

대각선 방향으로 분할된 압전 진동 에너지 수확 장치의 성능 연구

김 재 은*†

* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

Performance Study of Diagonally Segmented Piezoelectric Vibration Energy Harvester

Jae Eun Kim*†

* School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic Univ. of Daegu

(Received January 28, 2013 ; Revised April 2, 2013 ; Accepted April 16, 2013)

Key Words: Vibration Energy Harvesting(진동 에너지 수확), Piezoelectric(압전), Diagonal Segment(대각선 분할), Mode Sequence Change(모드 순서 변경)

초록: 본 연구에서 제안한 압전 진동 에너지 수확 장치는 기존 외팔보의 직사각형 면이 대각선을 따라 분할되어 2 개의 에너지 수확 단위로 구성되어 있다. 부 구조물은 주 구조물이 진동 에너지 원에 부착되는 방향과 반대 방향으로 주 구조물의 끝단에 부착되어 있으며, 각 에너지 수확 단위는 폐회로 상태의 고유 진동수가 일치하도록 설계되었다. 동일한 고유 진동수를 갖는 2 개의 구조물이 연결될 때 관찰되는 일반적인 현상과 달리, 제안된 구조에서는 고유 진동수 분리가 작으며, 1 차 및 2 차 모드의 순서가 바뀌어 나타난다. 이로 인해 출력 전력 역시 특정 주파수 근처에서 집중 생성된다. 상용 유한 요소 해석 소프트웨어를 사용하여 제안된 진동 에너지 수확 장치의 최대 생성 전력이 동일한 설치 영역 및 끝단 질량을 갖는 기존 외팔보 형태의 장치에 비해 실질적으로 향상됨을 보였다.

Abstract: This study proposes a piezoelectric vibration energy harvester composed of two diagonally segmented energy harvesting units. An auxiliary structural unit is attached to the tip of a host structural unit cantilevered to a vibrating base, where the two components have beam axes in opposite directions from each other and matched short-circuit resonant frequencies. Contrary to the usual observations in two resonant frequency-matched structures, the proposed structure shows little eigenfrequency separation and yields a mode sequence change between the first two modes. These lead to maximum power generation around a specific frequency. By using commercial finite element software, it is shown that the magnitude of the output power from the proposed vibration energy harvester can be substantially improved in comparison with those from conventional cantilevered energy harvesters with the same footprint area and magnitude of a tip mass.

- 기호설명

m_h	: 부가 질량-스프링계의 등가 질량	$t_{s,aux}$: 부 구조물의 기판 두께
k_h	: 부가 질량-스프링계의 등가 강성	t	: 압전 외팔보의 기판 두께
c_h	: 부가 질량-스프링계의 등가 감쇠	$V_{out}(P_{out})$: 출력 전압 (전력)
m_p	: 에너지 수확 장치의 끝단 질량	f_i	: i 번째 고유 진동수
t_p	: 압전층의 두께	f	: 주파수
$t_{s,host}$: 주 구조물의 기판 두께	$sc(oc)$: 폐(개) 회로 상태
		Z	: 전기 임피던스
		R_{ext}	: 등가 외부 저항
		q_r	: 전극 발생 전하량의 실수부
		q_i	: 전극 발생 전하량의 허수부

† Corresponding Author, jekim@cu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

압전 진동 에너지 수확 기술⁽¹⁾은 마이크로 에너지 수확 기술 중 가장 활발하게 연구되어 오고 있는 분야이다. 그러나, 진동 에너지 수확 장치의 적은 발생 전력량 및 발생 전력의 가진 주파수 의존성 등은 아직도 해결해야 할 연구 주제로 남아 있다.

압전 에너지 수확 장치의 발생 전력 증가를 위한 연구는 재료,⁽²⁾ 구조^(3~6) 및 전력 관리 회로⁽⁷⁾의 관점에서 살펴볼 수 있다. 또한, 의미 있는 양의 전력을 추출할 수 있는 동작 주파수 범위를 넓히기 위해 배열 구성(array configuration),^(8,9) 고유 진동수 조정법(frequency tuning mechanism),^(10,11) 주파수 고역 변환(frequency up-conversion)^(12,13) 및 비선형 진동(nonlinear vibration)^(14,15) 등이 이용되고 있다. 최근에는 Fig. 1(a)에 보인 바와 같이 기존의 끝단 질량이 있는 외팔보 형태의 압전 에너지 수확 장치에 질량-스프링 계를 추가하여 보다 넓은 가진 주파수 대역에서 전기 출력을 얻기 위한 연구 결과가 보고된 바 있다.^(16~20) 이들 대부분은 동흡진기(dynamic vibration absorber) 이론을 기반으로 두 구성 단위 간의 등가 질량 비율에 따라 발생하는 고유 진동수 분리를 이용하는 것이다. 그러나, Fig. 1(b)에 나타낸 것처럼 분리된 고유 진동수 사

