

모드 순서 전환된 2자유도계 압전 진동 에너지 수확 장치의 수학적 모델

Mathematical Model for a Mode-sequence Reversed Two-degrees-of-freedom Piezoelectric Vibration Energy Harvester

이 소 원* · 김 윤 영** · 김 재 은†

Sowon Lee, Yoon Young Kim and Jae Eun Kim

(Received April 9, 2013 ; Revised April 9, 2013 ; Accepted May 29, 2013)

Key Words : Piezoelectric Vibration Energy Harvesting(압전 진동 에너지 수확), Mode Sequence Reversion (모드 순서 전환), Mathematical Model(수학적 모델), Frequency-tuned mass-spring Unit(주파수 일치된 질량-스프링 단위)

ABSTRACT

A cantilevered piezoelectric energy harvester(PEH) and an auxiliary mass-spring unit can be integrated into a novel two-degrees-of-freedom PEH where its lowest eigenmode is not an in-phase modes but an out-of-phase mode. This typical behavior was shown to enhance output power considerably compared with its stand-alone counterpart. The objective of this study is to newly develop a continuum-based mathematical model suitable for efficient analysis of the mode-sequence reversed PEH. Once such a mathematical model is available, various physical behaviors can be analytically investigated for better designs. After a new mathematical model is developed, its validity is checked by using ANSYS results, in terms of resonant frequency, open-circuit voltage, and output power with a specified external resistance.

1. 서 론

에너지 수확(energy harvesting)⁽¹⁾이란 주변에 항상 존재하지만 쓸모없이 버려지는 진동, 열, 빛, 풍력 에너지 등을 유용한 전기에너지로 변환하는 기술을 의미한다. 특히, 에너지 변환 효율이 높은 압전 물질을 이용하여, 일상생활에서 얻기 쉬우면서도 에너지 밀도가 높은 진동 에너지를 효과적으로 수확하

고자 하는 연구가 매우 활발히 진행되어 왔다⁽²⁾. 저주파수 대역의 일반적인 주변 진동 환경을 고려하여 초기 대부분의 압전 진동 에너지 수확 장치는 저역 공진주파수 특성을 갖는 단순한 외팔보 구조를 취하였다. 따라서, 외팔보 구조의 압전 진동 에너지 수확 장치에 대한 다양한 수학적 모델의 정립 및 이를 통한 압전 진동 에너지 수확 특성의 파악이 초기 연구의 대부분을 차지하고 있다⁽²⁻⁶⁾.

그러나, 단순 외팔보 구조로는 여전히 부족한 발

† Corresponding Author; Member, School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu
E-mail : jekim@cu.ac.kr
Tel : +82-53-850-2657, Fax : +82-53-850-2710

* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University

** Member, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University

‡ Recommended by Editor SungSoo Na

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

생 전력의 양 및 가진 주파수 의존성 등의 문제를 효과적으로 해결할 수 없다. 따라서, 발생 전력 양의 증가를 위해 압전 소자의 개발⁽⁷⁾, 구조 변경 및 최적화^(8,9), 전력 관리 회로 개선⁽¹⁰⁾ 등에 대한 노력이 진행되어 왔다. 또한, 의미있는 양의 전력을 추출할 수 있는 동작 주파수 범위를 넓히기 위해 배열 구성, 고유진동수 조정법, 주파수 고역 변환 및 비선형 진동 등이 이용되고 있다⁽¹¹⁾. 최근에는 Fig. 1(a)에 보인 바와 같이 외팔보 형태의 압전 진동 에너지 수확 장치에 질량-스프링 계를 추가하여 고유진동수 분리 현상을 이용, 보다 넓은 가진주파수 대역에서 전기 출력을 얻기 위한 연구 결과가 보고되었다⁽¹²⁻¹⁴⁾. 그러나, 이러한 구조에서는 분리된 고유진동수 사이의 주파수 대역에서 의미 있는 전기 출력량을 얻기 위해 추가된 질량이 비현실적으로 매우 커야 하는 단점이 있다. 이와는 달리, Fig. 1(b)에 나타낸 진동 에너지 수확 장치는⁽¹⁵⁾ 고유진동수가 일치하는 탄성 보와 에너지 수확 보가 서로 반대 방향으로 부착된 구조로서, Fig. 1(a)와 같은 구조물의 고유진동 모드 순서가 전환되어 발생하며(Fig. 2 참조) 이로 인해 목적 가진주파수 근처에서의 발생 전력이 매우 향상된다. Wu 등⁽¹⁶⁾은 비슷한 구조의 압전 진동 에너지 수확 장치에 대해 유한요소 해석 및 실험에 의한 연구를 진행한 바 있다. 그러나, 아직까지 Fig. 1(b)와 같은 구조에 대한 수학적 모델이 개발되지 않아 설계 변수 별 전기 출력 특성에 대한

연구가 진행된 바 없다.

