

진동형 에너지 하베스터 기술동향

지창현 | 이화여자대학교 전자전기공학과



1. 서론

에너지

하베스팅(energy harvesting)은 전기기기의 전원부에 일반적으로 활용되고 있는 에너지원인 화석 연료나 전기 에너지 등을 직접 공급하지 않고, 외부 환경에 존재하는 열, 바람, 빛, 진동 등으로부터 에너지를 수집하여 전기 에너지로 변환하여 활용하는 기술이다. 주변 환경으로부터 에너지를 수집하는 에너지 하베스팅의 개념은 바람이나 강물의 흐름을 활용한 풍차, 물레방아 등이 인류 역사를 통하여 지속적으로 활용되어 왔음을 고려할 때 전자기

기가 등장하기 이전부터 존재하여 왔다고 볼 수 있다. 전자기기의 경우 외부 전원을 필요로 하지 않는 광석 라디오(crystal radio)가 이미 20세기 초반에 개발되었고, 1차 전지 대신 솔라셀(solar cell)을 이용한 계산기가 1970년대 후반에 출시되었으나, 이러한 기술의 개발이 직접적으로 에너지 하베스팅이라는 개념의 촉발로 이어지지는 않았고, 이후의 에너지 하베스팅 기술에 대한 연구 또한 아주 활발하였던 것은 아니다. 최근 에너지 하베스팅 기술에 대한 관심이 증가하고 있는 것은 센서 및 관련 기술 발달에 따른 무선 센서 네트워크(wireless sensor network)에 대한 관심도의 증가, 저전력 회로 기술과 맞물린 자가발전 시스템의 활용도 증가, 모바일 기기 수요 증

*주변 환경으로부터
에너지를 수집하는
에너지 하베스팅*

대에 따른 배터리 사용시간 연장의 필요성 증가, 지구 온난화와 화석 연료의 고갈에 따른 친환경 에너지원의 필요성 대두 등에 힘입은 바가 크다. 에너지 하베스팅 기술을 활용하여 발전소 수준의 높은 출력을 생성하고자 하는 연구 방향도 존재하나 본 기고에서는 소형 전자기에 적용하는 것을 목표로 하는 소형 에너지 하베스터로 범위를 한정하고, 그 중에서도 외부 환경의 기계적인 진동을 에너지원으로 활용하는 진동형 에너지 하베스터 기술의 발전 방향을 살펴보고자 한다.

기존의 전자기기들은 대부분 외부 전원이나 1, 2차 전지로부터 전력을 공급받는 반면 에너지 하베스팅 기술을 적용할 경우 기기 자체적으로 전력을 생성하거나, 생성한 전기 에너지를 저장하여 기존의 전력원을 대체하거나 보조하는 역할을 수행하도록 할 수 있다. 따라서 유선 전력 공급이나 1차 전지의 교체, 2차 전지의 충전이 어려운 환경에서 작동되거나, 2차 전지의 지속적인 충전이 요구되는 기기의 경우 뚜렷한 장점을 가질 수 있다. 자동차의 타이어와 림 사이에 장착되어 타이어의 압력을 측정하는 TPMS(tire pressure monitoring system), 뇌질환의 치료를 위한 뇌 심부 자극술(deep brain stimulation)에 사용되는 인체 삽입형 자극기, 교량 등의 구조 건전도 모니터링(structural health monitoring)에 사용되는 무선 센서 시스템 등이 직접적인 외부 전원 공급이나 2차 전지의 충전이 어려운 대표적인 사례이다. 최근에는