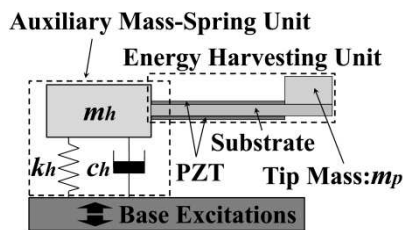
이의 주파수 대역에서 가진이 될 경우 유효한 전기 출력을 얻을 수 없다. 이를 해결하기 위해 그림에 보인 바와 같이 부가 탄성계의 등가 질량을 크게 하면 되지만 그 값이 너무 커서 전체 에너지 수확 장치가 비 현실적으로 커지게 되는 단점이 있다. 따라서, 동작 주파수 대역이 연속적으로 확장되었다기 보다는 어느 정도 유효한 크기의 가진이 조화 성분으로 분포되고 분리된 고유 진동수가 조화 성분들과 일치하는 경우에 사용하는 것이 유리하다. 한편, 더욱 최근의 관련된 연구⁽²¹⁻²³⁾에서는 부가 탄성계와 에너지 수확 단위의 부착 위치를 다르게 함으로써 발생 고유 진동 모드 순서가 바뀌고 고유 진동수 분리가 거의 발생하지 않게 하여 대부분의 전기 출력이 목적 주파수 근처에서만 발생할 수 있음을 보였다. 즉, Fig. 2에 나타낸 Configuration 'B'는 Configuration 'A'와는 달리 에너지 수확 장치의 설치 면적도 작으면서도 정해진 가진 주파수에서만 전기 출력이 집중되어 발생하게 된다.

본 연구에서는 이전 연구의 결과를 개선하여 더욱 효율적인 형태의 압전 진동 에너지 수확 장치를 제안하고 그에 대한 성능을 상용 유한 요소 해석 도구인 ANSYS를 사용하여 살펴보았다. 특히, 끝단 질량 및 설치 면적이 동일한 직사각형 외팔보 진동 에너지 수확 장치의 성능과 비교하여 제안된 진동 에너지 수확 장치의 전기 출력 값이 실질적으로 매우 향상됨을 보였다.

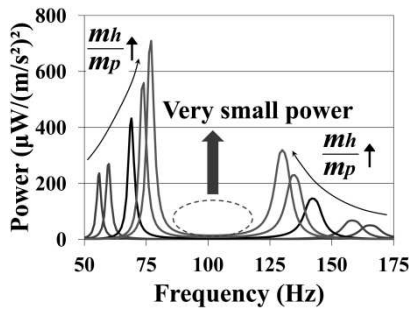
2. 새로운 압전 진동 에너지 수확 장치의 제안 및 해석적 성능 평가

2.1 압전 진동 에너지 수확 장치의 구성

본 연구에서 제안한 압전 진동 에너지 수확 장



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Piezoelectric vibration energy harvester with an added equivalent mass-spring unit and (b) its typical frequency response of output power at optimal impedance for various values of tip mass ratio

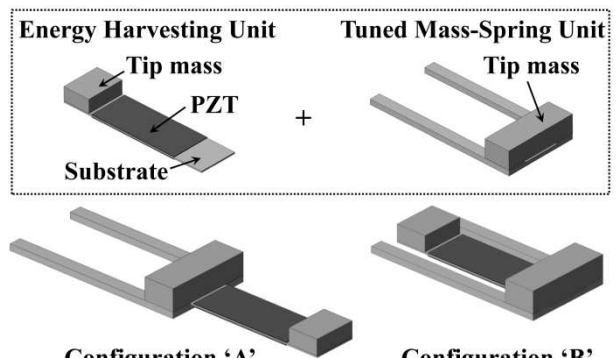


Fig. 2 Two configurations formed by an eigenfrequency-tuned mass-spring unit and an energy harvesting unit⁽²¹⁻²³⁾