수학적 모델은 에너지 수확 장치의 초기 설계와 평가에 있어서 매우 중요한 도구이다. 외팔보 진동 에너지 수확 장치의 전기-역학적 특성에 대한 연구는 그동안 1 자유도계 집중 질량 모델^(2,5), 가정 모드법 기반 모델^(2,4-6), 연속체 기반 모델^(2-4,6) 및 유한요소 모델⁽¹⁷⁾을 통해 수행되어 왔다. 특히, Erturk^(2,3)에 의해 정립된 단일 외팔보 진동 에너지 수확 장치에 대한 오일러-베르누이 보 기반의 연속체 모델은 다른 수학적 모델보다 정확하면서도 각 설계 변수에 따른 성능의 변화를 효과적으로 확인 할 수 있다. 또한, Ou 등⁽¹⁴⁾은 끝단 질량을 포함한 두 외팔보가 일자로 연결된 형태의 2자유도계 진동 에너지 수확 장치에 대해 연속체 기반의 수학적 모델을 유도한 바 있다.

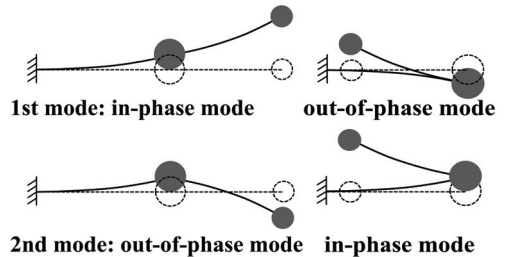
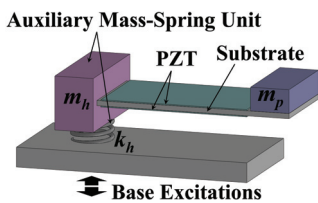
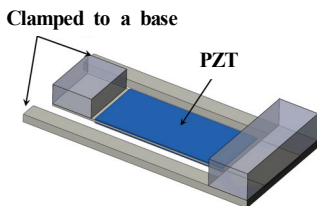


Fig. 2 Mode sequence characteristics for different connection types between two beams

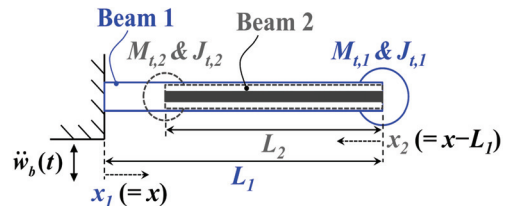


(a) Typical two-degrees-of-freedom PEH

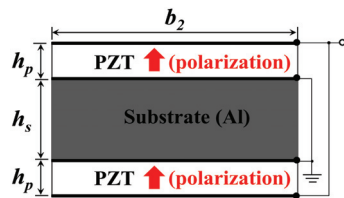


(b) Mode-sequence reversed PEH

Fig. 1 Two configurations of two-degrees-of-freedom PEHs



(a) Equivalent beam model



(b) Cross section

Fig. 3 Geometric properties of the mode-sequence reversed PEH with a bimorph beam 2 whose electrodes are connected in parallel

이 연구에서는 앞서의 연구 결과를 토대로 Fig. 1(b)의 모드 순서 전환된 2자유도계 압전 진동 에너지 수확 장치에 대해 연속체 기반의 수학적 모델을 처음으로 유도하였으며, 상용 유한요소 해석 소프트웨어의 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 수학적 모델의 유도

