



음향 에너지 수확

김재은

(대구가톨릭대학교 기계자동차공학부)

1. 머리말

에너지 수확(energy harvesting, energy scavenging)이란 자연 또는 인간 주변 생활 환경에서 언제 어디서나 일상으로 존재하지만 쓸모 없이 버려지는 다양한 형태의 에너지를 획득(capturing) 후 전기 에너지로 변환(transduction)하여 이를 축적(accumulating), 저장(storing) 및 전력 관리(power condition and management) 등의 일련의 과정을 통해 다양한 응용 분야에 지속적으로 전기를 공급(supply)하기 위한 관련 기술 분야로 정의된다.

풍차, 수차 등 인간이 자연으로부터 에너지를 얻고자 하는 노력은 수력, 조력, 풍력, 태양열 및 태양광 발전으로 이어졌다. 이들 중 일부는 수백 킬로와트(kW)에서 메가와트(MW)급의 전력 생산에 이르는 전력망을 구성하기도 한다. 이러한 친환경 에너지의 이용은 전 세계적인 화석 연료 자원의 고갈 염려에 따른 에너지 시장 불안과 온실 가스로 인한 지구 온난화에 따른 환경 문제에 대한 인식이 높아지면서 많은 관심을 받아오고 있다.

한편, 최근 비약적으로 진행되고 있는 유비쿼터스(ubiquitous) 지식 정보 사회의 전개로 인한 IT 환경의 변화는 휴대용/무선 전자 장비, 무선 센서 네트워크(WSN: wireless sensor networks)의

센서 노드 등의 전원으로 사용되어 왔던 기존 배터리를 대체/보완할 수 있는 전원 개발을 요구하게 되었다. 다양한 소비자의 요구에 부응하기 위해 꾸준히 증가되는 휴대용 IT기기 기능의 부가는 추가적인 에너지 소비를 요구한다. 또한, 원격지 무선 센서 노드에 사용되는 배터리는 주변 환경에 따른 예상치 못한 방전으로 인해 정보 전송의 신뢰성에도 문제가 발생할 여지가 있으며, 배터리 교체에 따른 노동 비용이 부과되어 시스템의 총 유지 비용을 증가시킨다. 그 어느 경우에도 전력 유지를 위한 배터리의 교환은 배터리 폐기로 인한 환경 오염 문제를 야기한다. 또한, 현재 각종 전자 제품에 사용되는 배터리는 그 사용 시간에 있어서 상당히 제한적이다. 따라서, 배터리의 용량을 고려하면 비용 및 제품 자체의 크기가 커지기 마련이다. 이러한 요구에 부응하고자 1980년대 후반부터 그 기술이 태동한 분야를 마이크로(micro) 에너지 수확이라고 한다. 마이크로 에너지 수확은 명칭이 의미하는 대로 단위 장치 당 발생 전력이 마이크로(μ W) 또는 밀리วัต(mW)급으로 매우 작으므로 기존 전력망(on-grid)에 대한 대체/보완의 성격보다는 유비쿼터스 전원(off-grid)으로서의 역할을 수행하기에 적합하다. 참고로 앞서 언급한, 발생 전력이 수십 킬로와트 이상인 경우는 매크로(macro) 에너지 수확으로 구분하기도 한다.

마이크로 에너지 수확 기술이 대상으로 하는 에너지 원은 다양하게 존재할 수 있으나 현실적으로 가용한 발생 전력 밀도(power density) 크기를 고려하면 일반적으로 태양광, 열 구배, RF(radio frequency) 전자기파 방사 및 운동(motion) 등이 있다⁽¹⁻³⁾. 특히, 기계류의 진동, 음향, 유체 유동 등에 의한 운동 에너지는 주변 어디에나 존재하기 쉽기 때문에 마이크로 에너지 수확에서 가장 활발히 연구되고 있는 분야이다. 그러나, 그 중에서 음향 에너지 수확에 대한 연구는 진동 에너지 수확에 대한 것보다 상대적으로 미약하다. 다행스럽게도 환경 소음에 대한 지속적인 관심의 증가와 음향 메타 물질(acoustic metamaterials) 등에 대한 최근의 연구 분야가 활발해 짐에 따라 다시금 조명을 받고 있는 듯하다. 이 글에서는 2000년 중반부터 연구되기 시작한 음향 에너지 수확⁽⁴⁾에 대해 살펴보고자 한다.