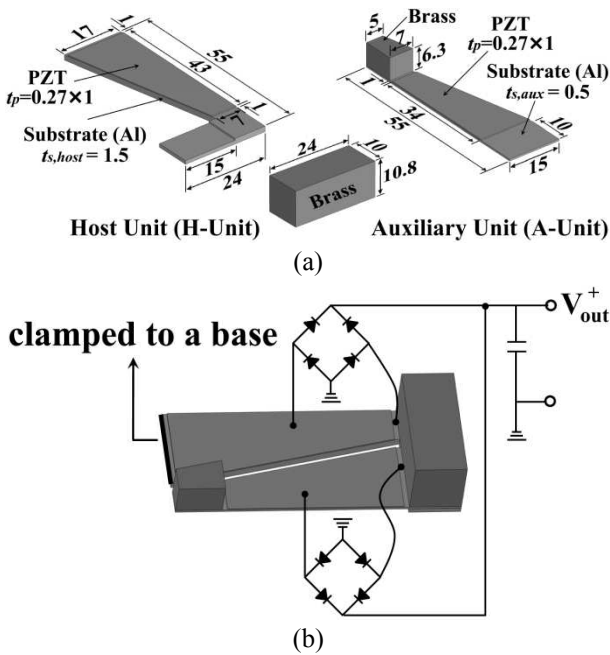


Fig. 3 (a) Component units (host and auxiliary) with the geometric dimensions shown in millimeters and (b) the proposed assembled piezoelectric vibration energy harvester

치의 구성⁽²⁴⁾을 Fig. 3에 나타내었다. 직사각형 외 팔보의 넓은 면이 대각선을 따라 2개의 삼각형 형상의 에너지 수확 단위로 나뉘어 있으며, 부 구조물(auxiliary unit: A-Unit)은 주 구조물(host unit: H-Unit)이 진동 에너지 원에 부착되는 방향과 반대 방향으로 주 구조물에 부착되어 있다. 이러한 구조적 특성은 제안한 압전 진동 에너지 수확 장치가 매우 독특한 전기-역학적 특성을 갖게 한다. 또한, 그림의 각 단위 구조물이 삼각형 형상을 함으로써 진동 가진원에 의한 변형시 변형을 균일화를 최대화하여 궁극적으로 압전 재료의 사용 효율성을 높일 수 있다.⁽²⁵⁾

각 단위 구조물의 끝단 질량은 황동(밀도: 8470 kg/m³, 탄성계수: 110 GPa) 재질로 되어 있으며, 이의 치수 조절을 통해 개별 에너지 수확 단위의 첫 번째 고유 진동수(폐회로 상태)가 일치하도록 설계되어 있다. 끝단 질량의 크기는 Fig. 3의 치수 및 제시된 물성치를 사용하여 주 구조물의 경우 22.0 g, 부 구조물의 경우 2.9 g이 됨을 알 수 있다. 압전 물질은 Piezo Systems 사의 PZT 5H4E를 사용하였으며, 본 연구에서 제안한 에너지 수확 장치의 압전 물질은 알루미늄 재질(밀도: 2700 kg/m³, 탄성계수: 69 GPa)의 기저(substrate) 한 쪽 면에만 부착되어 있다. Fig. 3(b)에 보인 바와 같이 궁극적으로 개별 에너지 수확 단위에서 수확되는 전기

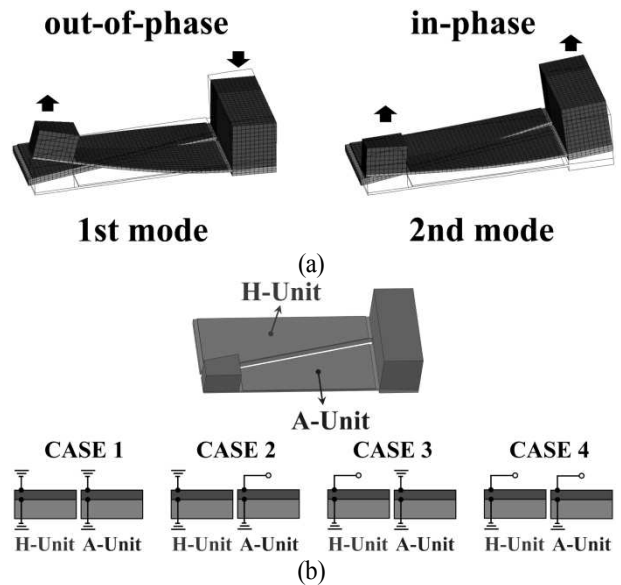


Fig. 4 (a) Reversed mode sequence and (b) four different extreme electrical states of the units

