Journal of Sensor Science and Technology
Vol. 20, No. 4 (2011) pp. 238-242
DOI : 10.5369/JSST.2011.20.4.238
pISSN 1225-5475/eISSN 2093-7563

FR-4 평판 스프링 기반 저주파수용 진동형 전자기식 에너지 하베스터의 제작과 그 특성

이병철 · 정귀상+

Fabrication of a Low Frequency Vibration Driven Electromagnetic Energy Harvester Using FR-4 Planar Spring and Its Characteristics

Byung-Chul Lee and Gwiy-Sang Chung+

Abstract

This paper describes the fabrication and characteristics of a low frequency vibration driven electromagnetic energy harvester. The fabricated generator consists of a permanent magnet of NdFeB, a FR-4 planar spring and a Copper cylinder type coil. ANSYS modal analysis was used to determine the resonant frequency for the generator. The implemented generator is capable of producing up to 550 mV peak-to-peak under 7 Hz frequency, which has a maximum power of 95.5 μW with load resistance of 580 Ω. This device is shown to generate sufficient power at different resonating modes, and the experimental and simulated results are discussed and composed.

Keywords : Energy Harvester, Electromagnetic, Vibration, FR-4

1. 서 론

최근 국제 유가의 상승으로 대체 에너지에 대한 관심이 증가되고 있다. 에너지 자립도가 낮은 우리나라의 경우, 경제 산업 구조상 화석 에너지의 소비를 줄이는 것이 쉽지 않으므로 에너지 절약 노력과 함께 무공해 대체 에너지의 개발이 절실히 요구되고 있다. 다양한 에너지 자원 중에서 진동을 이용한 발전은 태양 에너지에 비해 효율은 낮지만, 소형 소자의 전원으로 사용이 가능하고, 기기가 외부에 노출될 필요가 없어 디바이스에 내장하거나 삽입형 장치에 적용이 유리하다. 이와 같이 시간과 장소의 제약 없이 지속적인 사용이 가능하다는 잠재적 가능성으로 인해 전자기기나 무선 센서노드, 의료용 기기 등의 전원장치로 사용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3].

진동을 이용한 에너지 하베스팅 기술은 소재와 변환 방식에 따라 압전, 정전, 전자기식 방법으로 구분된다[4]. 그 중에서 전자기식 방법은 변환 효율이 낮고 집적화가 어려운 문제점이 있지만, 에너지 밀도가 높고 저주파수 설계가 가능하다는 장점을 가진다[5-7].

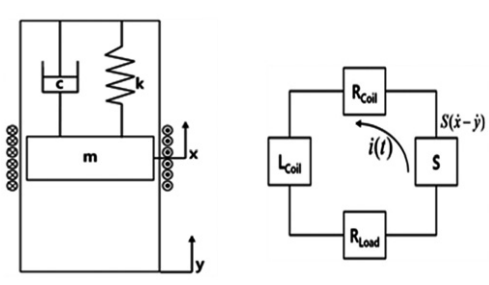
일반적으로 PCB 기판의 재료로 사용되는 FR-4는 기존의 스프링 재료로 사용된 Silicon이나 Copper보다 탄성계수가 낮아 저주파수에서 동작할 수 있는 스프링 제작이 용이하기 때문에 본 연구에서는 FR-4 평판 스프링을 이용한 저주파수용 진동형 전자기식 에너지 하베스터를 제작하고, ANSYS madal 해석과 Matlab software를 통해 그 특성을 평가하였다.