2.1 자유진동 운동방정식 및 고유모드

Fig. 1(b)의 모드 전환된 진동 에너지 수확 장치의 고유 모드를 구하기 위해 Fig. 3의 등가 외팔보 모델을 고려하였다. 출력 전류 증대를 위해 두 번째 보의 상/하면에 부착된 압전 재료의 전극은 상호 병렬 연결된 것으로 가정하였다. 시간 t 일 때 n 번째 보에 대한 관성 좌표계 x_n 에서의 변위를 w_n 이라고 하면, 각각의 보에 대한 자유 진동의 운동 방정식은 Hamilton의 원리에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$m_n \frac{\partial^2 w_n(x_n, t)}{\partial t^2} + (EI)_n \frac{\partial^4 w_n(x_n, t)}{\partial x^4} = 0 \quad (n=1, 2) \quad (1)$$

위 식에서 $(EI)_n$ 및 m_n 는 각각 n 번째 보의 (등)굽힘 강성과 단위 길이당 질량을 나타낸다. 또한, 경계에서의 기하학적 조건과 Hamilton 원리로부터 유도된 힘 평형에 관한 경계 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} w_1(0, t) = 0, \quad w_1'(0, t) = 0 \\ w_1(L_1, t) = w_2(0, t), \quad w_1'(L_1, t) = -w_2'(0, t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} M_{i,2} \ddot{w}_2(L_2, t) - (EI)_2 w_2''''(L_2, t) = 0 \\ J_{i,2} \dot{w}_2'(L_2, t) + (EI)_2 w_2''(L_2, t) = 0 \\ M_{i,1} \dot{w}_1(L_1, t) - (EI)_1 w_1''''(L_1, t) + (EI)_2 w_2''''(0, t) = 0 \\ J_{i,1} \dot{w}_1'(L_1, t) + (EI)_1 w_1''(L_1, t) + (EI)_2 w_2''(0, t) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

위 식에서 M_i 및 J_i 는 끝단 질량의 크기 및 질량 관성모멘트를 나타낸다. 특히, 식 (3)의 마지막 조건은 첫 번째 모드에서 2개의 보들이 서로 역위상 관계인 것을 나타낸다.

따라서, 2개 보의 변위 $w_n(x_n, t)$ ($n=1,2$)를 각각 시간에 대한 함수 $\eta_n(t)$ 와 고유모드 함수 $\phi_n(x_n)$ 의 곱으로 전개 후 식 (1)에 대입하면 다음과 같은 고유모드 함수를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_n(x_n) = a_{1,n} \sin(\beta_n x_n) + a_{2,n} \cos(\beta_n x_n) \\ + a_{3,n} \sinh(\beta_n x_n) + a_{4,n} \cosh(\beta_n x_n) \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서 $\beta_n^4 = (m_n / (EI)_n) \omega^2$ 이며, ω 는 각 고유진동수(rad/s)를 나타낸다. 모드 전환된 진동 에너지 수확 장치는 2개의 보로 구성되어 있으므로 식 (5)에서 8개의 계수를 결정해야 한다. 이를 구하기 위해 식 (3)과 (4)의 경계 조건 8개를 식 (5)에 대입하면 다음과 같은 행렬식을 얻게 된다.

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{a} = \mathbf{0} \quad (6)$$

위 식에 대한 열벡터 \mathbf{a} 를 얻기 위해 \mathbf{K} 행렬은 비정칙 행렬이 되어야 하며, 이를 통해 r 번째 고유모드에 대한 고유진동수 ω_r 을 구할 수 있다. 계수 열벡터 \mathbf{a} 는 다음과 같은 정규 직교성을 이용하여 구한다.

$$\begin{aligned} \int_0^{L_1} r \phi_1(x_1) m_{1,s} \phi_1(x_1) dx + \int_0^{L_2} r \phi_2(x_2) m_{2,s} \phi_2(x_2) dx \\ + r \phi_1(L_1) M_{i,1,s} \phi_1(L_1) + r \phi_1'(L_1) J_{i,1,s} \phi_1'(L_1) \\ + r \phi_2(L_2) M_{i,2,s} \phi_2(L_2) + r \phi_2'(L_2) J_{i,2,s} \phi_2'(L_2) = \delta_{rs} \end{aligned} \quad (7)$$

위 식에서 δ_{rs} 는 크로네커 델타이다.