에너지는 각각의 정류 회로를 통한 직류가 병렬로 연결되어 출력된다. 그러나, 압전 진동 에너지 수확 장치의 전기 출력 성능 평가는 교류 출력 결과를 통해서도 충분하고 또한 매우 일반적이다.^(1,26,27)

2.2 압전 진동 에너지 수확 장치의 진동 특성

압전 구조물의 동적 해석이 가능한 ANSYS를 사용하여 제안된 진동 에너지 수확 장치의 구성 단위에 대한 진동 특성을 우선 파악하였다(Fig. 4(a) 참조). 압전 구조물의 고유 진동수는 압전 전극의 폐회로 및 개회로 여부에 따라 1개의 진동 모드 당 2개가 존재한다. 그런데, 압전 물질은 고전압 출력용이므로 동일한 출력 값이라도 전기 에너지 수확이라는 특성상 전류 생성이 보다 많은 폐회로 상태의 고유 진동수를 이용하는 경우가 일반적이다. 또한, 제안된 진동 에너지 수확 장치는 가진원의 주파수가 100 Hz인 경우를 고려하였으므로 우선 각 구성 단위의 폐회로 상태 고유 진동수⁽²⁷⁾가 가능한 100 Hz가 되도록 설계하였다. 이에 따라 각 구성 단위는 주 구조물의 경우 100.5 Hz(폐회로)/ 104.3 Hz(개회로), 부 구조물의 경우 100.3 Hz(폐회로)/ 104.6 Hz(개회로)의 값을 갖는다.

이렇게 설계된 단위 구조물들을 Fig. 3(b)의 제안된 형태로 구성하여 진동 해석을 수행하였다. 이에 대한 결과를 Fig. 4(a)에 나타내었다. 일반적으로 동일한 고유 진동수를 갖는 2개의 구조물이 연결될 경우(Fig. 2의 Configuration 'A' 및 Fig 1(a)

의 등가 모델), 1 차 모드에서는 동일 위상이, 2 차 모드에서는 반대 위상이 나타나며, 고유 진동수 분리가 발생한다. 그러나, 제안된 구조에서는 발생 모드 순서가 바뀌어 있음을 알 수 있다. 또한, Table 1 에 나타낸 고유 진동수 결과에서 폐회로 상태의 1, 2 차 고유 진동수 (특히, 2 차 고유 진동수)가 개별 구성 단위 폐회로 고유 진동수인 약 100 Hz 에서 크게 벗어나지 않음을 확인할 수 있다. 참고로 2 개의 구성 단위를 Fig. 2 의 Configuration 'A'와 같이 동일한 방향으로 구성할 경우 폐회로 상태의 고유 진동수는 63.3 Hz 및 145.2 Hz 로 매우 크게 분리가 된다. 또한, 제안된 진동 에너지 수확 장치는 2 개의 에너지 수확 단위에 압전 물질이 각각 존재하므로 Fig. 4(b)에 나타낸 바와 같이 회로 상태의 조합에 따라 각 모드 당 총 4 개의 고유 진동수가 존재하고 이를 Table 1 에 모두 나타내었다.

2.3 압전 진동 에너지 수확 장치의 출력 특성

제안된 진동 에너지 수확 장치에 대해 ANSYS 를 이용하여 출력 전압 및 전력 특성을 살펴 보았다. 우선 각 구성 단위가 기저 가진원에 부착되어 독립적으로 동작할 경우의 출력 전압/전력 특성을 단위 가속도 가진에 대해 Fig. 5 에 나타내었다. 기저의 가속도 (a_b) 가진은 변위 (u_b) 경계 조건 ($u_b = a_b/\omega^2$, ω 는 각 진동수)을 이용하였다. 그림의 결과는 외부 부하를 의미하는 등가 저항 R_{ext} 가

Table 1 Eigenfrequencies of the design shown in Fig. 4 corresponding to each electrical state (unit: Hz)

	f_1	f_2
CASE 1 (f^{sc-sc})	89.5	103.3
CASE 2 (f^{sc-oc})	91.6	104.5
CASE 3 (f^{oc-sc})	90.6	106.0
CASE 4 (f^{oc-oc})	93.1	106.7

