

광대역/대변위 진동에 기초한 역학적 에너지 수확기 개발

Development of a mechanical energy harvester based on broad-band and large-amplitude vibration

김필기* · 정지현* · 이수영* · 석종원†
Pilkee Kim, Jeehyun Jung, Sooyoung Lee and Jongwon Seok

로 고려하였다⁽⁴⁾.

1. 서 론

Bi-stable 에너지 수확기는 환경진동을 이용한 고효율 에너지 수확기의 대표적인 구조이다⁽¹⁾. 이러한 bi-stable 에너지 수확기는 interwell motion에 기인한 대변위 운동이 가능하여 상대적으로 큰 에너지를 낼 수 있다는 이점이 있다⁽²⁾. 하지만 대변위 운동이 발생하기 위해서는 상대적으로 큰 가진력이 요구되고, 따라서 bi-stable 에너지 수확기의 설계 시 interwell motion이 발생하는 최소 가진 진동량(임계 진동량)을 예측하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다. 따라서, bi-stable 에너지 수확기의 보다 정확한 수학적 모델은 이러한 임계 진동량 예측을 위하여 매우 중요하다. 본 연구에서는 자기장을 이용한 bi-stable 에너지 수확기의 한층 자세한 수학적 모델링 연구가 수행되었다. 이를 위해 자기력 및 토크를 해석적으로 구하였으며, 이를 캔틸레버 보구조의 수학기 모델에 반영하였다.

2. 지배 방정식

2.1 반발 자기력 모델

Fig. 1은 본 연구에서 고려하는 대표적인 bi-stable 에너지 수확기의 (a)개략도 및 (b)좌표시스템이다⁽³⁾. 캔틸레버 구조의 선단 자석과 고정 자석 사이의 반발 자기력을 이용함으로써, 두 개의 정적 평형 상태를 형성시킬 수 있다. 선단 자석은 고정자석에 기인한 균일한 외부 자기장 하에 놓여 있으며, 캔틸레버 보의 변위에 따른 반발 자기력을 받는다. 본 연구에서는 이러한 선단 자석을 current model

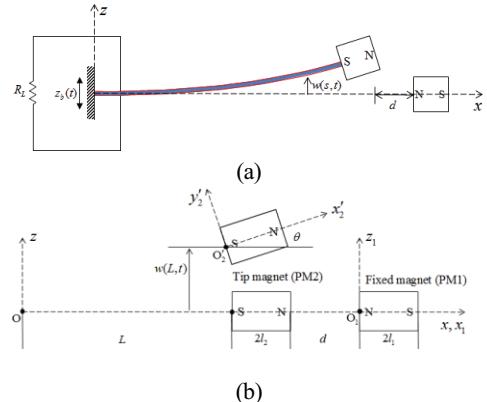


Fig. 1 Schematic of the bi-stable energy harvester

일련의 수학적 유도과정을 통하여 구하여진 선단 자석의 자기 반발력 및 토크는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{F} = \frac{\mu_0}{4\pi} Q_{m1} Q_{m2} \sum_{i,j=1,2} (-1)^{i+j+1} \left(\frac{\hat{U}_{ij}}{\hat{R}_{ij}^3} \mathbf{i} + \frac{\hat{W}_j}{\hat{R}_{ij}^3} \mathbf{k} \right), \quad (1a)$$

$$\mathbf{T} = \frac{\mu_0}{4\pi} Q_{m1} Q_{m2} \sum_{i,j=1,2} (-1)^{i+j+1} \left(\frac{\mathbf{X}_{ij}}{\hat{R}_{ij}^3} \right) \mathbf{j}, \quad (1b)$$

$$Q_{m1} = 4M_{s1} b_1 h_1, \quad Q_{m2} = 4M_{s2} b_2 h_2, \quad (1c)$$

$$\hat{U}_{ij} = (r_x + x_2^{(j)}) (\theta^2 + 1) - x_1^{(i)}, \quad (1d)$$

$$\hat{W}_j = (x_2^{(j)} \theta + w_L) (\theta^2 + 1), \quad (1e)$$

$$\hat{R}_{ij} = \sqrt{\hat{U}_{ij}^2 + \hat{W}_j^2}, \quad (1f)$$

$$\mathbf{X}_{ij} = (\hat{W}_j - w_L) \hat{U}_{ij} - (\hat{U}_{ij} - r_x + x_1^{(i)}) \hat{W}_j, \quad (1g)$$

여기에서 μ_0 는 자유공간의 자기 투자율, M_{s1} 및 M_{s2} 는 각각 고정 자석 및 선단 자석의 자화도이다. 또한 기호의 상침자에서 (i) 및 (j)는 자석 내 자하의 위치를 나타내기 위하여 사용되었다. 또한, w_L 및 θ 는 캔틸레버 보 선단의 변위와 회전을 의미한다.

