

외부 가진 가변 주파수를 고려한 압전 진동 에너지 수확 모듈의 설계

김 재 은*†

* 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소

Design of a Vibration-Powered Piezoelectric Energy-Harvesting Module by Considering Variations in Excitation Frequency

Jae Eun Kim*†

* Institute of Advanced Machinery and Design, Seoul Nat'l Univ.

(Received April 2, 2010; Revised April 7, 2010; Accepted April 9, 2010)

Key Words : Energy Harvesting(에너지 수확), Piezoelectricity(압전), Module (모듈), Excitation Frequency(가진 주파수), Frequency Tuning Method(주파수 조절법)

초록: 진동 에너지 기반의 압전 에너지 수확 장치는 외부 가진력의 주파수가 장치의 고유 진동수 (또는 공진 주파수)와 일치하는 경우 최대 전력을 발생시키지만, 이를 벗어난 주파수 대역에서는 전력 발생량이 급격히 감소한다. 그런데, 에너지 수확 장치의 고유 진동수는 시간이 지남에 따라 변할 수 있으며, 가진 주파수 역시 어떤 일정한 값에 항상 고정되어 있는 경우는 드물다. 따라서, 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 일정한 공진 대역폭을 갖는 압전 에너지 수확 모듈을 제안하였고 해석 및 실험을 통하여 전기 출력에 대한 주파수 대역 특성을 파악하였다. 또한, 제안된 모듈을 구성하는 개별 에너지 수확 단위간의 전기적 연결 방법에 따라서 전기 출력이 최대화되는 공진 주파수가 조절될 수 있음을 보였다.

Abstract: A vibration-powered piezoelectric energy harvester yields the maximum power output when its resonant frequency is made equal to the excitation frequency; however, the power output is dramatically decreased when the energy harvester is operated at off-resonance frequency. It has been observed that the resonant frequency of a piezoelectric energy harvester may change with time and that the excitation frequency often varies when the energy harvester is used in real applications. Hence, in this study, we propose a piezoelectric energy-harvesting module that is suitable for excitations in a certain frequency range. The frequency characteristics of the electrical output of the module are studied through analysis and experiment. A simple frequency tuning method is also suggested for the proposed energy-harvesting module; in this method, frequency tuning is achieved by changing the electrical connections between the constituent energy-harvesting units of the module.

- 기호설명 -

1. 서론

- t_m : 끝단 질량 높이
- t_s : 압전 물질이 부착된 기관 두께
- t_p : 압전 층의 두께
- V : 전압 (볼트)
- A : 전류 (암페어)
- W : 전력량 (와트)
- Ω : 저항 (오옴)
- P : 밀도
- E : 탄성 계수

압전 진동 에너지 수확(vibration-powered piezoelectric energy harvesting)⁽¹⁻³⁾이란 압전 물질의 특성을 이용하여 생활 환경 주변 어디에나 존재하는 진동 에너지를 전기 에너지로 변환하는 기술을 말한다. 진동 에너지를 전기 에너지로 변환하기 위해 정전기(electrostatics),⁽⁴⁾ 전자기 유도(electromagnetic induction),⁽⁵⁾ 자기 변형(magnetostriction)⁽⁶⁾ 현상 등을 이용하기도 하지만 압전 물질을 이용한 에너지 수확 장치는 다른 에너지 변환 수단에 비해 상대적으로 높은 에너지 변환 효율, 구성의 간단함 및 소형화의 가능성 등으로 인해 많은 연구가 이뤄지

† Corresponding Author. jekim@idealab.snu.ac.kr

고 있다.

진동을 에너지 원으로 하는 압전 에너지 수확 장치의 가장 큰 특징은 외부 가진력의 주파수가 장치의 고유 진동수와 일치하는 경우에만 최대 전력을 발생시키고 이를 벗어난 가진 주파수에서는 생성 전력량이 급격히 감소한다는 점이다. 그러나, 시간이 지남에 따라 제작된 에너지 수확 장치의 고유 진동수는 내부 체결력의 변화 및 외부 환경에 의한 부식 등으로 변할 수 있다. 또한, 외부 가진 주파수도 항상 어떤 일정한 값을 갖는 경우는 드물다. 따라서, 이를 해결하기 위해 장치의 고유 진동수를 외부 가진 주파수에 맞추는 방법^(7,8) 및 에너지 수확 장치를 다자유도로 구성하여 일정한 공진 대역폭을 갖도록 하는 방법⁽⁹⁻¹³⁾ 등이 제안되어 왔다.

이러한 배경 아래 본 연구에서는 부채꼴 형상의 외팔보 압전 에너지 수확 단위를 방사상으로 배치한 압전 에너지 수확 모듈을 제안하였으며(Fig. 1), 해석 및 실험을 통해 전기 출력의 주파수 대역 특성을 살펴보았다. 또한, 개별 에너지 수확 단위간의 직렬 및 병렬 연결의 적절한 조합으로 압전 에너지 수확 모듈의 전기 출력을 최대화할 수 있는 작동 주파수 조절법(frequency tuning method)을 처음으로 제안하였다.