2.2 전기-역학 연성방정식의 유도

모드 전환된 진동 에너지 수확 장치의 기저가 다음과 같이 가속도 진폭 A_0 , 주파수 ω 인 조화 가진을 한다고 가정한다.

$$\ddot{w}_b(t) = A_0 e^{j\omega t} \quad (8)$$

따라서, 식 (1)에 나타낸 자유진동 운동방정식에 외부 가진에 의한 항을 추가하여 첫 번째 보에 대한 운동방정식은 기저에 대한 상대 변위 $w_1 = w_b + w_{rel,1}$ 를 대입하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} (EI)_1 w_{rel,1}''''(x_1, t) + m_1 \ddot{w}_{rel,1}(x_1, t) \\ = -\ddot{w}_b(t) [m_1 + M_{i,1} \delta(x_1 - L_1)] \end{aligned} \quad (9)$$

그러나, 두 번째 보에는 압전 물질이 존재하기 때문에 외부 가진 뿐만 아니라 전기적 가진에 의한 영

향도 고려해야 한다. 따라서, 우선 식 (9)와 동일한 형태의 두 번째 보에 대한 운동방정식을 굽힘 모멘트 M 이 존재하는 식으로 변환해야 하며, 이를 응력에 대한 압전 연성 구성방정식을 이용하면 다음과 같이 새롭게 정의할 수 있다^(2,3).

$$M(x_2, t) = -(EI)_2 w_2''(x_2, t) + \theta v(t) [H(x_2) - H(x_2 - L_2)] \tag{10}$$

위 식에서 v 는 전압을 나타내며, 단위 계단 함수 H 를 사용하여 미분 후에도 전압 항이 사라지지 않도록 하였다. 또한, θ 는 상하 압전 물질의 전극 간의 연결이 병렬인 경우 다음과 같이 표현된다.

$$\theta = \frac{e_{31} b_2}{h_p} \left[\left(h_p + \frac{h_s}{2} \right)^2 - \frac{h_s^2}{4} \right] \tag{11}$$

식 (11)에서 e_{31} 은 압전 응력 상수(piezoelectric stress constant)를 나타낸다^(2,6).

따라서, 두 번째 보에 대한 운동방정식은 식 (10)에 나타난 굽힘 모멘트를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(EI)_2 w_{rel,2}''''(x_2, t) + m_2 \ddot{w}_{rel,2}(x_2, t) - \theta v(t) [\delta'(x_2) - \delta'(x_2 - L_2)] = -\ddot{w}_b(t) [m_2 + M_{t,2} \delta(x_2 - L_2)] \tag{12}$$

Table 1 Geometrical and Material properties of the mode-sequence reversed 2-dof PEH

	Beam 1	Beam 2	
		PZT	Substrate
Length(mm)	60	50	50
Width(mm)	10	10	10
Thickness(mm)	1.19	0.13	0.30
Mass density (kg/m ³)	2700	7800	2700
Elastic modulus (GPa)	69	62	69
e_{31} (C/m ²)	-	-19.8	-
ϵ_{33}^S (nF/m)	-	27.3	-
Tip mass(g)	12	2	
Damping ratio, ζ	0.015		

그리고, 식 (9) 및 (12)의 상대 변위 $w_{rel,1}$ 및 $w_{rel,2}$ 를 각각 정규화된 모드를 이용하여 전개하고, 새로운 좌표계 $x_2 = x - L_1$ 을 도입하면, 다음과 같이 1개의 역학적 연성방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{\eta}_r(t) + 2\zeta_r \omega_r \dot{\eta}_r(t) + \omega_r^2 \eta_r(t) - \alpha_r v(t) = F_r \ddot{w}_b(t) \tag{13}$$

위 식에서 ζ_r 은 r 번째 모드에서의 감쇠 비이며 α_r 은 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha_r = \theta \{ {}_r\phi_1'(L_2) - {}_r\phi_1'(0) \} \tag{14}$$

또한, 식 (13)의 기저 가진에 의한 항 F_r 은 다음과 같다.

$$F_r = - \left\{ m_1 \int_0^{L_1} {}_r\phi_1(x) dx + M_{t,1} {}_r\phi_1(L_1) + m_2 \int_{L_1}^{L_1+L_2} {}_r\phi_2(x-L_1) dx + M_{t,2} {}_r\phi_2(L_2) \right\} \tag{15}$$

전기적 연성방정식은 압전 연성방정식의 전기적 변위(electric displacement)를 가우스 법칙에 대입하여 다음과 같이 유도할 수 있다^(2,3).

$$C_p \dot{v}(t) + \frac{v(t)}{R_l} + \sum_{r=1}^{\infty} \alpha_r \dot{\eta}_r(t) = 0 \tag{16}$$

C_p 는 병렬 연결된 압전 층의 전기용량을 의미하며 다음과 같다.

$$C_p = 2\epsilon_{33}^S b_2 L_2 / h_p \tag{17}$$

위 식에서 ϵ_{33}^S 는 일정 변형률에서의 유전율(permittivity)을 의미한다.