2. 음향 에너지 수확

진동 에너지 수확에서는 전기 출력이 외부 가진원의 가속도 크기(m/s^2)의 제곱에 비례하므로, 진동 에너지 원의 특성을 언급할 때 가속도의 크기를 고려한다. 반면, 음향 에너지 수확에서는 음압 수준(SPL: sound pressure level)에 의해 음향 에너지 원을 구분한다. 에너지 수확을 하기 위해 제일 먼저 수확 대상인 에너지 원의 크기를 고려하는 것은 당연하므로 먼저 우리 주변에 존재하는 여러 음향 에너지 원에 대해 그 음압 수준을 표 1에 나타내었다. 참고로, 사람들 간에 일반적인 회화를 할 경우 음압 수준은 약 60 dB이며,

120 dB가 되면 소리가 아닌 고통으로 느껴진다고 한다. 로켓 엔진의 경우는 190 dB를 넘어간다고 한다.

현재까지 보고된 음향 에너지 수확 장치는 진동에너지 수확에서도 일반적으로 많이 사용되는 에너지 변환 수단인 압전 또는 전자기 유도현상을 이용하되 그림 1에 보인 바와 같이 Helmholtz 공명기⁽⁵⁾ 및 1/4 파장관의 원리⁽⁶⁾를 이용한 구조가 대부분이다. 최근에는 공기와 임피던스가 다른 구조물의 주기적 배열을 이용한 포논 결정(phononic crystal 또는 음향에 한해 sonic crystal이라 부름) 또는 음향 메타 구조를 이용한 사례도 보고되고 있다. 그 동안의 음향 에너지 수

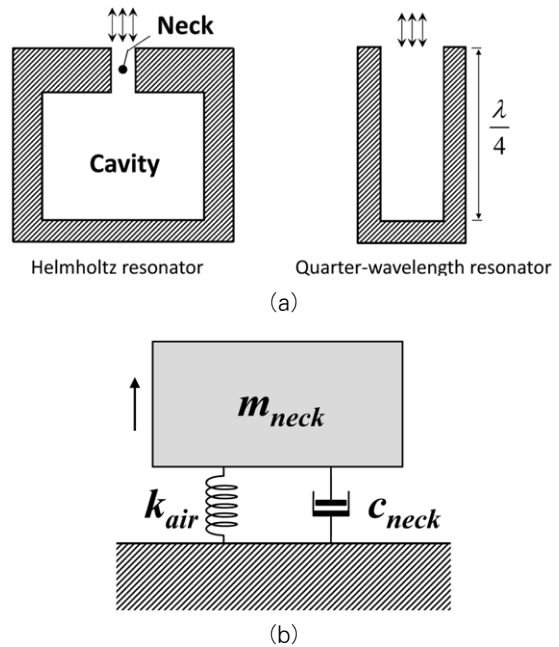


그림 1 (a) Helmholtz 공명기 및 1/4 파장관의 개략도, (b) 등가 질량-스프링-댐퍼 역학계

표 1 음향 에너지 원의 음압 수준*

음향 에너지 원	SPL (dB)	음향 에너지 원	SPL (dB)
Turbofan engines	150	Automobile surrounding	90
Car air conditioning system	71.9	Aircraft (military)	115
Inside airplane (Airbus A320)	86	Train moving with 200 km/h in a tunnel	140
Small power boats	150	Hair dryer	67
Glass industry	113	Gas turbine inlet	105

* 참고문헌⁽⁴⁾의 내용 일부를 발췌

확에 대한 연구 결과를 에너지 변환 수단(압전 또는 전자기 유도)별로 살펴보도록 하자.

