

메타물질의 파동 특이현상을 이용한 에너지 하베스팅 기술

최금실, 신용창, 윤현준, 윤병동*

(서울대학교)

1. 머리말

우리 주변에서 버려지는 에너지를 재 수집하여, 무선 센서 및 소형 전자기기의 구동 전력을 자가 발전(self-powered) 방식으로 공급하는 에너지 하베스팅(energy harvesting) 기술에 대한 관심이 증가하고 있다. 가장 대표적인 주변 에너지 중 하나인 진동 에너지는 압전(piezoelectric), 정전기(electrostatic), 전자기(electromagnetic) 등의 에너지 변환 메커니즘을 이용하여 전기 에너지로 변환할 수 있다. 이 중에서 압전 에너지 하베스팅(piezoelectric energy harvesting)은 에너지 밀도가 높고 추가적인 보조장치가 필요 없기 때문에, 기술적으로 실현 가능성이 높아 다양한 분야에서 연구들이 진행되고 있다. 기본적인 변환 원리는 응력에 의해 변형이 일어나면 전류가 흐르는 압전 효과를 이용한 것으로, 전기-기계적으로 연성인 멀티피직스(multiphysics) 시스템이다.

지난 10년간 압전 에너지 수확 장치의 변환 효율을 극대화하기 위하여 형상 최적화(shape optimization), 위상 최적화(topology optimization), 전압 상쇄(voltage cancellation) 효과를 막기 위한 압전 소재 분할 (piezoelectric material segmentation) 등이 제안되었다. 또한 공진 기반 에너지 수확 장치가 광대역 진동(broadband

vibration)에서 에너지 변환 효율이 급격히 감소한다는 단점을 극복하기 위하여, 비선형 동역학을 이용한 쌍안정 메커니즘(bistable mechanism), 공진 주파수 튜닝(resonance frequency tuning), 다중 모드 공진기(multimodal resonator) 등이 제시되었다⁽¹⁾.

한편, 최근에 인위적인 구조를 통하여 자연계에 존재하지 않는 물성을 갖는 메타물질(metamaterial)이 매우 높은 공학적 응용 가능성으로 인하여 큰 각광을 받고 있는데, 특히 메타물질이 갖고 있는 파동 특이현상을 압전 에너지 하베스팅에 접목하는 연구들이 새롭게 시작되고 있다. 특히 메타물질의 대표적인 파동 특이현상들인 밴드 갭(band gap), 음의 굴절(negative refraction) 등을 이용하면 압전 에너지 수확 장치에 전달되는 파동 및 진동에너지의 밀도를 극대화할 수 있으며, 궁극적으로 수확 가능한 전력을 증가시킬 수 있다.

이 글에서는 압전 에너지 하베스팅의 성능 향상을 위해서 메타물질의 파동 특이현상인 밴드 갭과 음의 굴절을 이용하여 파동 및 진동에너지를 국부화(localization), 집속(focusing), 유도(guiding)하는데 필요한 이론들을 간략히 정리하고, 이를 압전 에너지 수확 장치에 적용한 사례들을 살펴본다.

* E-mail : bdyoun@snu.ac.kr

2. 메타물질 기반 에너지 하베스팅 기술

2.1 메타물질의 파동 특이현상

대표적인 메타물질로는 음향양자 결정(phononic crystal)과 음향 메타물질(acoustic metamaterial) 등이 있다. 메타물질을 통하여 구현 가능한 대표적인 파동 특이현상은 음의 굴절로서(그림 1), 음의 질량 밀도(mass density)와 부피 탄성률(bulk modulus)을 갖는 경우에 나타난다. 이와 같이 질량 밀도와 부피 탄성률이 모두 음의 값을 갖는 경우에 그림 2와 같이 DNG(double negative)라고 부른다. 또 하나의 파동 특이현상인 밴드 갭은 파장의 길이와 격자 상수(lattice constants)가 특정한 조건일 때, 브래그 산란(Bragg's scattering)에 의하여 특정한 주파수 대역에서 파동의 전파가 단절되는 현상을 뜻한다.

음향양자 결정은 2개 이상의 탄성 물질이 주기적 구조로 배열되어 있다. 이러한 주기적 구조를 이용하면 밴드 갭(그림 3), 음의 굴절 현상 등과 같은 파동 특이현상을 구현할 수 있다.