2. 제안된 모듈의 주파수 대역 특성

2.1 구성 및 모듈 내 에너지 수확 단위의 특성

외팔보 압전 진동 에너지 수확 장치는 삼각형 형상에 가까울수록 압전 물질 내에 변형률(strain)이 균일하게 분포하여 피로 및 파괴를 고려한 신뢰성 관점에서 유리하다.⁽¹⁴⁾ 또한, 외팔보 압전 에너지 수확 장치의 끝단 질량은 출력 전력을 증가 시킴과 동시에 고유 진동수를 낮추는 역할을 한다. 이는 주위 환경에서 일반적으로 관찰되는 진동이 300 Hz 미만의 저주파수 대역에 존재하기 때문이다.⁽¹⁵⁾ 이와 같은 점들을 고려하여 본 연구에서는 끝단 질량이 부착된 부채꼴 형상의 개별 에너지 수확 단위들이 전체적으로는 원의 형상으로 배열된 압전 에너지 수확 모듈을 구성하였다(Fig. 1). 이는 부채꼴 형상의 개별 압전 에너지 수확 단위들이 Fig. 1 과 같이 원의 형상으로 배열되어야 전체 압전 에너지 수확 모듈이 차지하는 공간을 최소화할 수 있기 때문이다. 따라서, 결과적으로 에너지 수확 장치의 단위 면적당 성능을 증가시킨다.

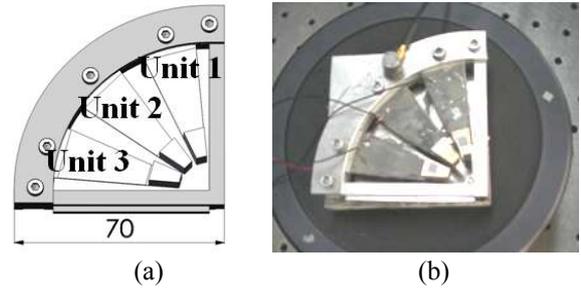


Fig. 1 (a) CAD model and (b) prototype model of the proposed piezoelectric energy harvesting module

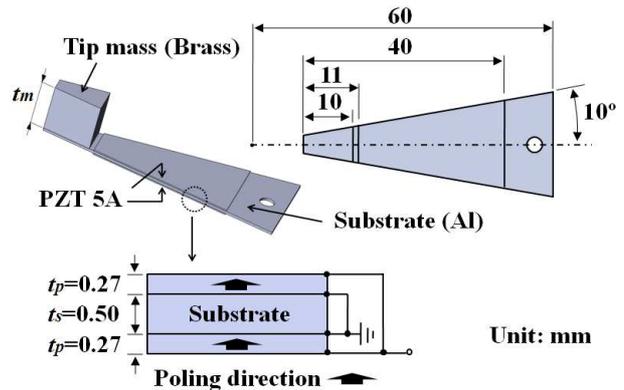


Fig. 2 Constituent piezoelectric energy harvesting unit in bimorph connected in parallel and related dimensions ($t_m=10$ mm (Unit 1), 9.5 mm (Unit 2) and 9 mm (Unit 3), respectively)

또한, 본 연구에서는 1/4 원 형상의 모듈 안에 3개의 개별 압전 에너지 수확 단위를 배치하였지만, 전체 에너지 수확 모듈의 크기, 가진 주파수 대역폭 및 개별 압전 에너지 수확 단위에 요구되는 최소 출력 전력 등을 고려하면 모듈 안의 개별 에너지 수확 단위의 개수는 달라질 수 있다.

Fig. 1의 개별 압전 에너지 수확 단위들은 제작의 용이성 및 제작 비용을 고려하여 끝단 질량(tip mass)의 높이를 제외한 모든 치수가 동일하게 제작되었다. 본 연구에서 사용된 개별 에너지 수확 단위의 치수 및 구성을 Fig. 2에 나타내었다. 압전 물질은 Piezo Systems, Inc의 PZT 5A4E를 사용하였으며, 압전 물질이 부착된 기관 및 끝단 질량의 재료로 각각 알루미늄($\rho_s=2700$ kg/m³, $E_s=69 \times 10^9$ Pa)과 황동($\rho_m=8470$ kg/m³, $E_m=110 \times 10^9$ Pa)을 사용하였다. 해석을 위해 기본 전기 회로가 부착된 압전 변환기의 해석이 가능한 ANSYS (SOLID5, CIRCU94)를 사용하였으며, Fig. 3에 보인 실험 장비를 이용하여 고유 진동수 및 전기 출력량을 측정하였다.

Table 1은 Fig. 2에 보인 개별 압전 에너지 수확 단위에 대한 폐회로 및 개회로 상태의 고유 진

Table 1 Short-circuit and open-circuit resonant frequencies of each constituent piezoelectric harvesting unit

	Unit 1	Unit 2	Unit 3
폐회로 고유 진동수 (Hz)	124.7 / 124.2	127.4 / 127.6	131.2 / 132.2
개회로 고유 진동수 (Hz)	128.9 / 128.6	131.6 / 131.5	135.5 / 135.2

(Analysis/ Experiment)

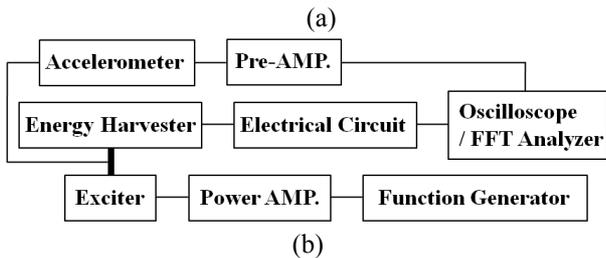
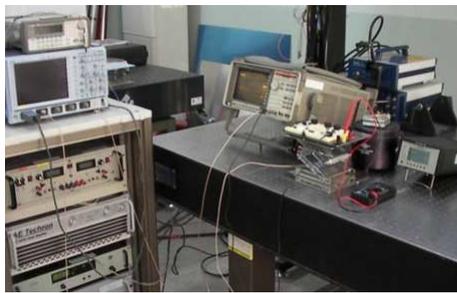