2.1 전자기 유도 기반 음향 에너지 수확

진동 에너지 수확의 경우와는 달리 음향 에너지 수확을 위해 전자기 유도 현상을 이용한 경우는 많지가 않다. 현재까지 문헌상에 보고된 전자기 유도 기반의 음향 에너지 수확 장치는 Helmholtz 공명기 구조를 취하고 있다. 그림 2(a)에 나타낸 바와 같이 외부에서 유입된 음압은 Helmholtz 공명기 내부 공동에서 증가되고, 공동 바닥에 설치된 박막은 외부 압력과의 차이에 의해 진동하게 된다. 따라서, 박막에 부착된 영구 자석은 코일과의 상대 운동을 하게 되고 Faraday 전자기 유도 법칙에 의해 코일에서는 유도 기전력이 발생하게 된다.

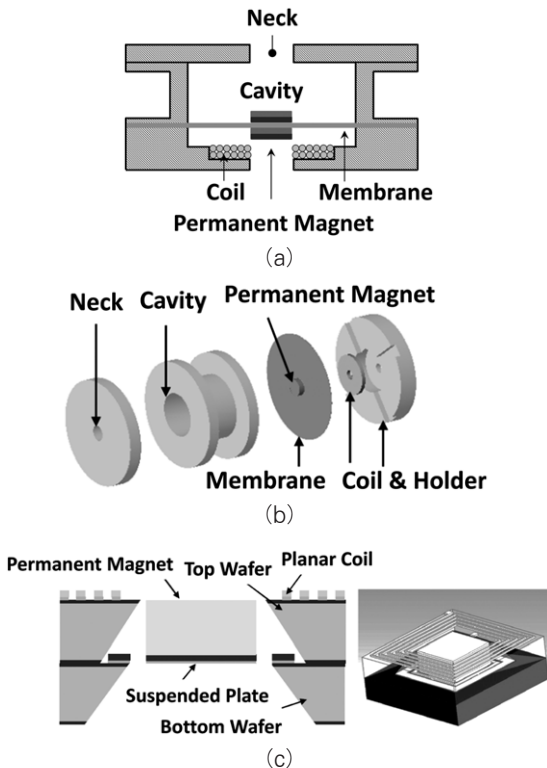


그림 2 전자기 유도 기반의 음향 에너지 수확 장치: (a) 음향 에너지 수확 원리를 나타내는 개략도, (b) 코일, 영구 자석을 사용한 Helmholtz 공명기 원리의 음향 에너지 수확 장치, (c) 평면 스프링을 사용한 MEMS 음향 에너지 수확 장치

Khan 등 (INMIC, 2013)은 이러한 구조에 기반하여 그림 2(b)에 나타낸 바와 같이 부피 약 14.7 cm^3 의 장치를 제작한 바 있다. 125 dB SPL, 143 Hz에서의 측정 결과로서, 최적 부하 저항에서 1.96 mW 의 전력을 얻을 수 있었다. 또한, Lai 등 (DTIP MEMS & MOEMS, 2008)은 니켈 재료의 평면형 스프링 및 코일을 이용하여 9 mm^3 의 MEMS 음향 에너지 수확 장치를 제작하였으며 [그림 2(c)], 470 Hz의 음파에 대해 개회로 전압 측정값은 0.24 mV 였다. 음압 수준 및 발생 전력 값에 대해서는 언급이 없었다.

2.2 압전 기반 음향 에너지 수확

압전 기반의 음향 에너지 수확에 대한 연구는 전자기 유도 기반의 연구보다 먼저 시작되었고, 현재 Helmholtz 공명기, 1/4 파장관의 구조 뿐만 아니라 포논 결정을 포함한 음향 메타 구조 기반의 연구 결과가 보고되고 있다.

Horowitz 등 (2006, J. Micromech. Microeng.)은 Helmholtz 공명기의 원리를 처음으로 음향 에너지 수확에 적용하여 그림 3(a)와 같은 장치를 제작한 바 있다. 공동 내부와 외부의 음압 차이에 의해 원형 박막이 진동하고 이에 부착된 압전 물질에 전기 에너지가 발생하게 된다. 측정 결과에 의하면 149 dB SPL, 13.57 kHz의 음압에 대해 부하 저항 $1 \text{ k}\Omega$ 에서 6 pW 의 전력이 발생하였다.