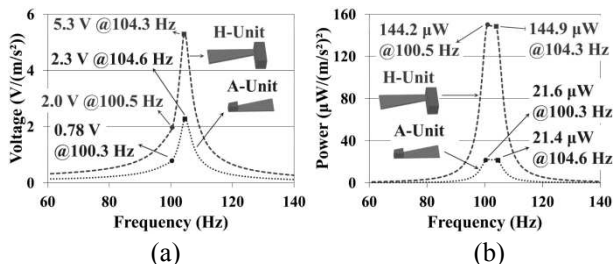


Fig. 5 (a) Electrical output voltage and (b) power of each unit in stand-alone operations

압전 전극에 부착된 상태이며 등가 저항의 크기가 에너지 수확 장치의 주파수 별 내부 임피던스 Z 의 크기와 같은 경우를 고려한 것이다. 이는 곧 주파수별로 추출할 수 있는 최대 전압과 전력을 의미한다. 유한 요소를 사용하여 주파수 별 최적 등가 저항의 크기를 구하기 위해서는 압전 에너지 수확 장치에 단위 전압을 가한 후 전극에서 발생하는 전하량을 이용하여 다음 식에 의해 구한다.^(26,27)

$$R_{ext}^{optimal} = \frac{1}{2\pi f \sqrt{q_r^2 + q_i^2}} \quad (1)$$

출력 전력 P_{out} 은 출력 전압이 V_{out} 이라고 할 때, 다음 식에 의해 구하였다.

$$P = \frac{V_{out}^2}{2R_{ext}} \quad (2)$$

Fig. 5 에 보인 바와 같이 일반적인 외팔보형 압전 진동 에너지 수확 장치의 출력 전력은 폐회로 또는 개회로 상태의 고유 진동수 중 어느 하나가 외부 가진 주파수와 일치할 때 동일한 최대값을 갖지만 전류/전압 출력 특성은 서로 다르다.^(1,27)

앞에서 살펴 본 제안된 진동 에너지 수확 장치의 독특한 진동 특성에 기인한 전기 출력 특성을 Fig. 6 에 나타내었다. 주목할 사항은 서로 전기적으로 연결되어 있지 않은 2 개의 에너지 수확 단

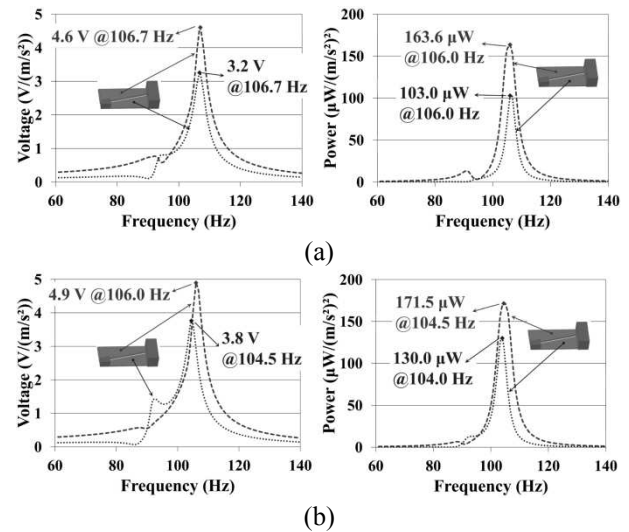


Fig. 6 Electrical outputs of each unit operating in the proposed configuration when one of the units is under (a) the open-circuit status or (b) short-circuit status

위가 존재하므로 각 단위에서 추출할 수 있는 최대 전압과 전력은 다른 쪽의 전기-역학적 상태에 따라 다르다는 것이다. 즉, 예를 들면, 주 구조물에서 얻어낼 수 있는 최대 전기 출력은 부 구조물의 회로 연결 상태에 따라 다르다. 이는 실제의 외부 부하가 연결된 단위에서 전기 에너지가 출력되면 그에 따른 해당 단위의 변형 에너지의 감소 및 강성 증가가 이뤄지고 전체 구조물의 진동 특성이 달라지기 때문이다. Fig. 6의 출력 전력 특성을 보면 상대 단위 구조물이 폐회로 상태일 때, 최대 생성 전력은 커지고 해당 주파수는 개회로 상태일 때 보다 낮아지는 것을 알 수 있다. 따라서, 전기 출력 특성 평가를 위해 본 연구에서 선택한 방법은 한 쪽 단위 구조물의 전기적 양 극한 상태인 폐회로 및 개회로 상태에 대해 다른 한 쪽의 전기 출력을 식 (1) 및 (2)에 의해 각각 구하였다. 이에 따르면 제안된 압전 진동 에너지 수확 장치의 교류 출력 전력은 외부 부하 등 저항값에 따라 주 구조물의 경우 163.6~171.5 $\mu\text{W}/(\text{m}^2)^2$ 의 범위를 가질 것이며, 최대 전력 발생 주파수 역시 104.5~106.0 Hz의 범위를 갖게 된다. 또한, 부 구조물에서의 출력 전력은 103.0~130.0 $\mu\text{W}/(\text{m}^2)^2$ 의 범위를 가지며, 최대 전력 발생 주파수는 104.0~106.0 Hz의 범위를 갖는다. 그리고, 앞서 기술한 바와 같이 각각의 단위 구조물에는 정류 회로가 부가 되어 그 직류 값이 합해지므로, 정류 회로의 전압 강하를 무시한다면 위에서 제시한 각 단위 구조물의 평균 생성 전력값의 합이 제안된 진동 에너지 수확 장치의 근사 전기 출력 값으로서 예측할 수 있다.