음향양자 결정에서의 음의 굴절은 브래그 산란에 기인한 락 접힘(band-folding) 효과를 통하여 구현될 수 있다. 락 접힘은 음의 기울기를 가지는 밴드를 만들게 되며, 이는 군속도(group velocity)가 음의 값을 가지고 위상속도(phase velocity)가 양의 값을 갖는 것을 의미한다.

한편 음향 메타물질은 파동의 제어 및 방향 유도 등의 목적을 위하여 인위적으로 만들어진 구조체이다. 음향 메타물질은 일정한 특정 주파수 대역에서 단극(monopolar) 공진으로부터 음의 부피 탄성률을 얻을 수 있으며, 쌍극(bipolar) 공진으로부터 음의 밀도를 얻을 수 있다. 뿐만 아니라 헬름홀츠 공명기(Helmholtz resonator) 또는 코팅드(coated) 원기둥 등을 이용하여 음의 굴절 현상을 구현할 수도 있다⁽²⁾.

2.2 에너지 하베스팅에서 파동 특이현상 응용

앞에서 언급한 메타물질의 대표적 파동 특이현상들인 밴드 갭, 음의 굴절 등을 이용하여 파동

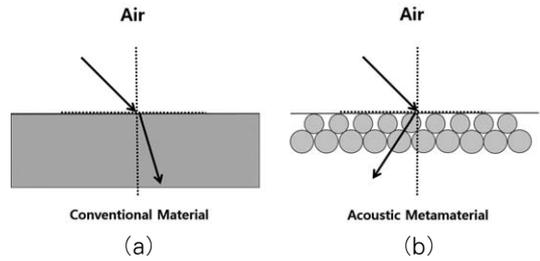


그림 1 메타물질의 파동 특이현상인 음의 굴절

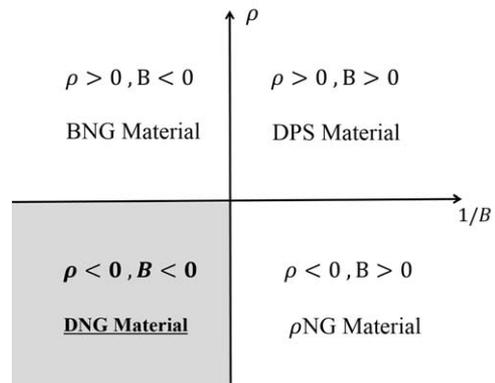


그림 2 부피 탄성률과 질량 밀도의 부호에 따른 재료 특성 분류(DPS: double positive; BNG: Bulk modulus is only negative; DNG: double negative; rhoNG: mass density is only negative)

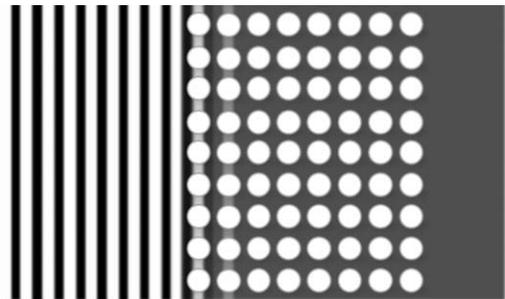


그림 3 음향양자 밴드 갭 현상

국부화(wave localization), 파동 집속(wave focusing), 파동 유도(wave guiding) 등을 구현할 수 있으며, 이를 통하여 압전 에너지 하베스팅의 성능을 극대화시킬 수 있다.

(1) 파동 국부화(Wave Localization)

특정 주파수 대역에서 탄성파가 더 이상 전파하지 못하는 밴드 갭의 특성을 이용하면 파동을

Vibration/Wave Excitation

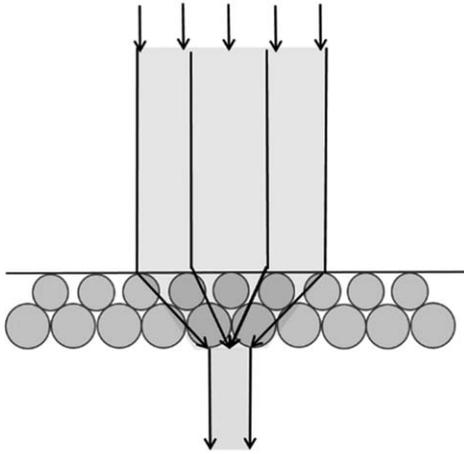


그림 4 메타물질을 이용한 파동 집속

국부화할 수 있으며, 이를 통하여 압전 에너지 하베스팅의 효율을 높일 수 있다. 이 때, 메타물질 기반 에너지 수확 장치의 밴드 갭을 공진 주파수 대역과 비슷한 개념으로 이해할 수 있다⁽³⁾.