그림 3(b)에 나타낸 음향 에너지 수확 장치는 다공성 황동 판을 기준으로 2개의 Helmholtz 공명기 구조를 취하고 있다 (Peng, X., et al., 2013, Appl. Phys. Lett.). 2개의 공동이 존재하고 움직임이 가능한 피스톤에 의해 뒷부분 공동(back cavity)의 치수가 변하므로 3자유도가 된다. 100 dB SPL, 1.36 kHz의 음압에 대해 $7.5 \text{ k}\Omega$ 의 부하 저항에서 $7.5 \text{ }\mu\text{W}$ 의 전력이 발생하였다고 한다. 또한, 주파수 대역폭 또는 전력 발생량을 증가시키기 위해 공동 외부의 진동 부위에 부착된 압전 외팔보의 개수를 증가시켜 볼 수 있다 (Yang, A. et al., 2014, Rev. Sci. Instrum.). 그림 3(c)의 공명기에 부착된 압전 외팔보 2개는 끝 단의 영구 자석에

의해 상호 움직임이 연성되어 되어 있다. 100 dB SPL, 201 Hz의 음압에 대해 1.43 mW의 전력이 발생하였다고 한다. 이러한 구조는 진동 에너지 수확에서도 대역폭 및 발생 전력량 증가를 위해 많이 사용하고 있는 구조이기도 하다.

한편, 저주파수 대역의 음향 에너지 수확을 위

해 기다란 1/4 파장관 형태의 수확 장치가 개발되었다(Li, B. et al., 2013, Appl. Acoust.). 공진 주파수가 동일한 다수의 PVDF 압전 보가 일렬로 또는 지그재그로 배열되어 있으며, 측정에 의하면 지그재그 형태가 더 많은 전력을 발생한다고 한다. 전체 크기는 1,500 cm³이며, 110 dB SPL, 146 Hz의 음압에 대해 1 MΩ의 부하 저항에서 2.2 μW의 전력이 발생하였다.

앞서 언급한 바와 같이 Helmholtz 공명기 및 1/4 파장관 원리 외에도 음향 에너지 수확에 있어서도 음향 메타 물질의 특성을 이용하고자 하는 연구가 시도되고 있다. 일반적으로 임피던스가 다른 2개 이상의 물질을 (준)주기적으로 배열하면 격자 경계에서의 파동의 산란(scattering) 및 회절(diffraction)로 인해 그 전파 특성을 조절할 수 있다. 그러나, 이러한 포논 결정에서는 파장과 격자의 크기가 비슷해야 하기 때문에 주로 높은 주파수 대역에서 사용 가능하다. 반면 음향 메타 물질은 파장에 비해 매우 작은 주기적 구조로 구성되어 파동 전파가 균질화 물질에 기인한 굴절(refraction) 특성에 의해 결정된다(일반적으로 음향 메타 물질을 언급할 때 포논 결정을 포함하는 경우가 많다). 최근 이 분야에서도 메타 물질의 음의 물성 특성에 의한 파동의 국부화, 집속 및 유도 현상을 이용하여 음향 및 진동 에너지를 수확하려는 연구가 시도되고 있다⁷⁾.

그림 4(a)는 PMMA 재질의 원형 막대를 주기적으로 배열하되 1개를 제외하여 생긴 공동(이를 point defects(점 결함)라고 한다.)에 PVDF 압전 필름을 설치한 구조이다. 주기적 구조에서의 점 결함은 해당 부분에서 음파의 국부 공진 거동을 보이기 때문에 이 주파수와 PVDF 압전 필름의 고유 진동수를 일치시켜 음향 에너지를 수확한다. Wang 등(2010, Smart Mater. Struct.)은 이를 통해 4.2 kHz에서 45 dB SPL이라는 상대적으로 낮은 음압 수준에 대해 40 nW의 전력이 발생함을 보였다.