Fig. 3 (a) Experimental setup and (b) its schematic for measuring resonant frequencies and electrical outputs

동수에 대한 결과로서 해석 및 실험을 통해 얻은 값을 비교하였다. 여기서 폐회로 및 개회로 상태란 압전 에너지 수확 단위에 연결된 부하 저항의 값이 각각 0 또는 무한대인 경우를 말한다. Table 1의 결과를 살펴보면 개회로 상태의 고유 진동수는 항상 폐회로 상태의 고유 진동수 보다 높음을 확인할 수 있는데, 이는 압전 에너지 수확 장치에 저장된 탄성 에너지의 일부가 전기 에너지로 변환되어 강성이 높아지기 때문이다. 이는 다음과 같은 관계에서 확인할 수 있다.⁽¹⁶⁾

$$k^{oc} = k^{sc} + \frac{\alpha^2}{C_p} \quad (1)$$

위 식에서 k^{sc} , k^{oc} 는 각각 폐회로 및 개회로 상태에서의 강성이고, C_p 및 α 는 각각 압전 물질 내부의 전기 용량 (capacitance) 및 전기-역학 연성 계수를 나타낸다.

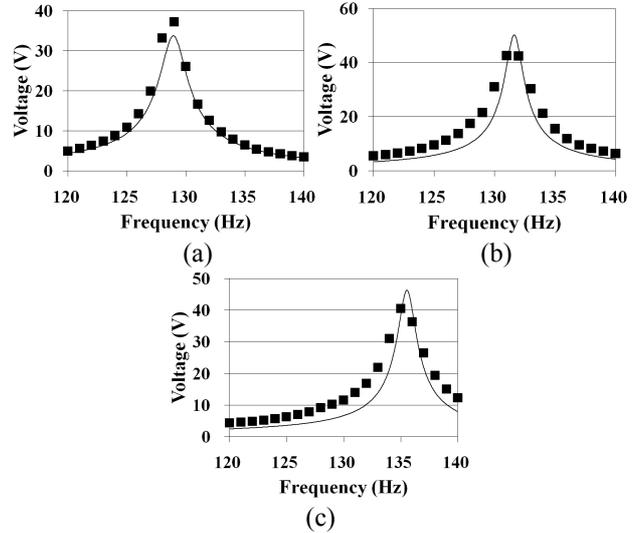


Fig. 4 Open-circuit voltage of each constituent piezoelectric energy harvesting unit for the cases of (a) Unit 1, (b) Unit 2, and (c) Unit 3 (■: Experiment, -: Analysis)

개별 에너지 수확 단위의 전기적 출력의 특성으로서 Fig. 4 는 개회로 상태의 출력 전압을 나타낸 것이다. 일반적으로 주위 환경에서 측정되는 진동원은 300 Hz 이하의 주파수 대역에서 가속도 수준이 10 m/s^2 이하이므로,⁽¹⁾ Fig. 4 를 포함한 본 연구에서의 결과는 모두 가진 가속도가 5 m/s^2 일 때를 고려하였다. 전기 출력량의 해석을 위해서 필요한 개별 에너지 수확 단위들의 첫 번째 모드 감쇠 계수는 실험을 통해 측정하였다(Unit 1: 0.009, Unit 2: 0.006, Unit 3: 0.006). Fig. 4 의 결과를 통해 해석 및 실험 결과가 잘 일치함을 확인하였으며, 개별 에너지 수확 단위의 개회로 상태 출력 전압은 각각의 개회로 상태의 고유 진동수에서 최대값을 가짐을 확인하였다.

2.2 압전 에너지 수확 모듈의 특성

Fig. 1 과 같이 구성된 1/4 원 형상의 압전 에너지 수확 모듈은 필요에 따라 1/2 원 및 원의 형상으로도 제작이 가능하다. 또한, 모듈을 수직으로 상호 배치하면 3 축 에너지 수확 장치로도 구성이 가능하여 외력이 임의의 방향으로 존재할 때 유용하다 (Fig. 5). 그러나, 본 연구에서는 기본 모듈인 1/4 원 형상에 대해 그 특성을 파악하였다. 각 개별 에너지 수확 단위는 상호간에 병렬 연결을 하였다 (Fig. 6). 이는 압전 물질을 이용한 에너지 수확 장치가 일반적으로 출력 전압이 높은 반면 출력 전류가 작기 때문이다. 먼저 3 개의 개별 에너지 수확 단위가 전기적으로 연성되어 고유 진동수

Table 2 Short- and open-circuit resonant frequencies of the assembled piezoelectric harvesting module

	1st mode	2nd mode	3rd mode
폐회로	124.7	127.4	131.2
고유 진동수 (Hz)	/ 124.2	/ 127.6	/ 132.2
개회로	125.4	128.6	133.5
고유 진동수 (Hz)	/ 125.2	/ 129.1	/ 133.7

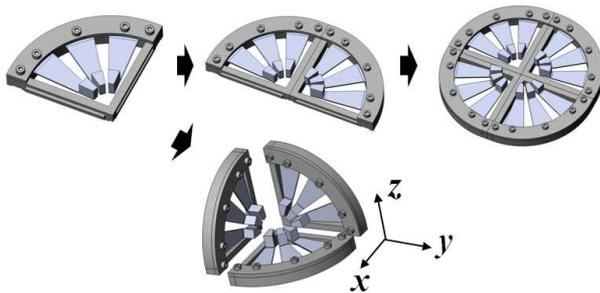


Fig. 5 Proposed piezoelectric energy harvesting module expandable to either 1/2, 1/4, and full circular shapes in a plane or a three-axis type

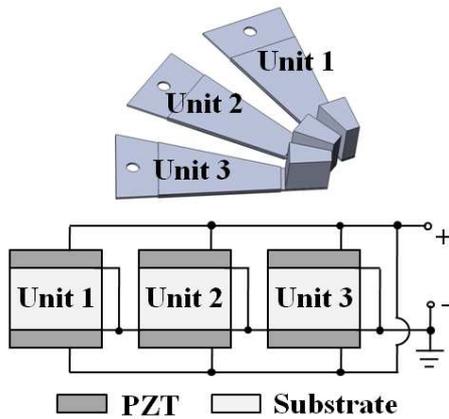


Fig. 6 Electrical parallel connection among the piezoelectric energy harvesting units

가 변하는 현상을 살펴본 후 출력 전압, 전류 및 전력의 주파수 대역 특성에 대해 살펴보았다.