Table 2 Comparison of resonant frequencies from the proposed mathematical model and ANSYS

	Proposed		ANSYS	
	f_{sc} (Hz)	f_{oc} (Hz)	f_{sc} (Hz)	f_{oc} (Hz)
1st mode (out-of-phase)	45.9	48.8	46.0	48.4
2nd mode (in-phase)	51.9	52.6	52.3	53.0

따라서, 식 (13) 및 (16)에 나타난 2개의 전기-역학 연성 방정식을 서로 연립하여 다음과 같이 출력 전압에 대한 주파수 응답 함수를 구할 수 있다.

$$v(t) = \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{-j\omega\alpha_r F_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}}{\frac{1}{R_l} + j\omega C_p + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega\alpha_r^2}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}} e^{j\omega t} \tag{18}$$

3. 유한요소 해석을 통한 검증

앞에서 유도한 모드 순서 전환된 진동 에너지 수확 장치에 대한 수학적 모델을 검증하기 위해 상용유한요소 해석 소프트웨어로서 ANSYS를 이용하였다. 검증에 사용된 모델의 기하학적 치수 및 재료의 물성치를 Table 1에 나타내었다. 보 및 끝단 질량은 각각 알루미늄 및 황동으로 이루어졌고, 압전 물질은 Piezo Systems사의 PSI-5H4E를 사용하였다. 단일 외팔보에 대한 연속체 기반의 수학적 모델에 이를 적용하여 Fig. 3에 나타난 보의 고유진동수를 구하면, beam 1의 경우 52.0 Hz, beam 2의 경우 폐회로(f_{sc}) 및 개회로(f_{oc}) 상태에서 각각 48.9 Hz 및 52.1 Hz로 계산되었다. 폐회로 상태란 출력 단자가 외부 전기적 부하 없이 연결되어 전기적 에너지 변환이 없는 상태이며, 개회로 상태란 출력 단자 사이에 가상의 무한대 저항이 연결되어, 변환된 전기 에너지가 압전 물질에 저장되어 있는 상태이다.

먼저 beam 1 및 beam 2로 구성된 Fig. 3의 진동 에너지 수확 장치에 대해 제안된 수학적 모델을 이용하여 폐회로 및 개회로 상태일 때의 고유진동수에 대한 결과를 Table 2에 비교하였다. 그리고, 식 (5)에 나타난 고유모드를 식 (7)의 정규 직교성을 이용하여 구하고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 단, 그림에서는 Fig. 3(a)에 나타난 좌표계 x 에 대하여 표현하였음을 유의하기 바란다. 그러나, 언급한대로 고유모드가 2개의 질량에 대해 각각 역 위상, 정 위상의 순서로 발생되었음을 확인할 수 있다. Fig. 5에는 개회로 상태의 출력 전압에 대한 주파수 응답을 나타내었다. 모두 ANSYS를 이용한 유한요소 해석 결과와 제안된 수학적 모델의 결과가 거의 일치함을

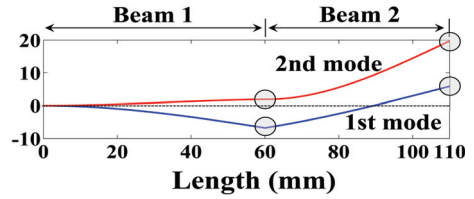


Fig. 4 Mass-normalized mode shapes of the mode-sequence reversed PEH

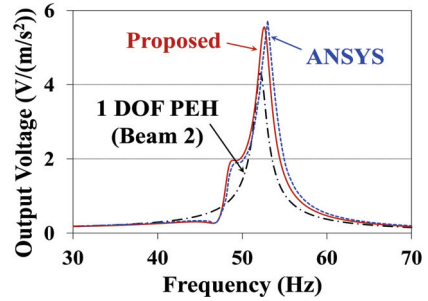


Fig. 5 Open-circuit voltage response from the proposed model, ANSYS, and a stand-alone PEH only of beam 2

확인할 수 있다. 개회로 출력 전압의 최대값으로서 ANSYS를 이용한 결과는 개회로 고유진동수 53 Hz에서 5.72 V/(m/s²)이었으며, 앞서 제안된 수학적 모델에 의해서는 개회로 고유진동수 52.6 Hz에서 5.55 V/(m/s²)의 출력 전압을 얻을 수 있었다. 이는 개회로 출력 전압에 있어서 약 3.1%의 오차에 해당한다.