이 밖에도 Fabry-Perrot라는 공진 현상을 이용한 음향 에너지 수확 개념이 소개된 바 있다. 선행호

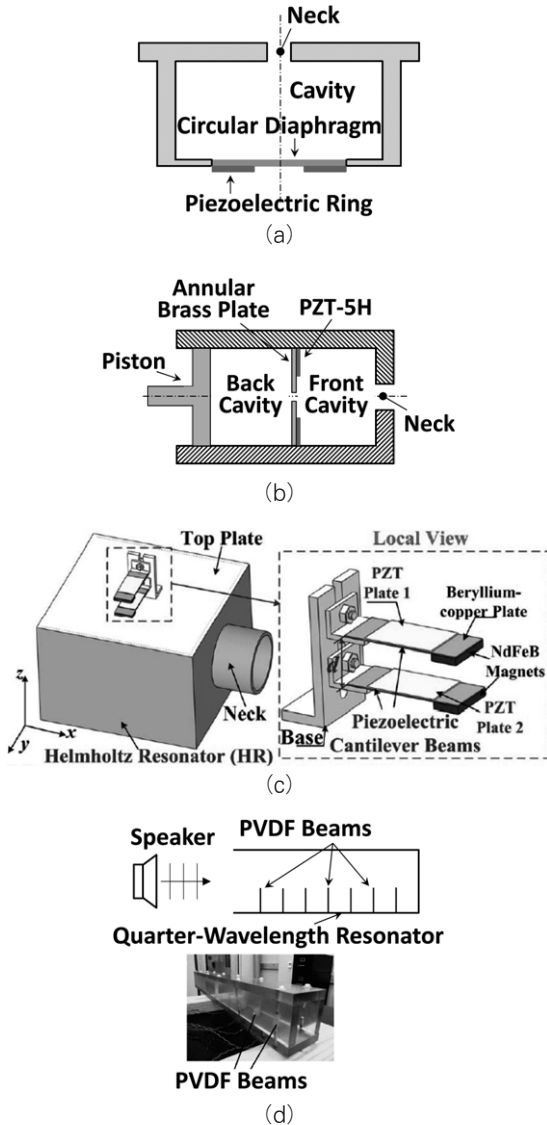


그림 3 Helmholtz 공명기 및 1/4파장관을 이용한 음향 에너지 수확 장치의 예: (a) Helmholtz 공명기 원리를 이용한 MEMS 압전 음향 에너지 수확 장치, (b) 주파수 대역폭 증가를 위한 2개의 Helmholtz 공명기 구조, (c) 끝단 자석으로 연성된 2개의 외팔보가 Helmholtz 공명기에 부착된 구조, (d) 내부에 압전 보 배열을 갖는 1/4 파장관 구조

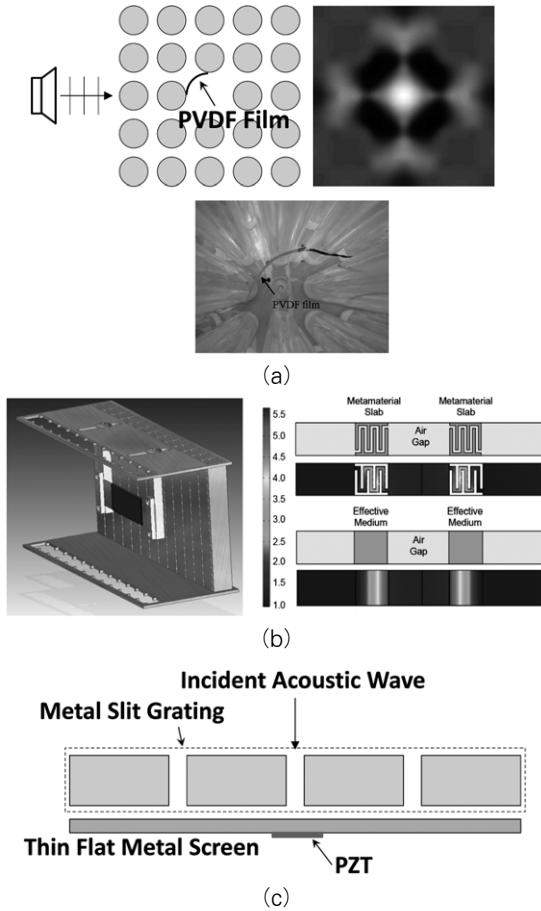


그림 4 음향 메타 구조를 이용한 음향 에너지 수확 장치의 예: (a) 음향 국부 공진을 이용한 포논 결정 구조, (b-c) Fabry-Perrot 공진 기반의 음향 에너지 수확 장치