2.2.1 고유 진동수 특성

개별 에너지 수확 단위간의 연결을 병렬로 연결할 경우 이웃한 에너지 수확 단위의 내부 전기 임피던스가 전기 부하로 작용하여 개회로 상태의 고유 진동수가 변하게 된다. 제안한 압전 에너지 수확 모듈에 대한 고유 진동수 해석 및 실험 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2의 결과를 Table 1에 나타낸 각각의 개별 에너지 수확 단위가 갖는 고유 진동수 값들과 비교하면 폐회로 고유 진동수는 동일하나 개회로 고유 진동수는 낮아지는 현상을

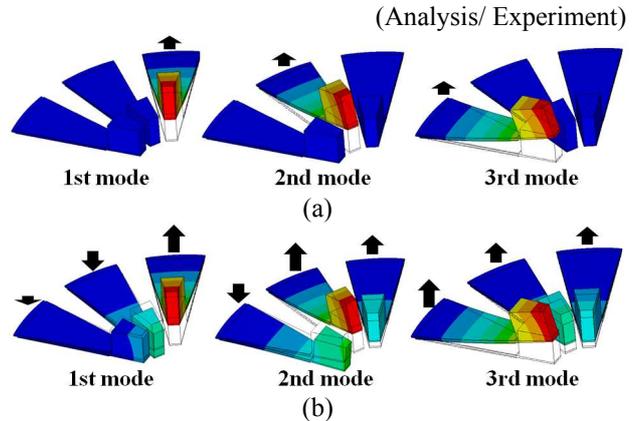


Fig. 7 Mode analysis of the proposed piezoelectric energy harvesting module for the (a) short-circuit and (b) open-circuit resonant frequency

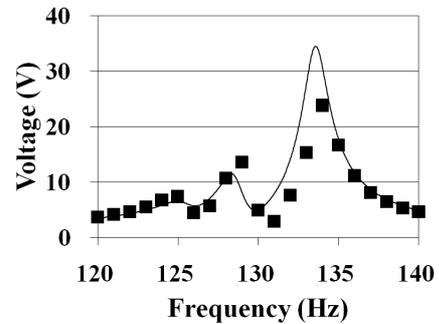


Fig. 8 Open-circuit voltage of the proposed piezoelectric energy harvesting module

살펴 볼 수 있다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 Fig. 7에 보인 고유 모드의 해석 결과를 이용하면 다음과 같다. 즉, 폐회로 상태의 고유 진동에서는 각각의 압전 에너지 수확 단위들이 개별로 존재할 때와 같이 독립적으로 움직이므로 개별 압전 에너지 수확 단위의 폐회로 고유 진동수와 값이 일치한다. 그러나, 개회로 고유 진동에서는 이웃한 에너지 수확 단위가 연동되어 움직이는 것을 볼 수 있는데, 이러한 전기적 연성으로 인한 이웃한 모드간의 위상차는 개회로 상태의 강성을 변화시키고 결과적으로 개회로 고유 진동수의 값을 변하게 된다.

2.2.2 출력 전압/ 전력 특성

3 개의 개별 에너지 수확 단위를 병렬로 연결한 경우의 전기적 응답을 Fig. 8 및 9에 외부 가진 주파수의 함수로서 나타내었다. 우선 개회로 상태에서의 출력 전압을 Fig. 8에 나타내었으며, 외부 등가 저항이 임의로 20 kΩ의 값을 가질 경우의 전기 출력량에 대해서 그 해석과 실험 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 이 저항값은 제안된 압전 에너지 수확 모듈이 주파수 대역 120~140 Hz에서 가지는 평균 임피던스 값이다. 해석과 실험 결과에서 모두 3 개의 공진 대역이 나타남을 확인하였다.

그러나, 실제의 전기 출력은 전기 임피던스 정

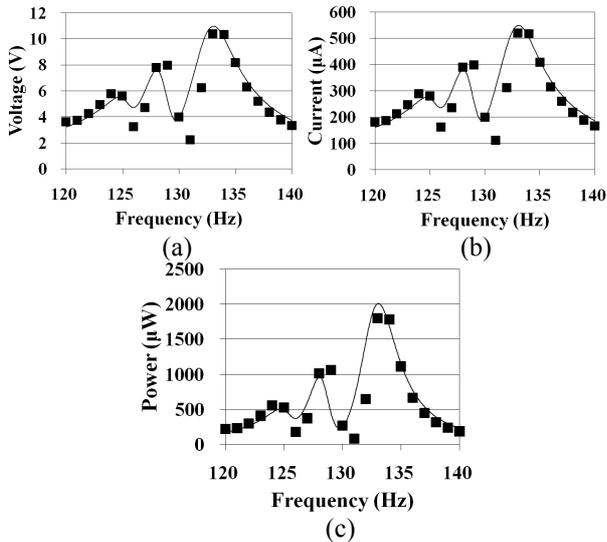


Fig. 9 (a) Output voltage, (b) current, and (c) power when the energy harvesting module is connected to an external 20kΩ resistance