1차 전지와 저전력 회로 기술의 발달로 1차 전지를 채용하면서도 10년 이상의 수명을 담보할 수 있는 기술이 개발되고 있으나, 전지의 교체가 필요 없는 수준까지는 이르지 못하고 있는 실정이다. 에너지 하베스팅 기술의 대두와 함께 상업적으로 가장 큰 성공을 거두고 있는 휴대용 전자기기에 사용되는 2차 전지의 수명을 증가시킬 수 있는 기술에 대한 관심이 증가하고 있으나 현재 개발된 에너지 하베스팅 기술을 통하여 휴대용 전자기기 자체의 부피 증가나 상당한 크기의 보조기기의 도움 없이 이러한 목적을 달성할 수 있는 하베스팅 기술은 개발되지 않고 있다. 이는 최근 스마트폰에 사용되는 2차 전지의 용량이 3,000mAh에 이르는 반면 수 cm³ 크기의 에너지 하베스터로 달성할 수 있는 최대 출력밀도가 수백 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ 정도임을 고려하면 당연한 결과이며, 초소형 에너지 하베스터 기술이 지향할 바를 명확히 해주는 사례이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 Boisseau et al.은 주변 환경에 존재하는 에너지원 중 기계적인 진동의 에너지 변환 전 전력 밀도를 수백 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ 이하로 평가하고 있는데 [1], 다소 다른 견해가 존재하기는 하나 일반적으로 저주파수 진동으로부터 에너지 하베스터로 생성할 수 있는 전력 밀도는 대략 $500\mu\text{W}/\text{cm}^3$ 이하로 평가된다. 따라서 에너지 하베스터 자체가 갖는 혁신성과 무관하게 하베

스터를 실제로 적용할 수 있는 응용 분야는 상당히 제한적이며, 실제 적용에는 그림 2의 무선 센서 네트워크 기기의 사례에서 보는 바와 같이 전력 관리 회로 및 저전력 구동 회로의 적용이 필수적이다.

2. 진동형 에너지 하베스팅 기술

주변 환경의 진동으로부터 에너지를 생성하는 진동형 에너지 하베스팅 기술에 대한 관심은 꽤 오래 전부터 있어왔다. 오토매틱 시계(automatic watch)에 사용되는 무브먼트(self-winding watch movement)가 대표적인 예로, 이 경우 착용자의 움직임으로부터 유도된 편심 회전체(eccentric weight) 또는 로터(rotor)의 회전 운동으로 메인스프링(mainspring)을 감아 에너지를 저장하는 방식이 사용된다. 이러한 편심 회전체의 회전 운동을 이용한 에너지 변환 방식은 수 세기에 걸쳐 활용되어 온 상업적인 성공을 거둔 작동방식이라는 장점에 관심을 끌기도 하였고, 이에 기반한 에너지 하베스팅 기술이 소개되기도 하였으나, 높은 출력을 기대할 수 있는 에너지 변환 방식은 아니다.

최근 발전된 MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems)

기술과 종래의 기계 가공 공정(conventional machining process)을 이용하여 마이크로 또는 메조스케일(mesoscale)의 에너지 하베스터를 개발하려는 다양한 노력이 이어지고 있는데, 진동형 에너지 하베스터에 일반적으로 적용되는 에너지 변환 방식은 그림 3과 같다. 진동형 에너지 하베스터의 작동 원리는 압전(piezoelectric) [2, 4, 7-13], 전자력(electromagnetic) [3, 5, 6, 14-16], 정전력(electrostatic) [17-19] 방식이 가장 일반적이며, 이들은 마이크로 센서 또는 액추에이터의 작동 원리에서 크게 벗어나지 않는다.

일반적으로 외부 진동에 따른 질량체(proof mass)의 움직임을 압전 방식의 경우 압전 물질에 가해지는 변형(strain)으로, 전자력 방식의 경우 코일을 쇠교하는 영구자석의 자속 변화로, 정전력 방식

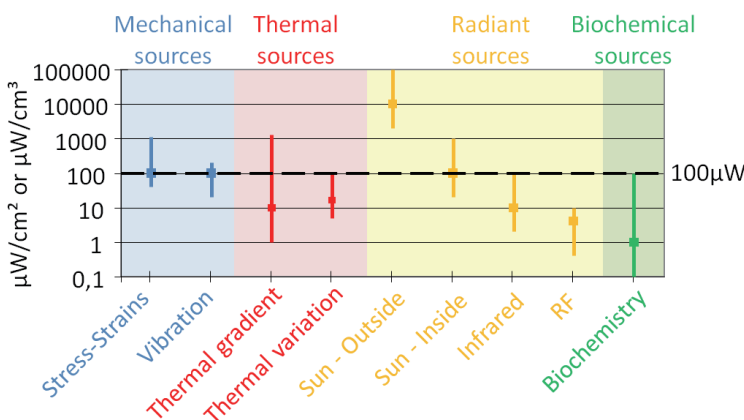


그림 1. 주변 환경 에너지원의 전력 밀도 [1]