2.4 기존 외팔보 구조와의 성능 비교

제안된 압전 진동 에너지 수확 장치의 출력 전력 향상 정도를 확인하기 위해 동일한 설치 면적 및 끝단 질량의 크기를 갖는 직사각형 외팔보 에너지 수확 장치의 결과와 비교하였다. 그런데, 비록 제안된 에너지 수확 장치의 구성 특성으로 인해 2 번째 모드의 고유 진동수가 가진 주파수인 100 Hz 근처에 있지만, 합리적인 비교를 위해 설계 수정을 하였다. 즉, Table 1 및 Fig. 6에 보인 바와 같이 최대 전력은 CASE 2 및 3의 2 번째 고유 진동수에서 발생 했으므로 이를 99~101 Hz가 되도록 하였다. 이를 위해 Fig. 3(a)에 보인 주 구조물 및 부 구조물의 끝단 질량의 높이를 각각 12 mm 및 7 mm로 변경하여 폐회로 상태의 고유 진동수가 가능한 95 Hz가 되도록 하였다. 이에 따라 $\mu\text{W}/(\text{m}^2)^2$ ($= (196.2+186.2)/2 + (148.7+126.4)/2$)로서

Table 2 Eigenfrequencies of an adjusted design corresponding to each electrical state (unit: Hz)

	f_1	f_2
CASE 1 (f^{sc-sc})	84.9	98.1
CASE 2 (f^{sc-oc})	86.8	99.3
CASE 3 (f^{oc-sc})	86.0	100.6
CASE 4 (f^{oc-oc})	88.3	101.4

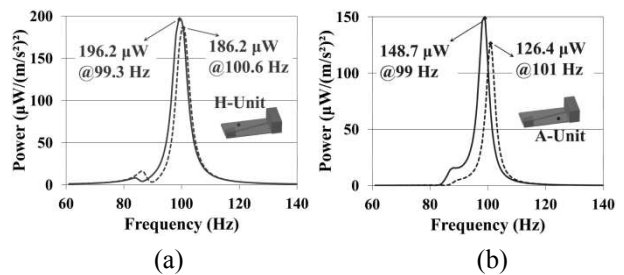


Fig. 7 Power outputs from the (a) host unit and (b) auxiliary unit of the proposed vibration energy harvester (adjusted): solid and dotted lines are maximum and minimum values, respectively

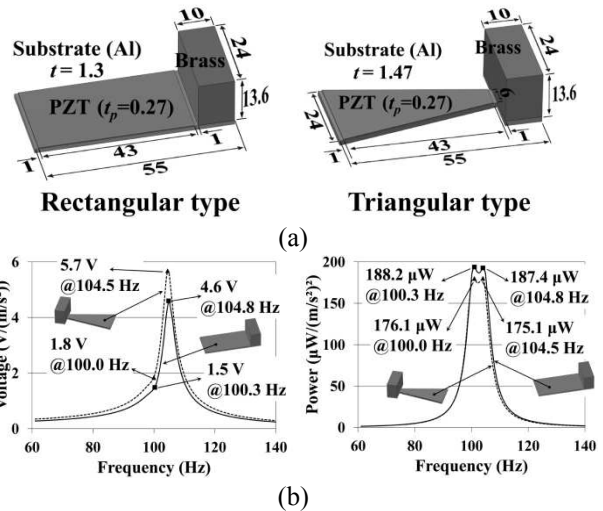


Fig. 8 (a) Rectangular and triangular-type vibration energy harvesters in comparison and (b) their electrical outputs

각 구성 단위의 고유 진동수는 주 구조물의 경우 95.1 Hz (폐회로)/ 98.8 Hz (개회로), 부 구조물의 경우 95.3 Hz (폐회로)/ 99.4 Hz (개회로)의 값을 갖게 된다. 따라서, 설계 변경에 따른 전체 에너지 수확 장치의 고유 진동수 해석 결과를 Table 2에 나타내었다. 또한, 수정된 설계의 전기 출력 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이를 통해 외부 가진원이 100 Hz인 경우 근사적인 출력 전력값은 328.8

예측할 수 있다.