합 (electrical impedance matching)을 통해서 나타난다. 따라서, 이를 고려한 주파수 대역 특성을 살펴 보기 위해서는 각각의 전기 응답을 압전 에너지 수확 모듈의 내부 임피던스 크기가 외부 부하 저항값과 일치하는 경우에 주파수의 함수로서 나타내는 것이 더욱 적절하다.⁽¹⁶⁻¹⁸⁾ 본 연구에서는 ANSYS 를 이용하여 식 (2)와 같이 각 주파수 (angular frequency) ω 에서 단위 전압을 가하였을 때 발생하는 전류의 크기로서 최적 임피던스 값을 구하였다.

$$|Z(j\omega)| = \left| \frac{V(j\omega)}{I(j\omega)} \right| = \frac{1}{\omega \sqrt{Q_r^2 + Q_s^2}} \quad (2)$$

($Z(j\omega)$: 임피던스)

위 식에서 Q_r 과 Q_s 는 각각 전극에 생성된 전하의 실수부 및 허수부 값이다.

Fig. 10 의 결과는 해석을 통해 얻었으며, 이를 통해 개별 에너지 수확 단위가 병렬 연결 되었을 경우의 출력 전류는 개별 출력 전류의 합의 거동을 보이고 적절한 주파수 대역폭이 생성됨을 확인하였다. 그러나, 개별 에너지 수확 단위가 폐회로 고유 진동수에서 가지는 최소 임피던스 및 에너지 수확 단위 간의 병렬 연결로 인해 Unit 1 의 고유 진동수 부근에서의 감소된 전체 임피던스 값은 전체 출력 전압을 감소시켰다. 따라서, 전체 출력 전압 값이 원하는 값보다 낮을 경우에는 개별 에너지 수확 단위들을 직접 연결하지 않고, 정류 회로를 통한 직류 전압들을 연결하여야 한다.⁽¹¹⁾ Fig. 10 에 나타낸 제안된 에너지 수확 모듈의 출력 전력을 살펴 보면 가진 주파수가 Unit 3 의 고유 진동

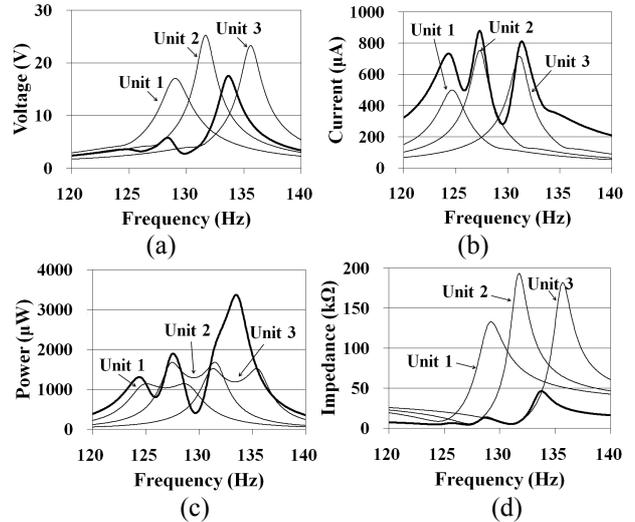


Fig. 10 Electrical outputs of the proposed energy harvesting unit at optimal impedance with respect to frequency: (a) voltage, (b) current, (c) power, and (d) impedance

수로 근접할 수록 출력 전력량 크기가 증가되는 것을 확인할 수 있다. 이 특성은 다음에 설명될 작동 주파수 조절법을 제안하는데 사용되었다.

3. 제안된 모듈의 주파수 조절 특성

지금까지 살펴본 바와 같이 진동 에너지 기반의 압전 에너지 수확 장치의 작동 주파수 대역을 넓히기 위해서 각각의 서로 다른, 인접한 고유 진동수를 가지는 다수의 개별 에너지 수확 단위를 연결하는 것이 하나의 대안이 될 수 있다. 이렇게 다수의 에너지 수확 단위를 사용하는 경우, 개별 에너지 수확 단위들간의 전기적 연결 방법은 사용 목적에 따라 다를 수 있다. 즉, 2 장에서 살펴 본 바와 같이 출력 전류의 양을 증가시키기 위해 병렬로 연결할 수 있는 반면, 출력 전압이 높아야 한다면 직렬 연결 방법을 고려할 수 있다.

본 장에서는 에너지 수확 단위들간의 직렬, 또는 병렬 연결을 적절히 조합하여 전기적 출력을 최대화하기 위한 작동 주파수 조절법을 제안하였다.⁽¹⁹⁾ Fig. 11 은 3 개의 개별 에너지 수확 단위로 구성된 전체 에너지 수확 장치 및 상호 연결 회로를 보여주고 있다. 개별 에너지 수확 단위의 (+)극과 (-)극에는 스위치가 붙어 있으며, 각 (+)극에 연결된 스위치는 도체 C1 과 C2 로 연결되어 있다. 각 (-)극에 연결된 스위치는 도체 C1 과 C2, 혹은 그냥 접지로 연결된다. 이 경우 각각의 스위치의 연결 상태에 따라 개별 에너지 수확 단위간의 연결을 직렬, 또는 병렬로 할 수 있다. 개별 에너

Table 3 All combinations of electrical connections for the schematic circuit show in Fig. 11