등(2015, 추계소음진동 학술대회)은 최근의 연구에서 그림 4(b)에 나타난 구조물을 이용하여 100 dB SPL, 570 Hz의 음압에 대해 346 nW의 전력이 발생함을 보인 바 있다. 또한, Cui 등(2015, J. Appl. Phys.)은 그림 4(c)의 음향 에너지 수확 장치를 이용하여 100 dB SPL, 10.5 kHz의 음압에 대해 33 nW의 전력이 발생함을 보였다.

2.3 음향 에너지 수확 장치의 성능 비교

진동 에너지 수확 장치의 경우에서와 비슷하게 음향 에너지 수확에 있어서도 성능 평가를 위한 지수(figure of merit)의 표준이 확실하게 없다. 단순히 개회로 전압 및 최적 부하 저항에서의 최대

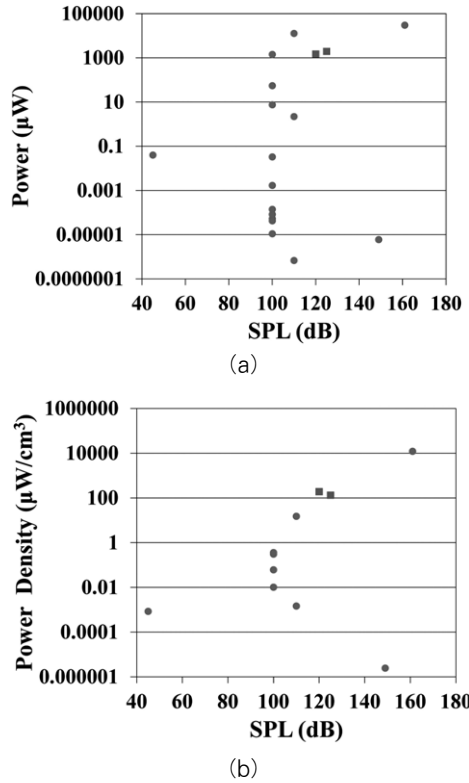


그림 5 문헌 상에 보고된 음향 에너지 수확 장치의 (a) 입력 음압 수준 대비 발생 전력 및 (b) 발생 전력 밀도 (■: 전자기 유도 기반, ●: 압전 기반)

전기 출력을 통해 음향 에너지 수확 성능을 평가할 수도 있지만, 경우에 따라 주파수(대역), 음압 수준 및 장치의 크기도 고려해야 할 것이다. 그림 5는 문헌 상의 음향 에너지 수확 장치에 대해 음압 수준 대비 최대 발생 전력(power)과 전력 밀도(power density)를 나타낸 것이다.

장치의 크기와 관계 없이 전자기 유도 기반의 음향 에너지 수확 장치의 발생 전력은 1.5 mW ~ 1.96 mW인 반면, 압전 음향 에너지 수확 장치의 발생 전력은 0.68 pW에서부터 30 mW까지 매우 다양하다. 작동 주파수 대역에 있어서는 전자기 유도 기반의 경우가 143 Hz ~ 470 Hz로 압전의 경우(146 Hz ~ 16.7 kHz) 보다 낮다. 이는 진동 구조물에 부착된 영구 자석으로 인해 집중 질량(proof mass)의 크기가 크기 때문이다. 따라서, 저주파수 대역에서는 전자기 유도 기반의 음향 에너지 수확 장치가 유리할 수 있으나, 소형의 장치를 구성

할 때는 압전 기반의 장치가 유리할 것이다. 저주파수 대역에 적합한 소형 압전 음향 에너지 수확 장치의 설계 문제는 진동 에너지 수확 분야에서와 같이 여전히 도전 과제이다. 그림 5에 나타낸 음향 에너지 수확 장치는 입력 음압 수준까지 고려한 발생 전력 밀도(power density/SPL)를 고려하면 $1.6 \times 10^{-8} \sim 75.4 \mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{dB}$ 의 범위를 갖는다.