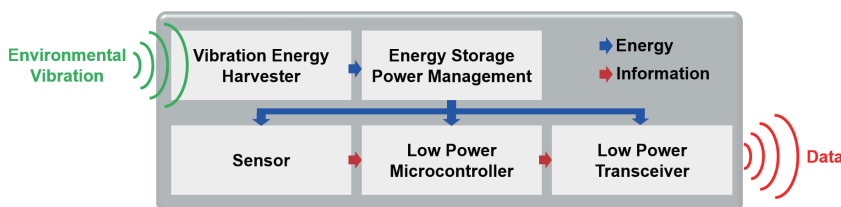


그림 2. 진동형 에너지 하베스터에 의해 작동되는 무선 센서 네트워크의 개념도

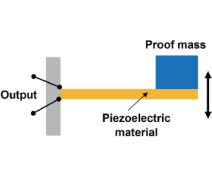
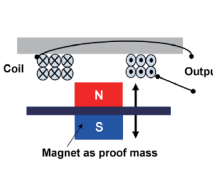
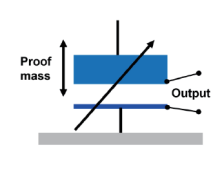
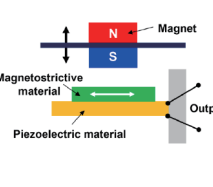
Piezoelectric 		Electromagnetic 	
Variation of strain in piezoelectric material Straightforward/simple mechanism, High output voltage Possible reliability issue		Variation of magnetic flux High output power Difficulty in miniaturization, Low output voltage	
Electrostatic 		Magnetolectric 	
Variation of capacitance High output voltage, Advantage in miniaturization Requirement of initial voltage source		Variation of strain in piezoelectric material and magnetic flux High output power, New transduction mechanism Difficulty in miniaturization, Low output voltage	

그림 3. 초소형 에너지 하베스터의 작동 원리

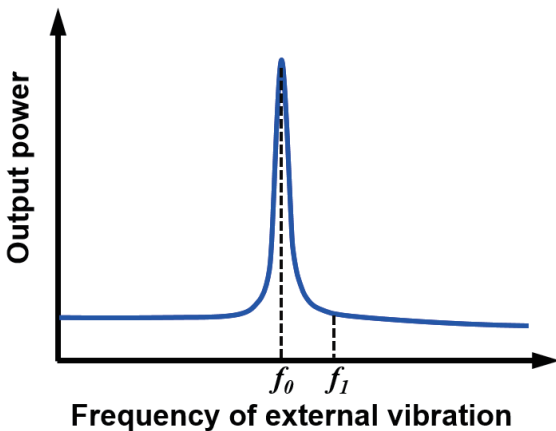


그림 4. 스프링-질량-댐퍼 기반 에너지 하베스터 출력의 주파수 특성

의 경우 커패시턴스 변화로 변환하여 전력을 생성하게 된다. 이 밖에도 자전기(magnetolectric) 방식 등 새로운 에너지 변환 방식이 제안되고 있으나, 기존 기술 대비 월등한 특성을 갖는 방식은 아니다. 이들 작동 방식은 각각 다양한 장점과 단점을 가지고 있어 시장을 선도할 수 있는 독보적인 기술이나 규격화 된 제작 공정은 개발되지 않고 있다. 초소형 에너지 하베스터의 제작에는 다양한 MEMS 공정과 기계 가공 공정이 사용되고 있는데, 가동부와 고정부 전극 사이의 간격이 작을수록 유리한 정전력 방식의 경우 MEMS 공정에 기반을 둔 소자가 주를 이루는 반면, 나머지 방식의 경우 출력 증대를 위하여 메조스케일 소자 또한 꾸준히 개발되고 있다. MEMS 공정을 이용하여 에너지 하베스터를 제작할 경우 일반적으로 질량체가 스프링 구조물에 의하여 지지되므로, 구동 특성의 주파수 의존

도가 높아지는 단점이 있다.