(2) 파동 집속(Wave Focusing)

그림 4의 파동 집속 기술은 메타물질의 음의 굴절 특성을 이용한 것이다. 파동을 에너지 수확 장치가 부착된 위치에 집속하면 높은 에너지 밀도를 얻을 수 있고, 압전 효과를 통하여 에너지 변환 효율을 향상시킬 수 있다.

(3) 파동 유도(Wave Guiding)

또한 메타물질의 밴드 갭 특성과 집속 기술을 접목하면 파동 유도 기술도 가능해진다. 이 때, 압전 에너지 하베스터가 부착된 방향으로 파동을 유도하면 효율을 극대화할 수 있다.

3. 메타물질을 이용한 에너지 수확 장치 연구 사례

3.1 음향양자 결정 기반 에너지 하베스팅

Northwestern 대학의 Stefano Gonella 등은 음향

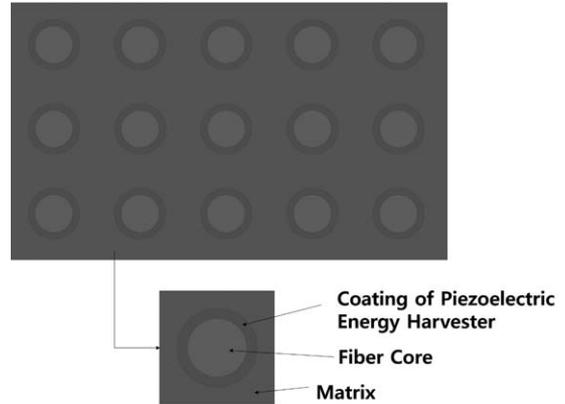


그림 5 음향양자 밴드 갭을 이용한 압전 복합체

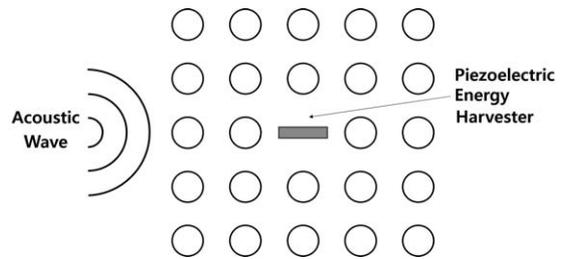


그림 6 공진 공동을 이용한 압전 에너지 하베스팅

양자 밴드 갭과 압전 미세구조의 상호작용에 대해 연구하였고, 그림 5에 나타난 주기적 미세구조를 통하여 다기능 압전 복합체를 제안하였다⁽⁴⁾. 중심부는 음향양자 밴드 갭을 구현하기 위하여 압전 복합체가 주기적으로 배열되었다. 이 때 외부의 가진에 의한 변형률 장(strain field) 및 에너지 국부화로 인한 미세 변형을 통하여 에너지 변환 효율을 극대화할 수 있다.

National Cheng Kung 대학의 Liang-Yu Wu 등은 그림 6과 같이 점 결함(point defect)이 있는 음향양자 결정 구조를 에너지 하베스팅에 접목하였다⁽⁵⁾. 점 결함은 공진 공동(resonant cavity)의 거동을 보였으며, 공진 주파수에서 파동이 음향양자 결정의 공동에 국부화됨을 보였다. 또한 공진 주파수에서 공동에 PVDF(polyvinylidene fluoride) 필름을 부착하여 음향에너지로부터 전기에너지를 수확할 수 있음을 실험적으로 검증하였다.