울산대학교 전기공학부(School of Electrical Engineering., University of Ulsan)
+Corresponding author: gschung@ulsan.ac.kr
(Received : Jun. 11, 2011, Accepted : Jul. 18, 2011)

2. 본 론

2.1 이 론

진동형 전자기식 발전기에서 발생된 유도 기전력은 시간에 대한 자속 변화율이며, 유도 전류는 자기력선속의 변화를 상쇄하는 방향으로 흐른다. Fig. 1은 진동형 전자기식 발전기의 (a) 기계적 시스템과 (b) 전기적 시스템을 나타낸 것으로 기계적 시스템은 댐핑(c), 스프링 상수(k), 질량(m)으로 구성되고, 전기적 시스템은 코일에서 발생된 유도 기전력(S), 부하 저항(R_{Load}), 코일 저항(R_{Coil}) 그리고 코일 인덕턴스 (L_{Coil})로 나타낸다.



(a) (b)

Fig. 1. (a) Mechanical and (b) electrical schematic diagrams of vibration based electromagnetic generator.

식 (1)은 기계적 시스템에서 힘의 평형 조건을 이용한 운동 방정식을 나타낸 것이다.

$$m\ddot{x}(t)+c(\dot{x}(t)-\dot{y}(t))+k(x(t)-y(t))=0 \quad (1)$$

이 시스템에서 자석에 전달되는 힘은 스프링과 댐퍼에 의한 두 가지가 있으며 식 (2)로 표현된다. 여기서, z는 발전기와 자석 간의 상대변위를 나타낸다.

$$p(t)=-[kz(t)+k\dot{z}(t)]\dot{y}(t) \quad (2)$$

전기적 시스템에서의 최대 전력은 시스템의 공진상태 $r=w/w_n=1$에서 발생하며 아래의 식 (3)으로 표현된다. 여기서 ω는 입력 주파수, Y는 발전기 변위, ζ는 댐핑을 의미한다.

$$P_{\max}=\frac{mY^2w^3}{4\zeta} \quad (3)$$

Fig. 1(b)는 전기적 시스템의 회로도를 나타낸 것이다. 식 (3)에서 댐핑(ζ)은 기계적 댐핑(ζ_m)과 전기적 댐핑(ζ_e)의 합을 의미하며 아래의 식 (4)로 표현된다.

$$P_s=\frac{mY^2w^3}{4\zeta}+\frac{Y^2w^2S^2}{8\zeta^2(R_L+R_c)} \quad (4)$$

식 (4)에서 $\frac{mY^2w^3}{4\zeta}$ 와 $\frac{Y^2w^2S^2}{8\zeta^2(R_L+R_c)}$ 는 기계적, 전기적 에너지 손실을 의미하고, 외부로부터 주파수와 변위가 주워졌을 때 발생되는 최대 전력은 아래의 식 (5)로 표현된다.

$$P=\frac{Y^2w^2S^2}{8\zeta^2(R_L+R_c)} \quad (5)$$

2.2 설계 및 제작

Fig. 2는 본 연구에서 설계된 전자기식 발전기의 일반적인 구조를 나타낸 것으로 크게 스프링, 몸체, 코일 부분으로 구성된다. 먼저, 스프링 부분은 영구자석(NdFeB)의 편향과 관성을 증가시키기 위해 캔틸레버 형태의 스프링 중앙에 영구자석이 위치하도록 설계했으며 지그를 이용하여 몸체에 고정시켰다. 지그와 몸체는 가공성이 우수한 아크릴을 사용했으며, 실린더 형태의 구리코일이 부착된 하단 부분과 연결된다. 코일은 0.1 T의 구리선을 사용하였으며 영구자석과 최대한 가깝게 위치하도록 설계하였다.

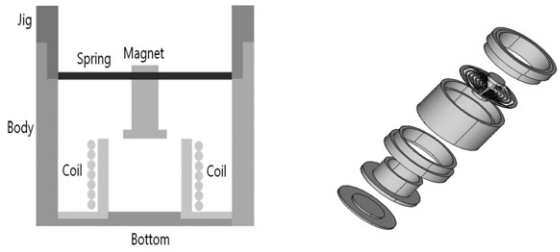


Fig. 2. Schematic structures of the fabricated generator.