회로 연결 방법 및 예시		
Case 1	Unit 1-2-3 병렬	
Case 2	Unit 1-2 병렬, Unit 3 직렬	
Case 3	Unit 2-3 병렬, Unit 1 직렬	
Case 4	Unit 1-3 병렬, Unit 2 직렬	
Case 5	Unit 1-2-3 직렬	
Case 6	Unit 2-3 직렬, Unit 1 병렬	
Case 7	Unit 1-3 직렬, Unit 2 병렬	
Case 8	Unit 1-2 직렬, Unit 3 병렬	

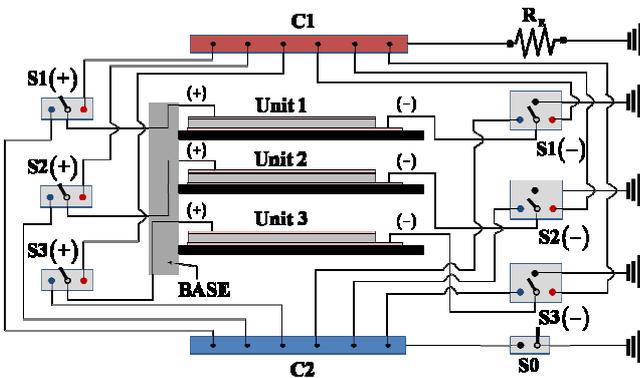


Fig. 11 Schematic of electrical connections among the three piezoelectric energy harvesting units in an open state

지 수확 단위의 개수가 3 개인 경우에는 연결 조합이 총 8 가지가 된다. 이를 Table 3 에 나타내었으며 이 중에서 전압, 전류 및 전력 등의 3 가지 출력 전기량 모두가 확실한 주파수 조절 특성을 가진 경우를 선택하였다. 본 연구에서 제안한 주파수 조절 특성은 에너지 수확 모듈을 구성하는 개별 에너지 수확 단위들 각각의 임피던스 특성과 첫 번째 고유 진동수들의 분포 등에 영향을 받는다. 따라서, 개별 에너지 수확 단위들의 특성에 따라 Table 3 에 보인 연결 방법 중 다음에서 설명된

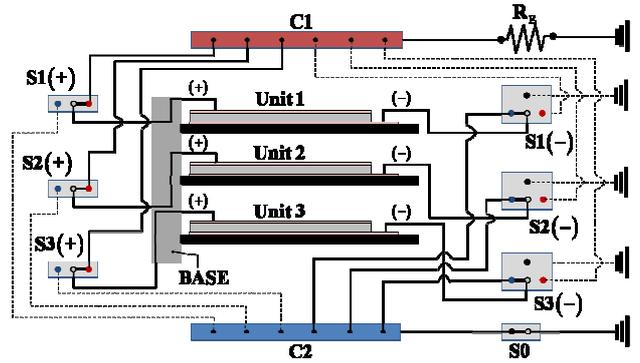


Fig. 12 Electrical connections among the three piezoelectric energy harvesting units in parallel

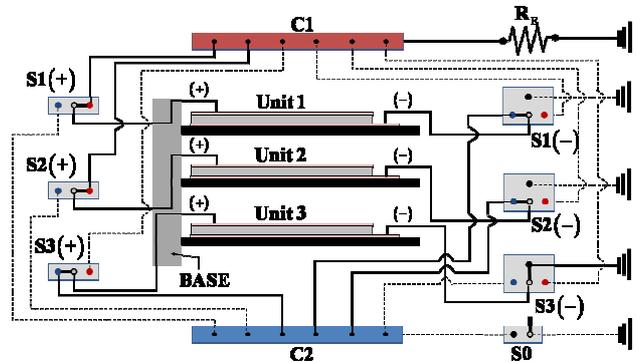


Fig. 13 Electrical connections between Unit 1 and Unit 2 in parallel and Unit 3 in series to them

것과는 다른 연결 방법을 취해야 하는 경우도 있다.

3.1 CASE 1: Unit 1-2-3 병렬 연결

이 경우에 대한 전압, 전류, 전압 및 임피던스 결과는 Fig. 10 에 제시한 것과 같으며 Fig. 11 에 보인 회로는 Fig. 12 와 같이 조절된다. 이렇게 함으로써 Fig. 10 에 보인 바와 같이 Unit 3 에 해당하는 고유 진동수에서 최대 출력이 발생한다. 이 경우 최대 출력 (3368.2 μ W)은 개별 에너지 수확 단위 Unit 3 (1521.6 μ W)에서 얻을 수 있는 값보다 120% 정도 증가하였다.

3.2 CASE 2: Unit 1-2 병렬, Unit 3 직렬 연결

Fig. 13 은 개별 에너지 수확 단위 Unit 1 과 Unit 2 는 병렬로 연결되고, 이 병렬 연결에 Unit 3 가 직렬로 연결되어 있는 경우를 나타낸다. 이 경우에 대한 전기 출력량을 Fig. 14 에 나타내었으며 Unit 2 에 해당하는 고유 진동수 부근에서 최대 전력량이 발생하는 것을 볼 수 있다. 개별 에너지 수확 단위 Unit 2 의 최대 전력량이 1680.1 μ W 임에 반해 이 경우의 최대 전력량은 3853.1 μ W 로서 약 130%의 증가를 가져왔다.