진동형 에너지 하베스터의 성능은 에너지원으로 활용되는 외부 진동의 특성에 의하여 크게 좌우된다. 통상적으로 하베스터 내부에서 진동하면서 전력을 생성하는 질량체는 스프링 구조물에 의하여 지지되는 경우가 많은데, 이 경우 질량체가 공진주파수 이외의 주파수로 진동할 때 출력이 급격히 감소하는 단점이 있다. 그림 4에서 보는 바와 같이 스프링-질량-댐퍼로 구성된 시스템은 공진주파수 (f_0)가 외부에서 인가된 진동의 주

파수(f_1)와 일치하지 않는 경우 급격히 출력이 저하된다. 외부 진동원이 지속적으로 일정한 주파수 대역의 진동을 발생시키고, 진동 주파수가 에너지 하베스터와 같은 초소형 기계 시스템의 공진 주파수로 설계하기에 적합한 경우를 제외하고는 이러한 시스템의 실용적 가치는 현저히 저하될 수밖에 없다. 수십 또는 수백 Hz로 진동하는 기계 장치의 외벽에 하베스터를 장착하는 경우 질량체의 공진을 손쉽게 활용할 수 있지만, 많은 경우 에너지원으로 활용하고자 하는 진동은 주파수가 낮고 진폭이 불규칙한 특성을 보인다. 인체로부터 유래한 진동이 대표적인 사례로, 10Hz 내외의 주파수, 매우 불규칙한 진폭과 주파수의 변화, 그리고 경우에 따라 매우 높아지는 진폭을 특징으로 한다. 초기의 초소형 에너지 하베스터 연구에서 다양한 전력 생성 방식을 제안하고, 그 적용 가능성을 검증하는데 주력한 반면 최근에는 스프링-질량-댐퍼 시스템 기반 에너지 하베스터의 한계를 극복하기 위하여 다양한 시도가 이루어지고 있다. 전력 변환 효율의 증대, 낮은 공진 주파수 구현, 작동 주파수 대역폭 증대 등을 위한 주파수 상향(frequency-up-conversion) [2-4], 바이스테이블(bistable) 또는 트라이스테이블(tristable) 응답 특성의 활용 [7, 8], 스프링이 없는 질량체의 활용과 충격 기반의 발전 방식 적용 [9-11, 20-22] 등이 대표적 사례이다.

그림 5와 표 1은 진동을 에너지원으로 활용하는 다양한 초소형 에너지 하베스터의 출력 특성을 분석한 결과이다. 초소형 에너지 하베스터 연구결과 중 일부를 분석한 것이므로 추

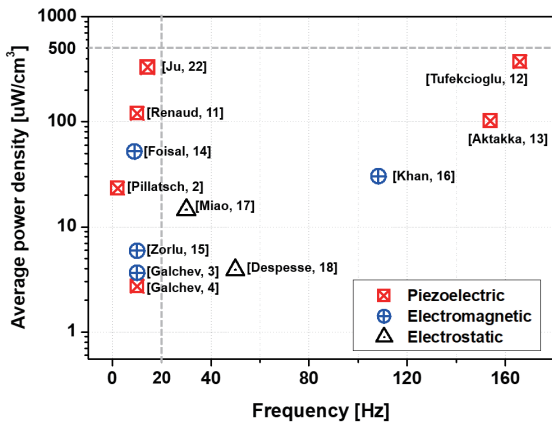


그림 5. 진동형 에너지 하베스터 평균 출력 밀도(average power density)의 주파수 특성 [2-4, 11-18, 22]

가적인 데이터의 포함 여부에 따라 분석 결과는 다소 달라질 수 있으나 개략적으로 몇 가지 경향성을 확인할 수 있는데, 우선 작동 주파수의 경우 20Hz 이하의 진동을 활용하 경우가 많음을 알 수 있다. 작동 원리로는 정전력 방식보다는 전자력과 압전 방식을 사용한 경우가 더 많았으며, 다양한 전력 생성 방식 중 뚜렷하게 우위를 나타낸 방식은 없으나, 작동 주파수가 40Hz를 넘는 영역에서는 주파수가 높을수록 높은 출력 밀도를 나타내었다. 출력 밀도의 경우 최대 수백 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ 정도로, 저주파수에서 구동되는 진동형 에너지 하베스터로는 $500\mu\text{W}/\text{cm}^3$ 정도의 출력 밀도 달성이 쉽지 않음을 알 수 있다. 상용화된 진동형 에너지 하베스터 제품 중에는 더 높은 출력 밀도를

갖는 제품들이 존재하나, 상대적으로 작동 주파수 대역이 높고 소자의 크기가 크다.