스프링 설계에 있어 가장 고려할 부분은 공진 주파수를 결정하는 것으로 기존의 연구에서 사용된 스프링 재료(silicon, copper)들은 탄성계수가 높거나 제작 공정이 복잡하여 저주파수용 스프링 설계에 많은 어려움이 있었다[8]. 그러나 FR-4는 기존의 재료들과 비교하여 탄성계수가 낮고, 제작 공정 및 비용, 전기 · 열 · 기계적 성능이 우수한 특성을 가진다. Fig. 3은 스프링의 재료별 공진 주파수를 해석한 것으로 같은 스프링 형상에서 FR-4(7.22 Hz)가 Silicon(39.1 Hz)과 Copper(18 Hz)보다 낮은 공진 주파수를 가지는 것을 알 수 있다.

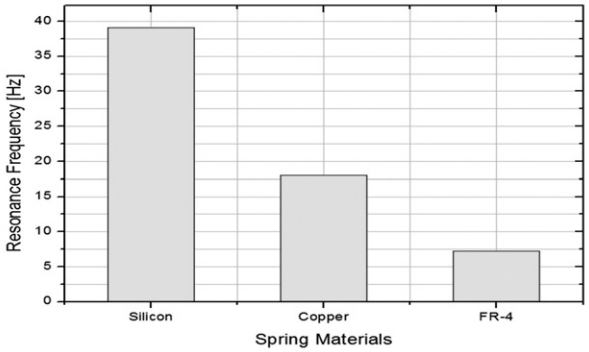
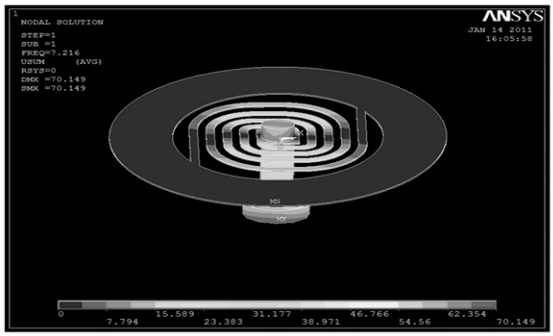
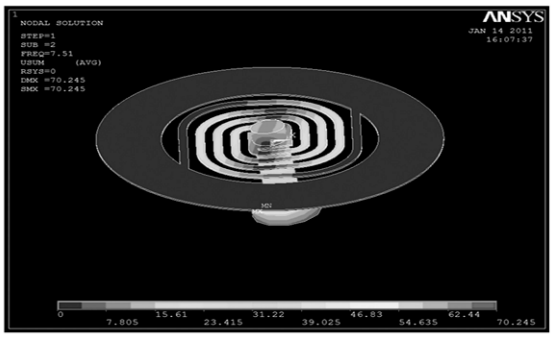


Fig. 3. Resonance frequency variations according to the spring materials.

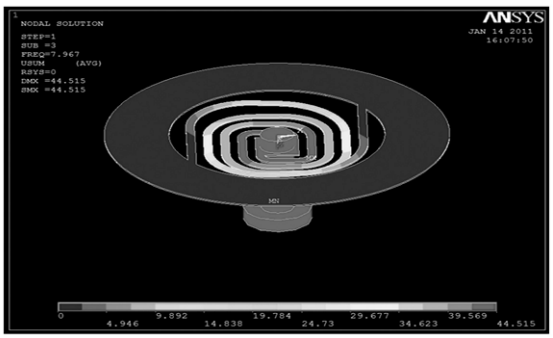
Fig. 4는 ANSYS modal 해석을 이용한 FR-4 스프링의 공진 주파수를 해석한 것으로 (a), (b), (c)는 각각 1, 2, 3차 모드에서의 공진 주파수를 나타낸 것이다. 본 연구에서 발전기의 최대 출력은 3차 모드의 7.97 Hz에서 발생하며 이때 스프링에 부착된 영구자석은 코일 방향 (z-축)으로 이동한다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Mechanical simulation results of magnet and FR-4 spring system (a) First mode shape(7.22 Hz) (b) Second mode shape (7.51 Hz) (c) Third mode shape(7.97 Hz).