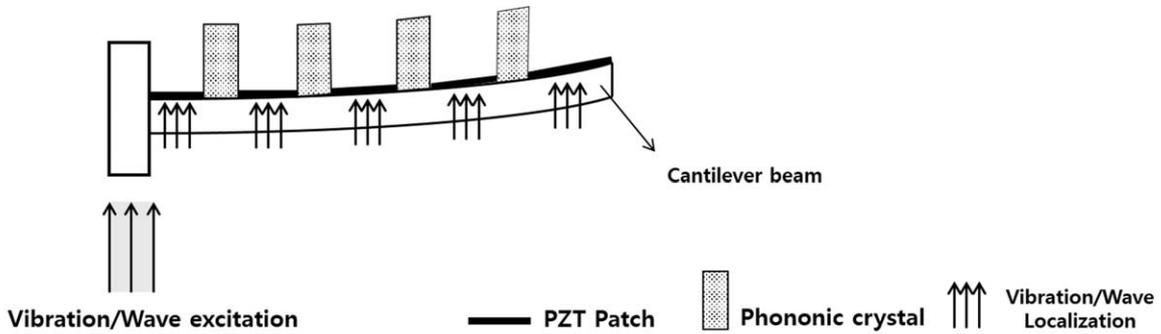


그림 7 음향양자 기반 압전 외팔 보

비슷한 연구 사례로 Xi'an Jiaotong 대학의 Hangyuan Lv 등은 짐 결합 고체-고체 음향양자 결정과 압전 소재를 이용한 에너지 하베스팅 기술을 제시하였다⁶⁾. 이 연구에서는 음향양자 결정을 이용한 기술이 기존의 에너지 하베스팅 기술보다 에너지 변환 효율이 훨씬 높다는 것을 실험적으로 확인하였다.

한편, Defense Technology 국립 대학의 Zhongsheng Chen 등은 그림 7과 같이 1차원 음향양자 기반 압전 외팔 보(phononic piezoelectric cantilever beam, PPCB)를 이용한 광대역 에너지 하베스팅에 대하여 이론적인 식을 유도하고 수치적 시뮬레이션을 통해서 관련 매개변수들의 영향을 연구하였다⁷⁾. 특히 기존 에너지 수확 장치와 비교하여 PPCB가 더 높은 효율을 가지는 것을 실험을 통하여 확인하였다. 또한 밴드 갭 크기, 질량, 격자 상수, 중심 주파수 등을 이론적으로 매개변수화 함으로써 PPCB의 최적 설계 가능성을 제시하였다.

3.2 음향 메타물질 기반 에너지 하베스팅

Georgia Institute of Technology의 Matteo Carrara 등은 압전 에너지 하베스팅의 효율을 개선하기 위하여 음향 메타물질 기반의 전기-기계적 연성 시스템을 총 3가지 구조로 제안하였다⁸⁾. 첫 번째는 포물선 음향 거울(parabolic acoustic mirror, PAM)을 이용하여 그림 8과 같이 입사하는 평면파(plane wave)를 에너지 수확 장치가 부착된 곳에 집중하는 방법이다.

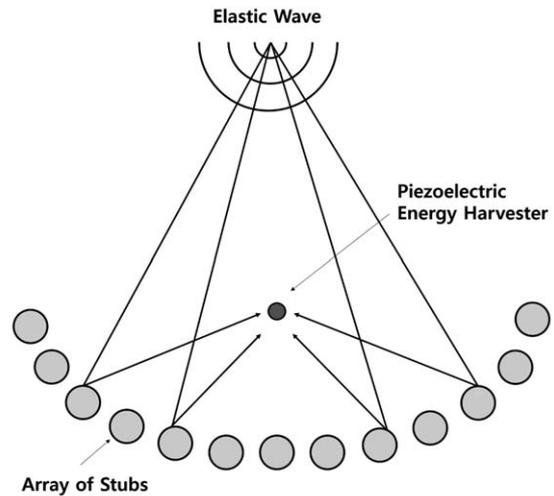


그림 8 포물선 음향 거울(PAM) 기반 압전 에너지 하베스팅 개념도

또한 실험을 통하여 포물선 음향 거울을 이용하면 광대역 진동에서 압전 에너지 수확 장치의 효율을 높일 수 있다는 것을 보였다. 더불어 포물선 음향 거울을 사용하지 않은 기존 에너지 수확 장치 대비 평균적으로 18배의 높은 전력을 수확하였다.