기존 연구 결과에서 제시된 수준의 출력 밀도는 많은 경우 수 cm^3 크기의 소자를 이용하여 달성한 것으로, 소자의 크기가 더 작아질 경우 제작 공정과 재료의 한계로 인하여 낮은 입력 주파수에서 출력 밀도를 유지하기가 더욱 어려워진다. 따라서 현재의 진동형 에너지 하베스터 기술 수준은 기존의 소형 1, 2차 전지와 유사한 수준의 크기로 보드 레벨 집적화 등을 통하여 센서 네트워크에 적용될 수 있는 정도로 판단된다. 현 수준에서 출력 밀도와 크기, 주파수 특성 등을 모두 개선할 수 있다면 수십 mAh 정도 용량의 2차 전지를 채용한 웨어러블 기기 등에 제한적으로 적용하는 것이 가능할 것이다.

20Hz 이하의 저주파수 진동을 에너지원으로 활용하는 경우 출력 특성은 상대적으로 낮아서 최대 $100\mu\text{W}/\text{cm}^3$ 전후의 출력 밀도를 나타내고 있으나, Ju et al.은 스프링이 없는 질량체의 활용과 충격 기반의 압전 방식을 적용하여 18Hz에서 $309\mu\text{W}/\text{cm}^3$ 의 출력 밀도를 달성하였다 [22]. 그림 6에서 보는 바와 같이 개발된 하베스터는 질량체가 압전 물질과 충돌하여 전압을 발생시키는 종례의 충격 기반 에너지 하베스터의 발전 방식과 달리 질량체가 하우징(housing)과 충돌시 발생하는 진동을 압전체에 전달하여 전력을 생성한다. 따라서 충격에 의한 압전체의 손실을 방지하여 소자의 수명을 현저히 증가시킬 수 있고, 진동이 압전체에 전달되는 연결부 설계의 최적화

표 1. 진동형 에너지 하베스터의 출력 특성 [2-4, 11-18, 22]

Reference	Year	Power Generation Mechanism	Frequency at Maximum Power (Hz)	Acceleration at Maximum Power (g)	Power Density ($\mu\text{W}/\text{cm}^3$)	Power Density/Acceleration ($\mu\text{W}/\text{cm}^3/\text{g}$)
[2]	2013	Piezoelectric	2	2	23.2	11.6
[3]	2011	Electromagnetic	10	1	3.6	3.6
[4]	2012	Piezoelectric	10	1	2.7	2.7
[11]	2009	Piezoelectric	10	2	120.0	60.0
[12]	2014	Piezoelectric	166	2	371.6	185.8
[13]	2011	Piezoelectric	154	1.5	101.7	67.8
[14]	2012	Electromagnetic	9	0.5	52.0	104.0
[15]	2013	Electromagnetic	10	1	5.9	5.9
[16]	2014	Electromagnetic	108.4	3	30.2	10.1
[17]	2006	Electrostatic	30	1	14.5	14.5
[18]	2005	Electrostatic	50	0.88	3.9	4.4
[22]	2018	Piezoelectric	18	3	309.0	103.0