Fig. 5는 중력에 의한 스프링의 편향을 해석한 것으로 영구자석이 위치한 스프링의 가운데 부분이 다른 부분에 비해 가장 큰 값을 나타내며 설계된 스프링의 중력에 의한 처짐은 약 4 mm로 나타났다.

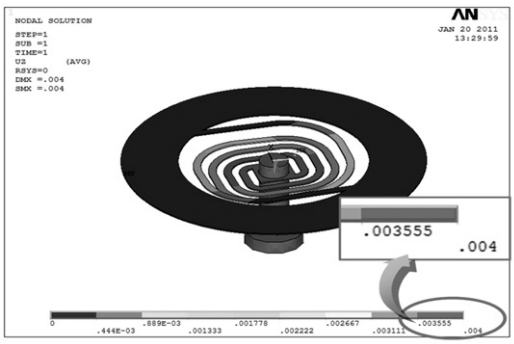
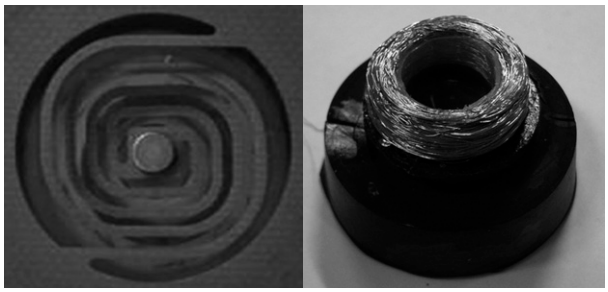


Fig. 5. Structure deflection in Z-direction under gravity.

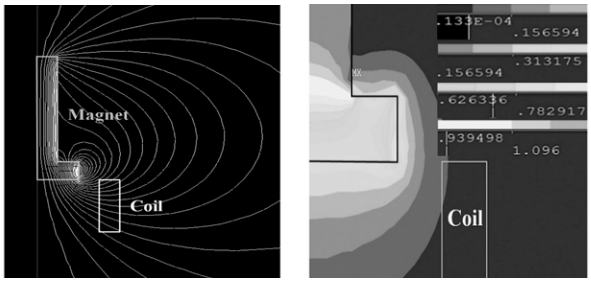
Fig. 6은 제작된 스프링과 코일 부분을 나타낸 것이다. 먼저 스프링은 일반적으로 PCB 기판의 재료로 사용되는 FR-4(0.2 T)를 이용하여 제작되며 스프링 가운데 부분에 상 · 하로 위치한 영구자석으로 구성된다. 코일 부분은 유도 기전력 증가를 위해 원통형으로 제작했으며 권선수에 따른 출력 특성을 알아보기 위해 다양한 권선수(400회, 800회, 1200회)로 제작했다.



(a) (b)

Fig. 6. Fabricated (a) FR-4 spring and (b) Copper coil.

Fig. 7은 설계한 발전기의 자기력선 분포와 자속 밀도를 나타낸 것이다. 자속 밀도는 자석 가장자리일수록 증가함으로 코일과 자석간 거리는 가능한 가깝게 위치해야 출력특성이 향상될 것이다. 따라서 본 연구에서는 자석의 하단에 지름이 큰 자석을 위치시켜 자석과 코일간 거리를 최소화하였다.



(a) (b)

Fig. 7. (a) Magnetic flux lines and (b) density distributions of fabricated generator.

2.3 특 성

Fig. 8은 본 연구에서 제작한 진동형 에너지 하베스터의 출력 특성 측정 및 평가에 사용된 장비를 나타낸 것으로 외부로부터의 자기장 영향을 줄이기 위해 발전기는 가진기와 일정 거리 떨어진 곳에 위치시켰다. 함수 발생기에서 생성된 주파수와 진폭 신호는 가진기를 통해 발전기에 전달되고, 발전기에서 발생한 출력은 오실로스코프를 통해 측정했다.