두 번째로 내부 결합이 있는 2차원 격자 구조를 제안하였다. 결합 부분에 에너지를 국부화하여 특정한 주파수에서 전력을 수확하는 원리로, 결합의 공진 주파수가 가진 주파수와 일치하도록 설계해야 한다. 따라서 기본적인 개념은 3장 1절에서 소개한 Liang-Yu Wu 등이 수행한 연구와 비슷하지만, 전달되는 에너지원의 종류가 각각 음향에너지와 진동에너지에 해당한다.

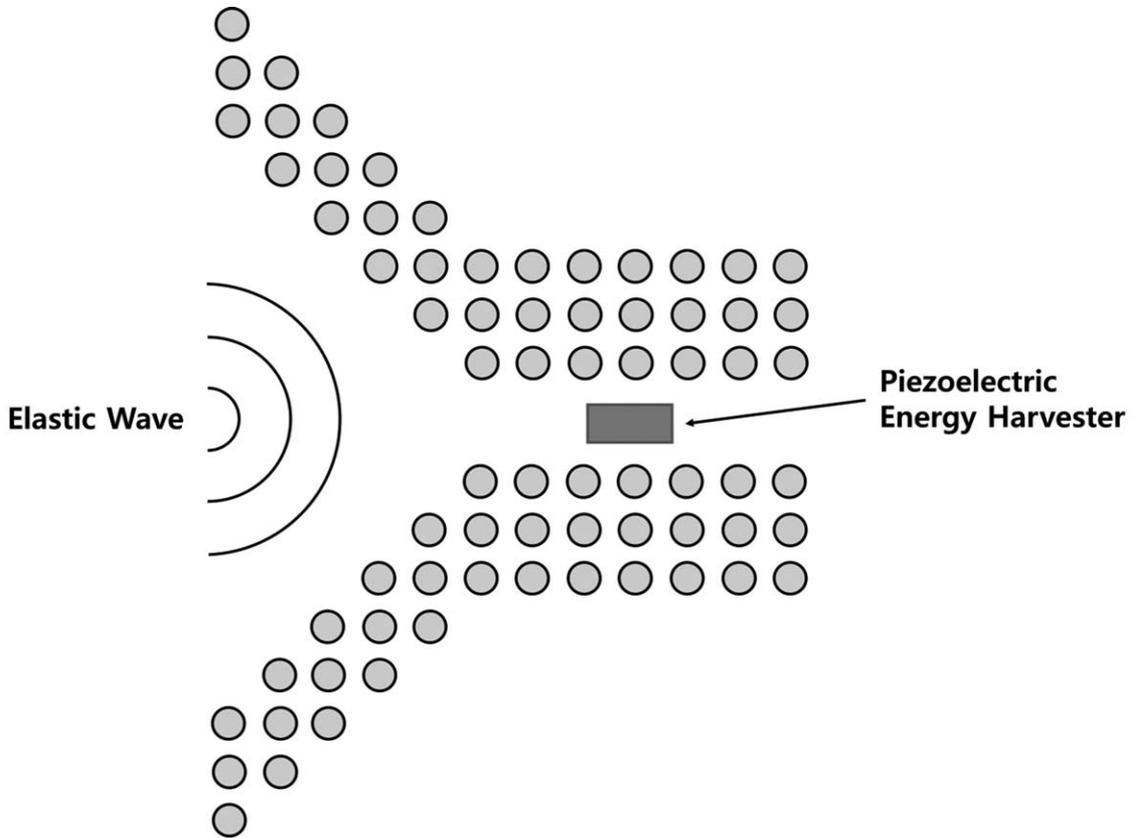


그림 9 음향 깔대기 형상을 이용한 에너지 하베스팅

세 번째는 알루미늄 판에 붙어 있는 음향 스캐터의 배열을 이용한 것이다. 이러한 주기적 배열로부터 밴드 갭과 음향 퍼널(acoustic funnel) 효과를 구현할 수 있으며, 이를 통하여 파동 집중 및 유도가 가능해진다(그림 9).

음향양자 결정과 마찬가지로 음향 메타물질 기반 에너지 하베스팅에서도 밴드 갭은 중요한 역할을 한다. 하지만 음향양자 결정은 음향 슈퍼렌즈(acoustic superlens)인 것에 반해, 다른 하나는 결합을 만들어 진동음향 에너지는 집중하는데 이용할 수 있는 국부적 공간이다. 음향양자 결정을 이용한 에너지 하베스팅과 비해 장점은 작은 크기의 음향 메타물질은 저주파 대역에 만들 수 있는 것이다. 따라서 저주파 진동 에너지 하베스팅이 필요한 응용에 사용하기 더 적합하다.

