

저 주파수용 FR-4 스프링 기반 고효율 진동형 전자기식 에너지 하베스터의 설계 및 제작

이병철 · 정귀상*

Design and Fabrication of a Low Frequency Vibration Driven High-Efficiency Electromagnetic Energy Harvester

Byung-Chul Lee and Gwi-Sang Chung*

Abstract

This paper describes the design and fabrication of a low frequency vibration driven high-efficiency electromagnetic energy harvester based on FR(Flame Resistance)-4 spring which converts mechanical energy into useful electrical power. The fabricated generator consists of a vertically polarized NdFeB permanent magnet attached to the center of spring and a planar type copper coil which has higher efficiency compare with cylindrical type coil. ANSYS finite analysis and Matlab were used to determine the resonance frequency and output power. The generator is capable of producing up to 1.36 V_{pp} at 9 Hz, which has the maximum power of 639 μW with a load resistance of 3.25kΩ.

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

1. 서론

얼마 전, 일본 북동부에서 발생한 지진 해일로 인한 원전 폭발의 위험성이 세계 각국의 이목을 집중시킨 적이 있다. 그 동안 공해물질의 배출이 적고, 발전 비용과 연료 공급의 안정성 등이 우수한 이유로 원자력 발전에 대한 에너지 의존도가 증가되고 있었다. 하지만, 사고발생에 따른 방사선 누출 및 폐기물처리와 같은 문제는 단기간에 회복이 어려우며 막대한 자본 및 환경적 문제를 발생시킨다는 점에서 최근 공해물질의 배출 없이 지속적으로 발전 가능한 친환경적인 재생 에너지에 대한 연구가 주목 받고 있다.

에너지 자립도가 낮은 우리나라의 경우, 경제 산업 구조상 화석 에너지 소비를 줄이는 것은 쉽지 않은 문제이므로, 에너지 절약과 함께 대체 에너지에 대한 개발이 지속적으로 요구된다. 주변에서 얻을 수 있는 대표적인 에너지원에는 태양, 열, 바람, 진동 등이 있으며, 그 중에서 진동을 이용한 에너지 변환 방법은 소형 전원 소자로 적용이 가능하고, 기기가 외부에 노출될 필요가 없어 장비에 부착하거나 삽입에 유리하다. 또한 시간과 장소의 제약 없이 지속적인 사용이 가능하다는 잠재적 가능성으로 인해 최근 소형 전자기기나 WSN(Wireless Sensor Nodes) 및 의료용 기기 등의 전원장치로

사용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3].

진동을 이용한 대표적 발전 기술에는 소재와 변환 방식에 따라 압전, 정전 그리고 전자기식으로 구분되며[4], 그 중 전자기식 방법은 집적화가 어려운 단점이 있지만, 에너지 밀도가 높고, 저 주파수 설계가 가능하다는 장점을 가진다 [5-8]. 또한 일상생활에서 발생되는 진동 주파수가 100 Hz 미만의 영역이라는 점을 고려한다면, 진동형 에너지 하베스터는 전자기식의 저 주파수로 설계되는 것이 바람직할 것이다.

따라서 본 연구에서는 저 주파수에서 동작이 가능하고 고효율의 발전 소자를 제작하기 위해서, 기존의 스프링 재료로 사용되는 실리콘이나 구리가 아닌 FR-4 스프링을 기반으로하는 평판형 구리 코일의 설계를 통하여 고효율 진동형 전자기식 에너지 하베스터를 제안하였다.

2. 본론

2.1 설계

Fig. 1은 본 연구에서 설계한 진동형 전자기식 에너지 하베스터의 구조를 나타낸 것으로, 스프링, 자석, 하우징 그리고 코일 부분으로 구성되며, 각각 FR-4, NdFeB 영구자석, 아크릴 그리고 구리

울산대학교 전기공학부(School of Electrical Engineering, University of Ulsan)

*Corresponding author: gschung@ulsan.ac.kr

(Received : Mar. 30, 2012, Revised : May 17, 2012, Accepted : Jul. 5, 2012)

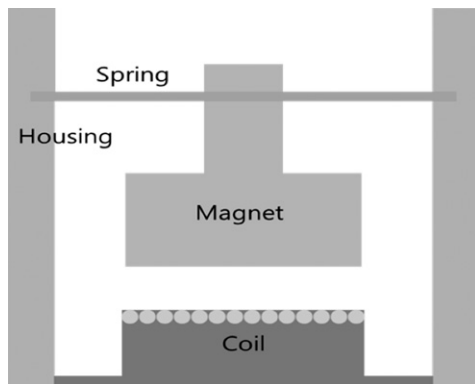


Fig. 1. Schematic diagram of energy harvester.

선을 이용하여 제작된다.

FR-4는 PCB(Printed Circuit Board) 기판의 주재료로 사용되는 물질로, 탄성계수가 낮아 (15 GPa ~ 20 GPa) 실리콘 (150 GPa) 과 구리 (120 GPa)와 비교하여, 저 주파수용 스프링 제작에 용이하다. 하우징의 재료로 사용된 아크릴은 가공성이 뛰어나고 가격이 저렴하며, 주변에서 쉽게 제작 및 가공이 용이한 장점을 가진다. 자석은 자속 밀도가 우수한 원통형 NdFeB 영구자석을 사용하였으며, 자석의 편향과 관성을 증가시키기 위해 자석은 스프링 중앙에 위치하도록 설계된다.