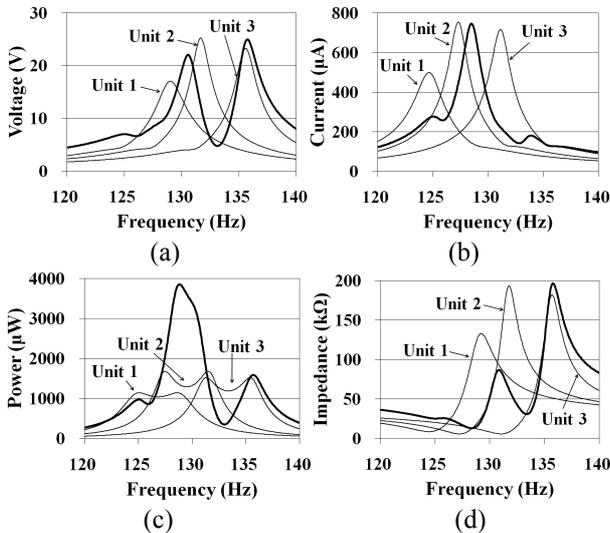


Fig. 14 Electrical outputs of the proposed energy harvesting unit at optimal impedance with respect to frequency for the case in Fig. 13: (a) voltage, (b) current, (c) power, and (d) impedance

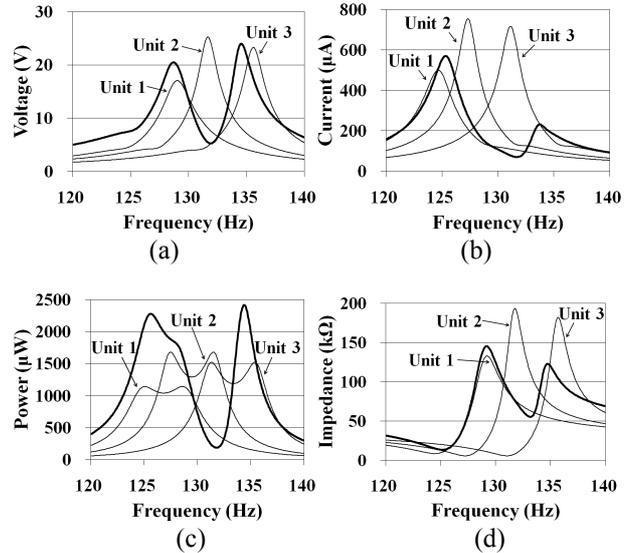


Fig. 16 Electrical output of the proposed energy harvesting unit at optimal impedance with respect to frequency for the case in Fig. 15: (a) voltage, (b) current, (c) power, and (d) impedance

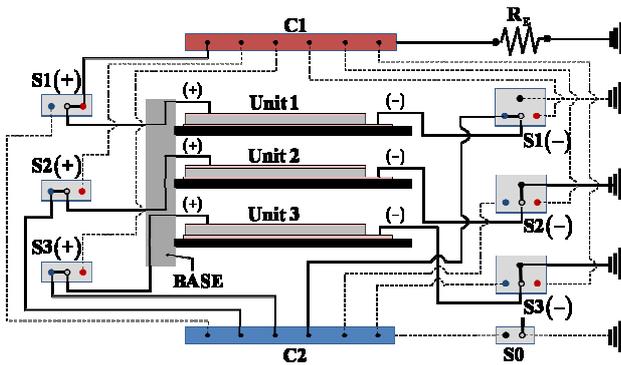


Fig. 15 Electrical connections between Unit 2 and Unit 3 in parallel and Unit 1 in series to them

3.3 CASE 3: Unit 2-3 병렬, Unit 1 직렬 연결

Fig. 15는 개별 에너지 수확 단위 Unit 2와 Unit 3는 병렬로 연결되고, 이 병렬 연결에 Unit 1이 직렬로 연결되어 있는 경우를 나타낸다. Fig. 16은 이 경우에 대한 전기 출력량을 나타낸 것으로서 Unit 1에 해당하는 고유 진동수 부근에서 최대 전력량이 발생하는 것을 볼 수 있다. 개별 에너지 수확 단위 Unit 1의 최대 전력량이 1142.6 μW 임에 반해 이 경우 2275.9 μW 의 최대 전력량이 발생하여 약 90%의 증가를 가져왔다.

Fig. 10, 14 및 16의 전기적 응답에 대한 그래프를 보면 알 수 있듯이 개별 에너지 수확 단위간에 적절한 직렬 및 병렬 연결을 조합하면 매우 다른 전기적 응답 특성을 얻을 수 있다. 이러한 특징은 다수의 에너지 수확 단위를 이용하여 에너지 수확

모듈을 구성할 때 구조적 변경 없이도 전기적 연결 방법의 변경만을 통해서도 에너지 수확 성능이 최대화되는 작동 주파수를 조절할 수 있다는 장점을 갖는다. 3개의 개별 에너지 수확 단위를 사용하였지만 스위칭을 통해 3개의 주파수 부근에서 출력량이 개별 단위 대비 2배 가량 증가하였고, 이는 제안한 방법이 아니면 총 6개의 개별 에너지 수확 단위가 있어야만 가능한 것이다. 특히, 트랜지스터 등의 전기적 스위치 기능을 이용하면, RF 신호 등을 이용하여 원격으로도 작동 주파수 조절이 가능하므로 무선 센서 노드망⁽²⁰⁾에 적용이 가능하다. 특히, 에너지 수확 장치를 이용한 센서 노드가 원거리에 설치될 경우, 기계적 액추에이터 등을 이용한 작동 주파수 조절⁽⁷⁾과는 달리 소모 전력이 상대적으로 미미하여 이미 설치된 에너지 수확 시스템에 대하여 작동 환경의 변화에 매우 쉽고 간편하게 대처할 수 있다는 장점이 있다.