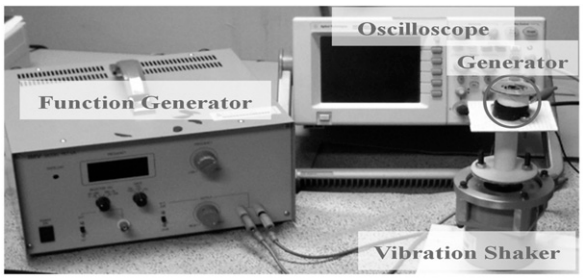


Fig. 8. Experimental setup for the evaluation of generator.

제작된 진동형 전자기식 발전기의 공진 주파수는 약 7 Hz로 ANSYS 시뮬레이션 결과와 동일하며 Fig. 9는 자석의 질량에

따른 출력 파형을 나타낸 것으로 (a) 7 Hz, (b) 9 Hz (c) 12 Hz의 공진 주파수와 1200회 권선수에서 최대 전압이 각각 550 mV, 92.6 mV, 36.7 mV로 나타났다.

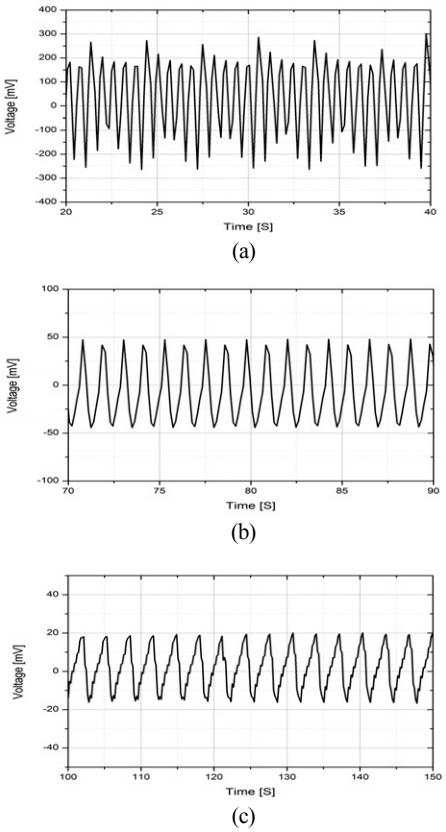


Fig. 9. Variations of measured voltage waveforms on resonance frequencies; (a) 7 Hz, (b) 9 Hz, (c) 12 Hz.

Fig. 10은 3가지 다른 공진 주파수와 권선수에 따른 출력 특성을 나타낸 것이다. 자석의 질량이 증가할수록 발전기의 공진 주파수는 감소하고 출력은 증가한다. 또한, 권선수에 따른 출력 특성을 알아보기 위해 400회, 800회, 1200회의 다양한 코일에서 측정을 하였다. 최대 전압은 공진 주파수와 권선수가 각각 약 7 Hz, 1200회일 때 약 550 mV의 개방회로 전압을 나타냈다.

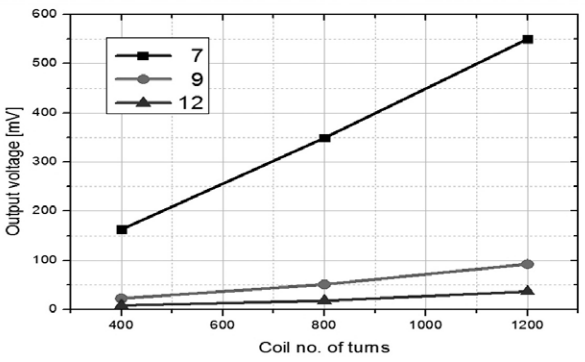


Fig. 10. Measured voltage vs. coil turns with different resonance frequencies.