4. 맺음말

인위적인 구조를 통하여 자연계에 존재하지 않는 음의 강성, 음의 질량, 음의 푸아송 비 등을 갖는 메타물질의 특이 파동현상(밴드 갭, 음의 굴절 등)을 이용하면 압전 에너지 하베스팅의 성능을 크게 향상시킬 수 있다. 특히 파동 국부화, 집중, 유도 등의 기술을 활용하면 광대역 진동에서 기존의 외팔 보 압전 에너지 수확 장치의 출력 전력이 감소되는 문제를 획기적으로 개선할 수 있으며, 전달되는 진동에너지 밀도를 높임으로써 전력 수확량을 증대시킬 수 있다.

하지만 현재까지는 메타물질을 에너지 하베스팅에 물리적으로 단순히 결합하는 시도만 있었을 뿐이며, 관련 기술들의 최적화 연구는 아직 수행되지 않았다. 또한 파동방정식, 메타물질 구조,

압전 효과 등이 서로 연성된 시스템을 동시에 해석할 수 있는 이론 개발이 필요하다. 한편, 밴드갭의 중심 주파수는 음향양자 결정의 격자 상수에 의존하기 때문에, 격자 상수가 클 경우에 중심 주파수가 낮아지므로 저주파 대역의 진동에너지를 수확하기에 용이하지만, 음향양자 결정의 크기가 커진다는 단점이 있다.

따라서 전 세계적으로도 메타물질 기반 에너지 하베스팅 기술 개발 현황은 아직 초기 단계에 머물러 있기 때문에, 이와 관련된 원천기술 확보를 위한 경쟁이 앞으로 매우 치열해질 것으로 전망된다. 더불어 에너지 하베스팅은 주변에서 버려지는 에너지로부터 전력을 수확하는 지속 가능한 친환경 기술이며, 메타물질은 새로운 미래 과학 발전의 중요한 화두로 떠오르고 있기 때문에, 두 가지 기술을 융합한 메타물질 기반 에너지 하베스팅은 앞으로 기술적/경제적/산업적 파급효과가 매우 클 것으로 기대된다. [KSNVE](#)

참고문헌

- (1) Yoon, H. J. and Youn, B. D., 2014, Stochastic Quantification of Electric Power Generated by a Piezoelectric Energy Harvester Using a Time-frequency Analysis under Non-stationary Random Vibrations, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, No. 4, 045035.
- (2) Deymier, P. A., 2013, *Acoustic Metamaterials and Phononic Crystals*, Springer.
- (3) Chen, Z., Guo, B., Yang, Y. M. and Cheng, C., 2014, Metamaterials-based Enhanced Energy Harvesting: A Review, *Physica B: Condensed Matter*, Vol. 438.
- (4) Gonella, S., To, A. C. and Liu, W. K., 2009, Interplay between Phononic Bandgaps and Piezoelectric Microstructures for Energy Harvesting, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 57.
- (5) Wu, L.-Y., Chen, L.-W. and Liu, C.-M., 2009, Acoustic Energy Harvesting Using Resonant Cavity of a Sonic Crystal, *Applied Physics Letters*, Vol. 95.
- (6) Lv, H. Y., Tian, X., Wang, M. Y. and Li, D., 2013, Vibration Energy Harvesting Using a Phononic Crystal with Point Defect States, *Applied Physics Letters*, Vol. 102.
- (7) Chen, Z., Yang, Y. M., Lu, Z. and Luo, Y., 2013, Broadband Characteristics of Vibration Energy Harvesting Using One-dimensional Phononic Piezoelectric Cantilever Beams, *Physica B: Condensed Matter*, Vol. 410.
- (8) Carrara, M., Cacan, M. R., Toussaint, J., Leamy, M. J. Ruzzene, M. and Erturk, A., 2013, Metamaterial-inspired Structures and Concepts for Elastoacoustic Wave Energy Harvesting, *Smart Materials and Structures*, Vol. 22, No. 4.