4. 결론

본 연구에서는 외부 가진 가변 주파수를 고려한 압전 진동 에너지 수확 모듈을 제안하였다. 부채꼴 형상의 외팔보 에너지 수확 단위 3개를 상호 병렬 연결하여 모듈화된 에너지 수확 장치를 제안하고 해석 및 실험을 통해 주파수 대역 특성을 살펴 보았다. 또한, 다수의 에너지 수확 단위를 이용하여 에너지 수확 모듈을 구성할 때 단위간의 전기적 연결을 직렬, 또는 병렬로 조합하여 작동 주

파수를 조절할 수 있는 새로운 주파수 조절법을 제안하였다. 제안된 모듈의 주파수 조절 특성을 해석을 통해 확인하였고, 제안한 주파수 조절 방법을 이용하면 개별 단위의 각 고유 진동수에서 발생하는 전력의 2 배 정도를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 교육 과학 기술부 창의적 연구 진흥 사업 (과제 번호: 2009-0083279)의 지원을 받은 것으로 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Roundy, S., Wright, P. K. and Rabaey, J., 2003, "A Study of Low Level Vibrations as a Power Source for Wireless Sensor Nodes," *Computer Communications*, Vol. 26, No. 11, pp. 1131~1144.
- (2) Beeby, S. P., Tudor, M. J. and White, N. M., 2006, "Energy Harvesting Vibration Sources for Microsystems Applications," *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, No. 12, pp. R175~R195.
- (3) Priya, S. and Inman, D. J., 2009, *Energy Harvesting Technologies*, Springer Science+Business Media, LLC, New York.
- (4) Mitcheson, P. D., Miao, P., Stark, B. H., Yeatman, E. M., Holmes, A. S. and Green, T. C., 2004, "MEMS Electrostatic Micropower Generator for Low Frequency Operation," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 115, pp. 523~529.
- (5) Glynne-Jones, P., Tudor, M. J., Beeby, S. P. and White, N. M., 2004, "An Electromagnetic, Vibration-Powered Generator for Intelligent Sensor Systems," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 110, pp. 344~349.
- (6) Wang, L. and Yuan, F. G., 2008, "Vibration Energy Harvesting by Magnetostrictive Material," *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, No. 4, 045009.
- (7) Roundy, S., Leland, E. S., Baker, J., Carleton, E., Reilly, E., Lai, E., Otis, B., Rabaey, J. M., Wright, P. K. and Sundararajan, V., 2005, "Improving Power Output for Vibration-Based Energy Scavengers," *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 4, No. 1, pp. 28~36.
- (8) Cho, S.-W., Son, J.-D., Yang, B.-S. and Choi, B.-K., 2009, "Vibration-Based Energy Harvester for Wireless Condition Monitoring System," *Trans. of the KSNVE*, Vol. 19, No. 4, pp. 393~399.
- (9) Feng, G.-H. and Hung, J.-C., 2008, "Development of Wide Frequency Range-Operated Micromachined Piezoelectric Generators Based on Figure-of-Merit Analysis," *Microsystem Technologies*, Vol. 14, No. 3, pp. 419~425.
- (10) Ferrari, M., Ferrari, V., Guizzetti, M., Marioli, M. and Taroni, A., 2008, "Piezoelectric Multifrequency Energy Converter for Power Harvesting in Autonomous Microsystems," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 142, No. 5, pp. 329~335.
- (11) Liu, J.-Q., Fang H.-B., Xu, Z.-Y., Mao, X.-H., Shen, X.-C., Chen, D., Liao, H. and Cai, B.-C., 2008, "A MEMS-Based Piezoelectric Power Generator Array for Vibration Energy Harvesting," *Microelectronics Journal*, Vol. 39, No. 5, pp. 802~806.
- (12) Kim, J. E., Ryu, J. C. and Kim, Y. Y., 2009, "Energy Harvester," Korea Patent Application No. 10-2009-0017773.
- (13) Kim, J. E., Ryu, J. C., Ma, P. S. and Kim, Y. Y., 2009, "Energy Harvester Unit Module, Multi-Axis Energy Harvester Assembly Made from the Same, and Multi-Axis Energy Harvester Multi-Assembly Made from the Same," Korea Patent Application No. 10-2009-0044119.
- (14) Goldschmidtboeing, F. and Woias, P., 2008, "Characterization of Different Beam Shapes for Piezoelectric Energy Harvesting," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 18, No. 10, 104013.
- (15) duToit, N. E., Wardle, B. L. and Kim, S.-G., 2005, "Design Considerations for MEMS-Scale Piezoelectric Mechanical Vibrational Energy Harvesters," *Integrated Ferroelectrics*, Vol. 71, pp. 121~160.
- (16) Kim, J. E. and Kim, Y. Y., 2010, "Analysis of Piezoelectric Energy Harvesters of a Moderate Aspect Ratio with a Distributed Tip mass," *Journal of Vibration and Acoustics*, in review.
- (17) Renno, J. M., Daqaq, M. D. and Inman, D. J., 2009, "On the Optimal Energy Harvesting from a Vibration Source," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 320, No. 1-2, pp. 386~405.
- (18) Liao, Y. and Sodano, H. A., 2008, "Model of a Single Mode Energy Harvester and Properties for Optimal Power Generation," *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, No. 6, 065026.
- (19) Kim, J. E., Ryu, J. C. and Kim, Y. Y., 2010, "Piezoelectric Energy Harvester and Frequency Tuning Method for the Same," Korea Patent Application No. 10-2010-0025307.
- (20) Park, S., Lee J.-J., Yun, C.-B. and Inman, D. J., 2008, "A Built-in Active Sensing System-Based Structural Health Monitoring Technique Using Statistical Pattern Recognition," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No. 6, pp. 896~902.