Fig. 6은 100 kΩ의 외부 저항 R_l 이 출력 단자에 연결되었을 때 발생하는 전압 및 전력의 주파수 응답을 나타낸다. 발생 전력은 식 (18)에 의해 계산된 출력 전압의 크기를 V_{out} 이라고 할 때, $V_{out}^2 / 2R_l$ 에 의해 계산되었다. ANSYS 해석에 의하면 2번째 모드(역 위상)의 개회로 공진주파수인 53 Hz에서 출력 전압이 4.63 V/(m/s²)로서 최대 107.1 μW/(m/s²)²의 전력이 발생되었다. 그리고, 이 연구에서 제안한 수학적 모델을 이용한 최대 전력은 공진주파수 52.6 Hz에서 104.2 μW/(m/s²)²로 계산되었으며, 이때의 출력 전압은 4.56 V/(m/s²)이었다. 두 전력 값의 상대 오차는 2.8%에 해당한다. 또한, 구성 요소인 beam 2가 단일 진동 에너지 수확 외팔보로 사용될 경우 최대 발생 전력은 52.1 Hz에서 34.9 μW/(m/s²)² (이때의 출력 전압은 2.64 V/(m/s²))로서 이는 Fig. 3에

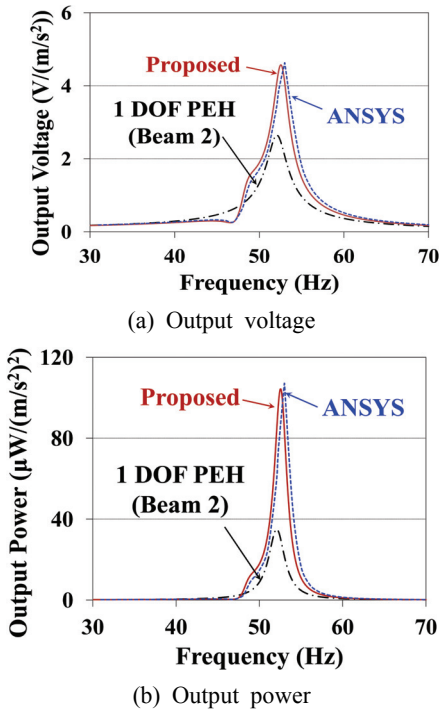


Fig. 6 Electrical outputs from the proposed model, ANSYS, and a stand-alone PEH only of beam 2 when they are connected with the external resistance of 100 kΩ

나타낸 진동 에너지 수확 장치의 구성을 적용할 경우 발생 전력이 상당히 향상될 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 끝단 질량이 있는 2개의 외팔보가 서로 반대 방향으로 부착된 2자유도계 진동 에너지 수확장치에 대한 수학적 모델을 처음으로 유도하였다. 적용된 연속체 기반의 수학적 모델은 상당히 정확할 뿐 아니라 관련된 설계 변수에 따른 성능 변화를 파악하기에 유용한 모델이다. 유도된 수학적 모델의 타당성은 모델에 의한 해석 결과와 상용 유한요소 해석 소프트웨어 ANSYS의 결과가 거의 동일하다는 것을 보임으로써 검증하였다. 이를 이용하면 각 보의 길이, 끝단 질량의 크기 등 설계 변수와 발생 전력의 크기 및 전력 발생 주파수 대역폭과의 관계에 대한 폭넓은 연구가 가능하다. 따라서, 제안된 수학적 모델은 앞으로

모드 전환된 진동 에너지 수확 장치의 설계와 평가에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(과제번호: 2012-0003494) 및 중견 연구자 지원사업(과제번호: 2012-0005693)의 지원을 받은 것으로 이에 감사드립니다.