비교 대상으로 고려한 직사각형 또는 삼각형 형상의 외팔보 진동 에너지 수확 장치의 구성/치수 및 전기 출력 결과는 Fig. 8 에 나타내었다. 치수는 Fig. 3 의 경우에서와 같이 모두 mm 단위로 나타내었다. 각각의 진동 에너지 수확 장치는 폐회로 상태의 고유 진동수가 100 Hz 에 최대한 가깝게 위치하도록 설계되었다. 끝단 질량 및 설치 면적은 두 경우 모두 약 27.6 g 및 24×55 mm² 로서, 수정된 설계안의 값과 거의 동일하다. 그러나, 최대 출력 전력은 직사각형 형상의 경우 약 188.2 $\mu\text{W}/(\text{m/s}^2)^2$, 삼각형 형상의 경우 176.1 $\mu\text{W}/(\text{m/s}^2)^2$ 로서 제안된 에너지 수확 장치의 출력 전력이 약 70% 이상 향상된 값을 갖는 것으로 파악되었다. 특히, 삼각형 형상의 경우에는 변형률이 압전 물질 전체에 최대한 균일하게 분포함으로써 발생 전력 및 내구성 관점에서 장점이 있으나, 현재의 비교 대상은 동일 설치 면적을 가짐으로써 실제 압전 물질의 양이 직사각형 형상에 비해 약 62%로 감소하였다. 따라서, 발생 전력 크기 역시 직사각형 형상의 진동 에너지 수확 장치에 비해 오히려 다소 작다.

3. 결 론

고유 진동수가 동일한 2 개의 삼각형 형상의 에너지 수확 단위를 이용하여 진동 에너지 수확 장치를 구성하였으며, 모드 순서 변경을 통해 전기 출력량을 증가시킬 수 있었다. 이는 변형 에너지가 큰 동일 위상 모드에 해당하는 고유 진동수가 거의 이동 하지 않아 가진 주파수 근처에서 출력 전력이 집중된 결과이며, 또한 각각의 에너지 수확 단위의 형상이 삼각형으로서 직사각형에 비해 더욱 균일한 변형을 발생시켜 효과적인 전기 에너지 변환을 유도하였기 때문이다. 해석 결과를 통해 제안된 압전 진동 에너지 수확 장치는 동일한 설치 면적 및 끝단 질량을 갖는 직사각형 및 삼각형 형상의 외팔보 진동 에너지 수확 장치에 비해 70%가 넘는 출력 전력 향상을 가져움을 보였다.

후 기

이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (No. 0003494).

참고문헌

(1) Erturk, A. and Inman, D. J., 2011, *Piezoelectric*

Energy Harvesting, John Wiley & Sons, Ltd., United Kingdom.