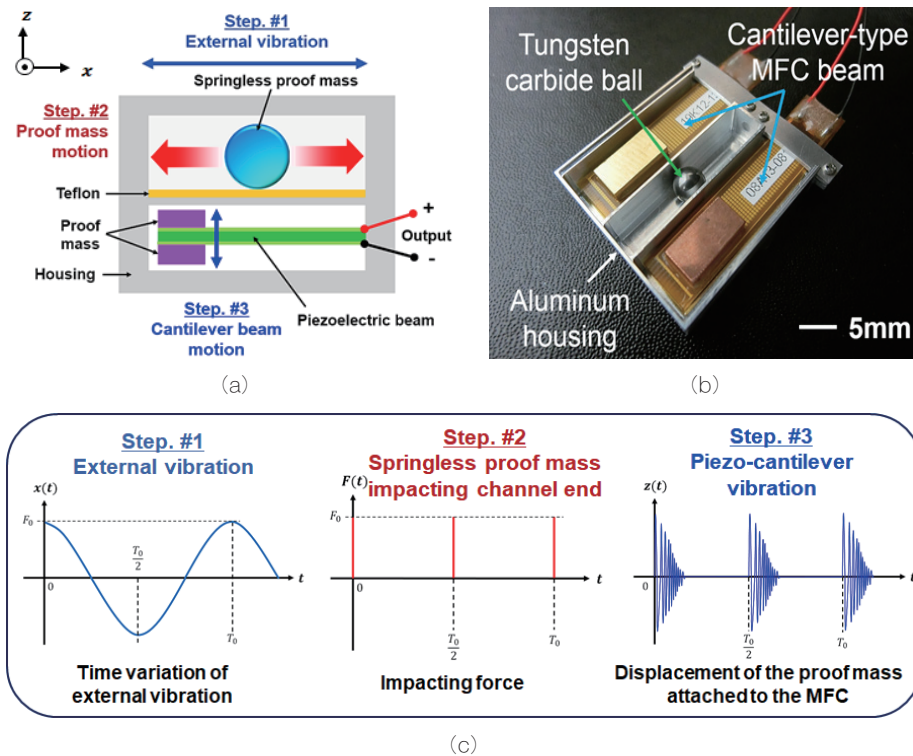


그림 6. 충격 기반 압전 방식 진동형 에너지 하베스터 [22]: (a) 작동 원리를 나타내는 개략도, (b) 두 개의 압전체와 하나의 질량체를 사용한 하베스터의 일례, (c) 시간에 따른 에너지 변환 과정


를 통하여 출력을 증대시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 이러한 발전 방식은 그림 6(c)에서 보는 바와 같이 외부 진동 주파수가 매우 낮은 경우에도 압전 캔틸레버가 이와 무관한 고유의 공진 주파수로 진동하게 되므로 주파수 상향 효과를 이용하여 출력을 증대시킨 하베스터의 일례로 볼 수 있다.

에너지 하베스터 연구 초기 단계부터 MEMS 공정을 이용한 초소형 에너지 하베스터의 제작과 구동 회로와의 다양한 형태의 집적 가능성에 대한 연구가 이루어져 왔다. 최근 IoT(internet of things) 기술의 발전에 따라 무선 센서 노드(wireless sensor node) 및 무선 센서 네트워크에 대한 관심 또한 증가하고 있으며, 향후 전 세계적으로 사용되는 센서 소자의 숫자가 수조(billion) 개에 달할 것이라는 전망 또한 나오고 있다. 에너지 하베스터 기술이 이러한 센서 기술 발전의 한 축을 담당할 것으로 기대되고 있는데, 이는 향후 지속적인 에너지 하베스팅 기술의 진보를 통한 초소형이면서도 높은 출력 밀도와 장기적인 신뢰성(long-term reliability)을 담보할 수 있는 하베스터 소자 개발에 대한 기대와 최소 선폭의 감소와 더불어 지속적으로 감소하고 있는 트랜지스터 소모 전력, 그

리고 초저전력으로 구동되는 전력 관리 회로의 개발 등이 맞물린 결과로 보인다.

3. 결 론

본 기고문에서는 환경 진동을 에너지원으로 활용하는 초소형 에너지 하베스터 기술의 개요와 발전 방향에 대하여 살펴보았다. 지금까지의 진동형 에너지 하베스터에 대한 연구가 새로운 에너지 변환 방식의 개발, 출력과 주파수 특성의 개선, MEMS 공정을 이용한 초소형 하베스터 소자 제작 등에 초점이 맞춰져 왔다면, 향후로는 전력 관리 회로와의 집적을 통한 상업

적인 적용 가능성 탐색, 상용화 가능한 수준으로의 성능 향상, 응용 분야에 맞는 시스템의 개발 등에 대한 연구 노력이 필요하다. 에너지 하베스터 기술의 성공적인 상용화를 위해서는 하베스터 연구 초기의 막연한 기대에서 벗어나 하베스터 소자의 특성과 성능의 한계를 명확하게 인지하고, 최적의 결과를 도출할 수 있는 응용 분야와 작동 환경에 대하여 심도있게 분석할 필요가 있다. 또한 진동형 에너지 하베스터의 상업적 활용을 위해서는 응용 분야에 맞는 저전력 구동회로와 하베스터로부터 생성된 전력을 저장 및 공급할 수 있는 전력 관리 회로의 개발이 수반되어야 한다. 

