차이가 전위차를 발생하는 현상을 Seebeck 효과라고 한다. 열에너지 수확소자는 Seebeck효과를 이용하는 기술로서, 에너지 변환이 단일 재료에서 얻어지고 부산물이 발생하지 않는 친환경 기술이며, 또한 활용되지 못하고 버려지는 폐열을 회수한다는 장점이 있다.

상용 열전발전기는 약 10-100°C 의 온도차이가 필요하며 [8], 카이스트에서는 피부 부착형 열전에너지 수확소자를 개발하여 약 15°C 온도 차이에서 3 μW의 에너지 출력을 발표하였다 [9].

### (4) RF 에너지 수확 기술

Radio frequency 신호를 전기량으로 변환하는 기술을 RF 에너지 수확기술이라고 한다. 무선 충전 시스템 또는 무선전력 전송시스템과 같이 특별하게 설계된 RF 신호원 뿐만 아니라 TV 송신탑 신호, 인터넷 무선 라우터 등에서 발생하는 미약한 RF 신호들도 전기에너지원으로 활용될 수 있다. 또한 송배전선에서 발생하는 전자파 또한 에너지원으로 활용될 수 있는데, 그림 6과 같이 미국 캘리포니아에서 실제 송전선에 설치된 무선 전송선 감지 센서가 대표적인 예이다.



그림 5. 피부 부착형 열에너지 수확소자 (출처: 참고문헌 [9])



그림 6. 미국 캘리포니아에 설치된 무선 송전선 감지 센서 (출처: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_powerline\\_sensor#/media/File:WirelessPowerlineSensors3.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_powerline_sensor#/media/File:WirelessPowerlineSensors3.jpg))

### 3. 결 론

본 기고에서는 에너지 수확기술에 대한 기본적인 이론과 최근 연구 동향에 대해 소개하였다. 에너지 수확기술은 고밀도 배터리 기술과 함께 유선 전력 공급이 어려운 IoT, 센서 네트워크, 전기자동차, 웨어러블 소자 등의 구동에 필요한 에너지를 공급하기 위한 후보 기술로 연구가 진행되고 있다. 많은 연구가 진행되었음에도 여전히 에너지 수확소자의 출력이 실제 활용 소자에서 필요한 전력대비 상당히 낮은 문제점이 있으며, 최근에는 나노기술 등을 이용한 에너지 밀도 증대 및 효율 증대에 대한 연구가 진행되고 있다. 

#### 참고문헌

- [1] <http://www.cymbet.com/design-center/energy-harvesting.php>
- [2] Michele Kinman, What is Energy Harvesting and How Does it Work?, Energy Harvesting Forum (2010), <https://www.wirelessdesignmag.com/article/2010/04/what-energy-harvesting-and-how-does-it-work>
- [3] C. B. Williams, R. B. Yates, Analysis of a micro-electric generator for Microsystems, The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX, Stockholm, Sweden (1995) pp.369-372.
- [4] F.-R. Fan, L. Lin, G. Zhu, W. Wu, R. Zhang, Z.L. Wang, Transparent triboelectric nanogenerators and self-powered pressure sensors based on micropatterned plastic  $\square$ lms. Nano Lett. 12, 3109 - 3114 (2012)
- [5] DNV KEMA, "Assesment of piezoelectric materials for roadway energy harvesting", Energy research and development division final project report (2014)
- [6] Chan Ho Yang 외, "Development of impact-based piezoelectric road energy harvester for practical application", 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)
- [7] Li Zheng, Zong-Hong Lin, Gang Cheng, Wenzhuo Wu, Xiaonan Wen, Sangmin Lee, Zhong Lin Wang, "Silicon-based hybrid cell for harvesting solar energy and raindrop electrostatic energy", Nano Energy (2014) 9, 291 - 300
- [8] V. C. Gungor, P. H. Gerhard, "Industrial Wireless Sensor Networks: Applications, Protocols, and Standards", Boca Raton, FL: CRC Press, pp. 127, 2013.
- [9] Sun Jin Kim, Ju Hyung We and Byung Jin Cho, "A wearable thermoelectric generator fabricated on a glass fabric", Energy Environ. Sci., (2014) 7, 1959-1965.