- (2) Islam, R. A. and Priya, S., 2006, "Realization of High-Energy Density Polycrystalline Piezoelectric Ceramics," *Applied Physics Letters*, Vol. 88, 032903.
- (3) Wang, Z. and Xu, Y., 2007, "Vibration Energy Harvesting Device based on Air-spaced Piezoelectric Cantilevers," *Applied Physics Letters*, Vol. 90, 263512.
- (4) Kim, J. E. and Kim, Y. Y., 2009, "Shape Design of a Cantilever-type Piezoelectric Energy Harvester," *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference (Sokcho, Korea)*, pp. 456~457.
- (5) Ma, P. S., Kim, J. E. and Kim, Y. Y., 2009, "Topology Optimization of a Cantilevered Piezoelectric Energy Harvester Having a Vibrating Base," *Proceedings of the KSME Fall Annual Meeting (Pyeongchang, Korea)*, pp. 432~434.
- (6) Rupp, C. J., Evgrafov, A., Maute, K. and Dunn, M. L., 2009, "Design of Piezoelectric Energy Harvesting Systems: A Topology Optimization Approach Based on a Multilayer Plates and Shells," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 20, pp. 1923~1939.
- (7) Wickenheiser, A. M. and Garcia, E., 2010, "Power Optimization of Vibration Energy Harvesters Utilizing Passive and Active Circuits," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 21, pp. 1343~1361.
- (8) Ferrari, M., Ferrari, V., Guizzetti, M., Marioli, D. and Taroni, A., 2008, "Piezoelectric Multifrequency Energy Converter for Power Harvesting in Autonomous Microsystems," *Sensors and Actuators A*, Vol. 142, pp. 329~335.
- (9) Kim, J. E., 2010, "Design of a Vibration-powered Piezoelectric Energy-harvesting Module by Considering Variations in Excitation Frequency," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 5, pp. 637~644.
- (10) Challa, V. R., Prasad, M. G., Shi, Y. and Fisher, F. T., 2008, "A Vibration Energy Harvesting Device with Bidirectional Resonance Frequency Tunability," *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, 015035.
- (11) Eichhorn, C., Goldschmidtboeing, F. and Woias, P., 2009, "Bidirectional Frequency Tuning of a Piezoelectric Energy Converter Based on a Cantilever Beam," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 19, 094006.
- (12) Wickenheiser, A. M. and Garcia, E., 2010, "Broadband Vibration-Based Energy Harvesting Improvement Through Frequency Up-Conversion by Magnetic Excitation," *Smart Materials and Structures*, Vol. 19, 065020.

- (13) Jung, S.-M. and Yun, K.-S., 2010, "Energy-harvesting Device with Mechanical Frequency-up Conversion Mechanism for Increased Power Efficiency and Wideband Operation," *Applied Physics Letters*, Vol. 96, 111906.
- (14) Erturk, A., Hoffmann, J. and Inman, D. J., 2009, "A Piezomagnetoelastic Structure for Broadband Vibration Energy Harvesting," *Applied Physics Letters*, Vol. 94, 254102.
- (15) Ramlan, R., Brennan, M. J., Mace, B. R. and Kovacic, I., 2009, "Potential Benefits of a Non-linear Stiffness I an Energy Harvesting Device," *Nonlinear Dynamics*, Vol. 59, pp. 545~558.
- (16) Ma, P. S., Kim, J. E. and Kim, Y. Y., 2010, "Power-amplifying Strategy in Vibration-powered Energy Harvesters," *Smart Structures/NDE (Proc. SPIE, San Diego, USA, 7-11 March)*, Vol. 7643, pp. 7~11.
- (17) Kim, J. E., Ryu, J. C., Ma, P. S. and Kim, Y. Y., 2011, Korea Patent (Registration No. 10-1053256).
- (18) Aldrahem, O. and Baz, A., 2011, "Energy Harvester with a Dynamic Magnifier," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 22, pp. 521~530.
- (19) Ou, Q., Chen, X., Gutschmidt, S., Wood, A., Leigh, N. and Arrieta, A. F., 2011, "An Experimentally Validated Double-mass Piezoelectric Cantilever Model for Broadband Vibration-based Energy Harvesting," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 23, pp. 117~126.
- (20) Seo, M.-H., Choi, D.-H., Kim, I.-H., Jung, H.-J. and Yoon, J.-B., 2012, "Multi-resonant Energy Harvester Exploiting High-mode Resonances Frequency Downshifted by a Flexible Body Beam," *Applied Physics Letters*, Vol. 101, 123903.
- (21) Kim, J. E. and Kim, Y. Y., 2010, "A new Dynamic Vibration Absorbing Piezoelectric Energy Harvester: Analysis," *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference (Jeju, Korea)*, pp. 519~520.
- (22) Kim, J. E. and Kim, Y. Y., 2011, Korea Patent (Registration No. 10-1061591).
- (23) Kim, J. E. and Kim, Y. Y., 2011, "Nested Piezoelectric Energy Harvester with Mode Sequence Conversion," *International Symposium on Green Manufacturing and Applications (Seoul, Korea)*.
- (24) Kim, J. E., 2011, Korea Patent (Application No. 10-2011-0090732).
- (25) Goldschmidtboeing, E. and Woias, P., 2008, "Characterization of Different Beam Shapes for Piezoelectric Energy Harvesting," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 18, 104013.
- (26) 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, 065026.
- (27) Kim, J. E. and Kim, Y. Y., 2011, "Analysis of Piezoelectric Energy Harvesters of a Moderate Aspect Ratio with a Distributed Tip Mass," *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 133, 041010.