참고문헌

[1] S. Boisseau, G. Despesse and B. Ahmed Seddik, "Electrostatic conversion for vibration energy harvesting", Small-Scale Energy Harvesting, 2012
 [2] P. Pillatsch, E. M. Yeatman and A. S. Holmes, "A piezoelectric frequency up-converting energy

- harvester with rotating proof mass for human body applications”, *Sens Actuators, A* 206, 2014
- [3] T. Galchev, H. Kim and K. Najafi, “Micro power generator for harvesting low-frequency and nonperiodic vibrations”, *J Microelectromech Syst* 20, 2011
- [4] T. Galchev, E. E. Aktakka and K. Najafi, “A piezoelectric parametric frequency increased generator for harvesting low-frequency vibrations”, *J Microelectromech Syst* 21, 2012
- [5] Z. Zhang, X. Zhang, Y. Rasim, C. Wang, B. Du and Y. Yuan, “Design, modeling and practical tests on a high-voltage kinetic energy harvesting (EH) system for a renewable road tunnel based on linear alternators”, *Appl Energy* 164, 2016
- [6] X. Zhang, H. Pan, L. Qi, Z. Zhang, Y. Yuan and Y. Lui, “A renewable energy harvesting system using a mechanical vibration rectifier (MVR) for railroads”, *Appl Energy* 204, 2017
- [7] H. Vocca, I. Neri, F. Travasso and L. Gammaitoni, “Kinetic energy harvesting with bistable oscillators”, *Appl Energy* 97, 2012
- [8] S. Zhou, J. Cao, D. J. Inman, J. Lin, S. Liu and Z. Wang, “Broadband tristable energy harvester: modeling and experiment verification”, *Appl Energy* 133, 2014
- [9] L. Zhao and Y. Yang, “An impact-based broadband aeroelastic energy harvester for concurrent wind and base vibration energy harvesting”, *Appl Energy* 212, 2018
- [10] L. Gu and C. Livmore, “Impact-driven, frequency up-converting coupled vibration energy harvesting device for low frequency operation”, *Smart Mater Struct* 20, 2011
- [11] M. Renaud, P. Fiorini, R. Van Schaijk and C. Van Hoof, “Harvesting energy from the motion of human limbs: the design and analysis of an impact-based piezoelectric generator”, *Smart Mater Struct* 21, 2009
- [12] E. Tufekcioglu and A. Dogan, “A flextensional piezo-composite structure for energy harvesting applications”, *Sens Actuators, A* 216, 2014
- [13] E. E. Aktakka, R. L. Peterson, K. Najafi, “Thinned-PZT on SOI process and design optimization for piezoelectric inertial energy harvesting”, *Transducers* 2011, 2011
- [14] A. R. Md Foisal, C. Hong and G.-S. Chung, “Multi-frequency electromagnetic energy harvester using a magnetic spring cantilever”, *Sens Actuators, A* 182, 2012
- [15] O. Zorlu and H. Kulah, “A MEMS-based energy harvester for generating energy from non-resonant environment vibrations”, *Sens Actuators, A* 202, 2013
- [16] F. Khan, F. Sassani and B. Stoeber, “Nonlinear behavior of membrane type electromagnetic energy harvester under harmonic and random vibrations”, *J Microsyst Technol* 20, 2014
- [17] P. Miao, P. D. Mitcheson, A. S. Holmes, E. M. Yeatman, T. C. Green and B. H. Stark, “MEMS inertial power generators for biomedical applications”, *J Microsyst Technol* 12, 2006
- [18] G. Despesse, T. Jager, C. Jean-Jacques, J. M. Leger, A. Vassilev, S. Basrour, B. Charlot, “Fabrication and characterization of high damping electrostatic micro devices for vibration energy scavenging”, *Design, Test, Integration and Packaging of MEMS and MOEMS*, 2005
- [19] Y. Zhang, T. Wang, A. Luo, Y. Hu, X. Li and F. Wang, “Micro electrostatic energy harvester with both broad bandwidth and high normalized power density”, *Appl Energy* 212, 2018
- [20] S. Ju, S. H. Chae, Y. Choi and C.-H. Ji, “Macro fiber composite-based low frequency vibration energy harvester”, *Sens Actuators, A* 226, 2015
- [21] S. Ju, S. H. Chae, Y. Choi, S. Lee, H. W. Lee and C.-H. Ji, “A low frequency vibration energy harvester using magnetolectric laminate composite”, *Smart Mater Struct* 22, 2013
- [22] S. Ju and C.-H. Ji, “Impact-based piezoelectric vibration energy harvester”, *Appl Energy* 214, 2018