† 교신저자: 중앙대학교 기계공학부

E-mail : seokj@cau.ac.kr

Tel : +82-2-820-5729, Fax : +82-2-3280-9982

* 중앙대학교 기계공학부 대학원

2.2 캔틸레버형 bi-stable 에너지 수확기

앞서 유도된 자기력을 적용하여 선단 질량을 갖는 바이모프 캔틸레버 보에 대한 지배 방정식 및 회로 방정식은 모멘트법과 변분법을 이용하여 다음과 같이 구하여졌다.

$$\frac{\partial^4 w(s,t)}{\partial s^4} + \frac{\partial^2 w(s,t)}{\partial t^2} + \Gamma_{x0} \frac{\partial^2 w(s,t)}{\partial s^2} \quad (2a)$$

$$-k_e V_e(t) \left[\frac{\partial \delta(s)}{\partial s} - \frac{\partial \delta(s-1)}{\partial s} \right] = -\frac{\partial^2 z_b(t)}{\partial t^2} + F_{NC},$$

$$\frac{dV_e(t)}{dt} + \frac{1}{R_L} V_e(t) + k_e \left(\frac{\partial^2 w(s,t)}{\partial s \partial t} \Big|_{s=1} \right) = 0, \quad (2b)$$

여기에서, 경계조건은 자세히 주어지지 않았으나, 선단 질량을 갖는 캔틸레버 보의 고정-자유단 경계 조건으로 주어진다⁽³⁾. m_i 는 캔틸레버 보 선단의 질량, J_i 는 선단 질량의 등가 관성모멘트, $2l_i$ 은 선단 질량의 길이를 의미한다. R_L 은 에너지 수확기와 연결된 부하, k_e 는 압전 바이모프의 전기기계적 커플링 상수, V_e 는 부하 사이의 전압차, b 는 캔틸레버의 폭, h_{ps} 는 압전막과 중심면 사이의 거리를 의미한다. 또한 F_{NC} 는 bi-stable 바이모프 에너지 수확기 모델의 비선형 힘을 나타낸다.

3. Bi-stable 압전 에너지 수확기의 에너지 수확 특성 분석

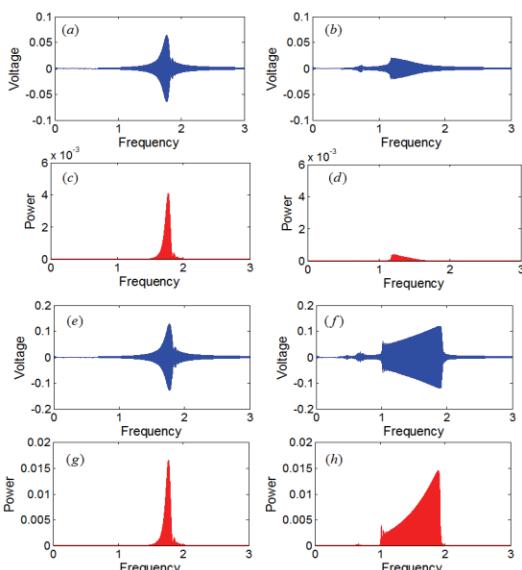


Fig. 2 Generated voltage and power at the mono-stable (first column) and bi-stable conditions (second column): (a)-(d) no interwell motion, (e)-(f) interwell motion

Bi-stable 에너지 수확기의 에너지 수확 특성을 확인하기 위하여, mono-stable 조건 및 bi-stable 조건에서의 생산 전압 및 이에 따른 파워가 계산되었다. Fig. 2는 각 조건에서의 생산 전압과 파워를 도시한 것이다. 그림에서와 같이, interwell motion이 발생하지 않은 경우, bi-stable 조건에서보다 mono-stable 조건에서 큰 전압이 발생되며, 이에 따라 환산된 파워 역시 mono-stable 조건에서 큰 것으로 나타났다. 따라서, 작은 가진 진동량 하에서 bi-stable 조건이 에너지 수확에 불리할 수 있음을 확인할 수 있다. 반대로, interwell motion이 발생한 경우, bi-stable 조건의 경우가 mono-stable 조건에 비해 월등히 넓은 동작 주파수 대역을 보여주고 있다. 이러한 결과는 상대적으로 큰 환경진동 하에서 bi-stable 에너지 수확기의 에너지 생산 효율이 mono-stable 구조에 비해 탁월한 성능을 가지고 있음을 보여준다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 살펴본 bi-stable 에너지 수확기의 에너지 생산 특성을 분석한 결과, 넓은 주파수 대역을 갖거나 크기가 큰 진동량을 갖는 환경 진동 하에서는, bi-stable 구조의 에너지 수확기를 설계하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2011-0013249).

참고 문헌

- (1) F. Cottone, H. Vocca, L. Gammaitoni, Nonlinear energy harvesting, Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 1–4.
- (2) L. Gammaitoni, I. Neri, H. Vocca, Nonlinear oscillators for vibration energy harvesting, Appl. Phys. Lett. 94 (164102) (2009) 2pp.
- (3) A. Erturk, J. Hoffmann, D. Inman, A piezo-magneto-elastic structure for broadband vibration energy harvesting, Appl. Phys. Lett. 94 (254102) (2009) 1–3.
- (4) E. P. Furlani, Permanent magnet and electro-mechanical devices – materials, analysis, and applications, New York, Elsevier, 2001.