일반적으로 음향 에너지 수확 장치의 발생 전력은 진동 에너지 수확 장치에 비해 상당히 적다. 그러나, 문헌 상에 보고된 음향 에너지 수확 장치는 대부분 각각의 구조에서 최적화 과정을 거치지 않았으며, 또한 최적 정합된 부하 저항에서의 출력 값이 아닌 경우도 있다. 더욱이, 일부는 정류 회로가 포함된 경우의 출력 값으로 제시하고 있어서 동일한 기준으로 성능을 비교하는 것은 무리가 있어 보인다.

3. 맺음말

이 글에서는 이론 보다는 개념 위주로, 현재까지 문헌에 보고된 음향 에너지 수확 장치에 대해 살펴보았다. 사실 음향 에너지 수확 장치의 대부분은 음압 차이에 의해 가진 되는 진동 구조물의 진동 에너지를 수확하는 개념이다. 따라서, 음압 차이를 증가시킬 수 있는 음향 공진기와 일반적인 진동 에너지 수확 구조의 결합된 형태가 많이 관찰된다. 이는 음향 에너지 수확 장치의 설계를 위해 그 동안에 많이 연구되어 온 다양한 진동 에너지 수확 구조물의 개념이 적용될 여지가 충분히 있다는 얘기도 된다.

진동 에너지 수확 장치는 가진원의 가속도가 수 m/s^2 만 되어도 발생 전력이 mW 급에 이른다(물론 요즘은 μW 급에도 작동되는 센서 노드도 판매되고 있다.). 반면 문헌에 보고된 음향 에너지 수확 장치는 대부분 그 발생 전력이 nW 급이다. 그러기에 혹자는 말한다. 음향 에너지 수확은 어디에 쓰겠냐고.

에너지 수확이란 머리말에서 언급한 바와 같이 ‘일상으로 존재하지만 쓸모 없이 버려지는 에너지’를 이용하자는 것이다. 그냥 버리기 보다는 조금이라도 버려지는 것을 일단 모아 모아보면 쓸만한 전기가 될 수 있지는 않을까? 또한, 대부분의 음향 에너지 수확 장치는 최적화 과정을 거치지 않은 것이다. 진동 에너지 수확에 대한 초기 연구가 진행될 무렵, 공학자들조차 그 효용성에 대해 의구심을 가졌다. 그런데, 지금은 저전력 소자 및 무선 기술의 발달로 인해 센서 노드쯤은 거뜬히 구동할 수 있다. 발생 전력이 미미하다고 미리 외면하는 것은 잠깐 미루도록 하자. **KSNVE**

참고문헌

- (1) Hudak, N. S. and Amatucci, G. G., 2008, Small-scale Energy Harvesting Through Thermoelectric, Vibration, and Radiofrequency Power Conversion, Journal of Applied Physics. Vol. 103, pp. 101301.
- (2) Priya, S. and Inman, D. J., 2009, Energy Harvesting Technologies, Springer, New York.
- (3) 김재은, 이수일, 2013, 압전 진동 에너지 수확의 이해, 경성문화사.
- (4) Khan, F. and Lzhar, 2015, Topical Review: State of the Art in Acoustic Energy Harvesting, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 25, pp. 023001.
- (5) 김재은, 2015, 기초강좌: 헬름홀츠 공명기, 소음·진동, 제 25권, 제 6호, pp. 24~28.
- (6) Barron, R. F., 2003, Industrial Noise Control and Acoustics, CRC Press, New York.
- (7) Chen, Z. et al., 2014, Metamaterials-based Enhanced Energy Harvesting: A Review, Physica B: Condensed Matter. Vol. 438, pp. 1~8.