References

- (1) Priya, S. and Inman, D. J., 2009, Energy Harvesting Technologies, Springer Science+ Business Media, LLC, New York.
- (2) Erturk, A. and Inman, D. J., 2011, Piezoelectric Energy Harvesting, John Wiley & Sons, Ltd., United Kingdom.
- (3) Erturk, A. and Inman, D. J., 2008, A Distributed Parameter Electromechanical Model for Cantilevered Piezoelectric Energy Harvesters, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 130, No. 4, 041002.
- (4) Sodano, H. A., Park, G. and Inman, D. J., 2004, Estimation of Electric Charge Output for Piezoelectric Energy Harvesting, Strain Journal, Vol. 40, No. 2, pp. 49~58.
- (5) Erturk, A. and Inman, D. J., 2008, Issues in Mathematical Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters, Smart Materials and Structures, Vol. 17, No. 6, 065016.
- (6) 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, No. 4, 041010.
- (7) Moon, S. E., Lee, S. Q., Lee, S.-K., Lee, Y.-G., Yang, Y. S., Park, K.-H. and Kim, J., 2009, Sustainable Vibration Energy Harvesting based on Zr-doped PMN-PT Piezoelectric Single Crystal Cantilevers, ETRI Journal, Vol. 31, No. 6, pp. 688~694.
- (8) Wang, Z. and Xu, Y., 2007, Vibration Energy Harvesting Device based on Air-spaced Piezoelectric Cantilevers, Applied Physics Letters, Vol. 90, No. 26, 263512.
- (9) Rupp, C. J., Evgrafov, A., Maute, K. and Dunn, J. N., 2007, Vibration Energy Harvesting from a Piezoelectric Cantilever, Journal of Applied Physics, Vol. 101, No. 12, 124302.

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, No. 16, pp. 1923~1939.

(10) 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, No. 13, pp. 1343~1361.

(11) Tang, L., Yang, Y. and Soh, C. K., 2010, Toward Broadband Vibration-based Energy Harvesting, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 21, No. 18, pp. 1867~1897.

(12) Kim, J. E., Ryu, J. C., Ma, P. S. and Kim, Y. Y., 2011, Korea Patent(Registration No. 10-1053256).

(13) Aldraihem, O. and Baz, A., 2011, Energy Harvester with a Dynamic Magnifier, *Journal of Intelligent Material System and Structures*, Vol. 22, No. 6, pp. 521~530.

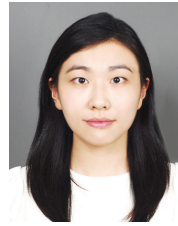
(14) Ou, Q., Chen, X., Gutschmidt, S., Wood, A., Leigh, N. and Arrieta, A. F., 2011, An Experimentally Validated Double-mass Piezoelectric Cantilever Model for Broadband Vibration-based Energy Harvesting, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 23, No. 2, pp. 117~126.

(15) Kim, J. E. and Kim, Y. Y., 2011, Korea Patent (Registration No. 10-1061591).

(16) Wu, H., Tang, L., Yang, Y. and Soh, C. K., 2013, A Novel Two-degrees-of-freedom Piezoelectric Energy Harvester, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 24, No. 3, pp. 357~368.

(17) Marqui Jr., C. D., Erturk, A. and Inman, D. J., 2009, An Electromechanical Finite Element Model for Piezoelectric Energy Harvester Plates, *Journal of Sound*

and Vibration, Vol. 327, No. 1-2, pp. 9~25.



Sowon Lee received her BS degree in Mechanical Engineering from Seoul National University, Korea in 2011. She is supposed to earn the MS degree from the same university in August, 2013. Her research interest includes the vibration energy harvesting using piezoelectric materials.



Yoon Young Kim received his BS and MS degrees from Seoul National University and his PhD degree from Stanford University, 1989. He has been on the faculty of School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University since 1991. His research interest includes the design optimization of multiphysics systems such as acoustostructural, structural-electromagnetic systems including the design of ultrasonic magnetostrictive transducers.



Jae Eun Kim received his PhD degree in Mechanical Engineering from Seoul National University, Korea in 2005. After he worked at LG electronics for actuator developments, he has been on the faculty of School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu since 2010. His main research interest is the smart material-based acoustic/vibration energy control and conversion including the computational optimization of magneto-electro-mechanical systems.