Fig. 11은 Matlab software를 이용한 부하 저항에 따른 최대 전력을 나타낸 것으로 발전기의 최대 전력은 580 Ω 의 부하저항에서 약 95.5 ㎼로 나타났다.

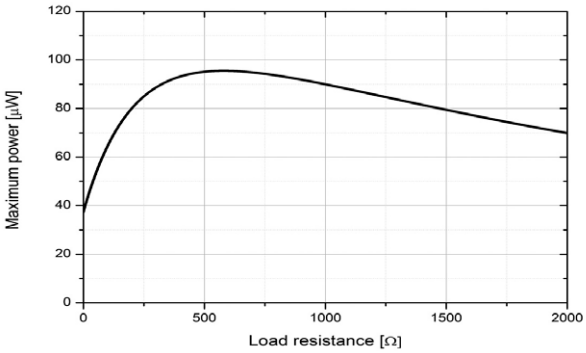


Fig. 11. Calculated power vs. load resistance.

3. 결 론

본 논문은 FR-4 스프링을 이용한 저주파수용 진동형 전자기식 에너지 하베스터의 설계 · 제작 및 특성에 관한 것이다. 특히, 인체에 적용이 가능한 저주파수에서 동작하도록 설계했으며 출력 특성 향상을 위해 실린더형 코일과 영구자석을 이용하였다. 제작된 발전기는 7 Hz의 저주파수에서 550 mV의 유도 가전력과 580 Ω 부하저항에서 95.5 ㎼의 최대 전력이 발생 가능하다.

앞으로 다양한 분야에서의 전원 장치로 활용하기 위해서는 정류기, 승압기 및 출력의 연속성을 강화하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소 지원으로 수행되는 차세대군용전원특화연구센터 사업과 2011년도 정부(교육과학기술부) 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0013831)의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

[1] H. B. Fang. J. Q. Lin, Z. Y. Xu, L. Dong. Chen, B. C. Cai, and Y. Liu, “Fabrication and performance of MEMS-based piezoelectric power generator for vibration energy harvesting”, *Microelectronics J.*, vol. 37, pp. 1280-1284, 2006.

[2] G. S. Chung and K. H. Yoon, “Design and analysis of ZnO piezoelectric micro power generators with low

frequency", *J. Kor. Sensors. Soc.*, vol. 18, no. 5, pp. 372-376, 2009.

[3] G. S. Chung and K. I. Ryu, "Design and analyses of vibration driven electromagnetic energy harvester with high power generation at low frequency", *JSST*, vol. 20, no. 1, pp. 25-29, 2011.

[4] S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. M. White, "Energy harvesting vibration sources for microsystems applications", *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 175-195, 2006.

[5] P. Glynne-Jones, M. J. Tudor, S. P. Beeby, and N. M. White, "An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems", *Sens. Actuators A*, vol. 110, pp. 344-349, 2004.

[6] C. R. Saha, T. O`Donnell, N. Wang, and P. McCloskey, "Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion", *Sens. Actuators A*, vol. 147, pp. 248-253, 2008.

[7] P. H. Wang, X. H. Dai, D. M. Fang, and X. L. Zhao, "Design, fabrication and performance of a new vibration-based electromagnetic micro power generator", *Microelectron. J.*, vol. 38, pp. 1175-1180, 2007.

[8] B. P. Mann, and N. D. Silms, "Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation", *Sound Vib. J.*, vol. 319, pp. 515-530, 2009.

이 병 철(Byung-Chul Lee)

- 2010년 2월 : 울산대학교(공학사)
- 현재 울산대학교 전기공학부(석사과정)
- 주관심분야 : 에너지 하베스팅

정 귀 상(Gwiy-Sang Chung)

- 1992년 3월 TUT(공학박사)
- 2004년 2월 UC Berkeley 연구교수
- 2009년 8월 Stanford University방문교수
- 현재 울산대학교 전기공학부 교수
- 주관심분야 : Wireless Sensor node, Energy harvesting, Graphene