Fig. 2와 3은 ANSYS modal analysis를 이용한 스프링 형상에 대한 재료별 공진 주파수와 FR-4 스프링의 모드에 따른 형상 변화를 나타낸 것이다. 공진 모드 해석은 진동형 에너지 하베스터 스프링 설계에 있어 가장 중요한 부분 중 하나로 출력 특성 및 내구성 결정에 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서 사용된 스프링은 지름과 두께가 각각 20 mm, 200 μm 인 모델을 사용하였다.

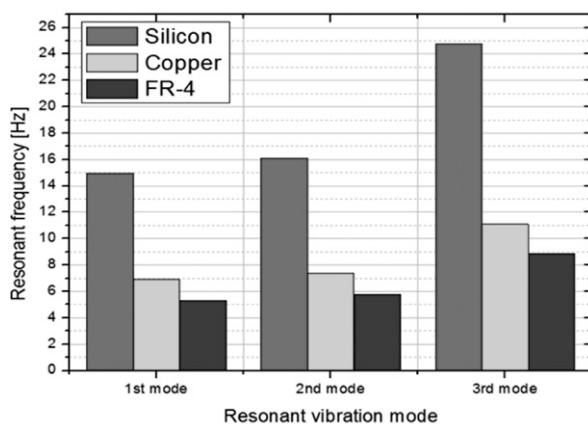
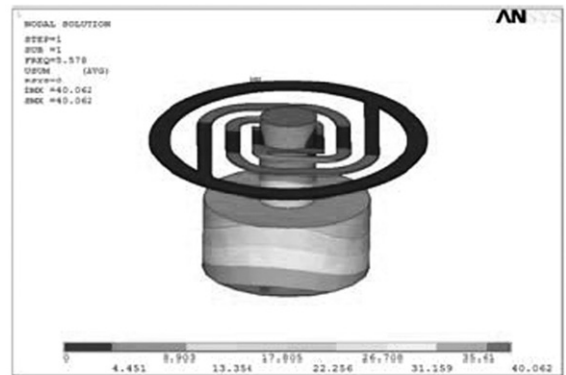
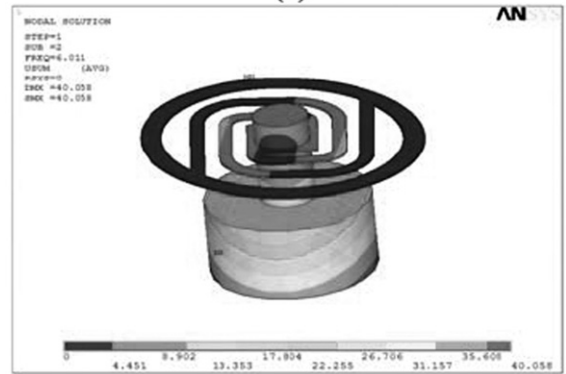


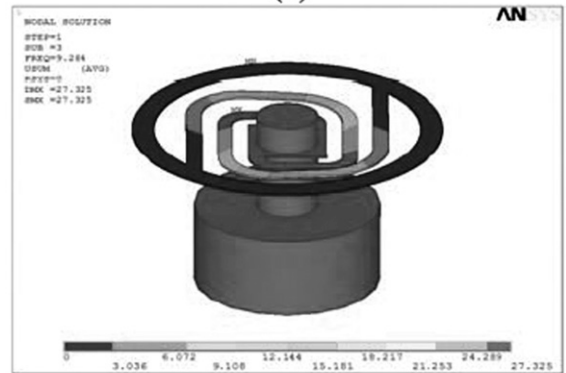
Fig. 2. Resonance frequency variations according to the spring materials with mode.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Mechanical simulation results of magnet and FR-4 spring system ; (a) first mode(5.57 Hz), (b) second mode(6.01 Hz), and (c) third mode shape(9.28 Hz).

기존의 연구에서 주로 사용된 실리콘이나 구리와 같은 스프링 재료들은 탄성계수가 높거나 제작 공정이 복잡하여 저 주파수용 스프링 설계에 많은 어려움이 있었다[9]. 그러나 FR-4는 기존의 재료와 비교하여 탄성계수뿐만 아니라, 제작 공정이 간단하고, 비용이 저렴한 장점을 가진다. 동일한 형상의 스프링에서 공진 주파수는 실리콘이 가장 높으며, 다음으로 구리, FR-4 순으로 낮게 나타났다. 또한 공진 모드가 증가할수록 주파수 격차가 증가하는 것을 알 수 있다.

FR-4 스프링의 공진 주파수는 1~3차 모드에서 각각 5.57 Hz, 6.01 Hz, 9.28 Hz 의 값이 나타났으며, 스프링의 최대 변위는 영구

자석이 코일 방향인 아래(z-축)로 이동하는 3차 모드에서 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 ANSYS static analysis를 이용하여 설계한 자석의 자기력선 분포 및 밀도를 나타낸 것이다. 자기력선 밀도는 자석의 가장자리에서 가장 높게 나타나므로, 코일과 자석간 거리는 가능한 가깝게 위치해야 출력 특성을 향상 시킬 수 있으며, 자기력선의 분포는 하단에 위치한 자석의 옆과 아랫부분에 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 코일의 면적은 자기장의 영향을 받을 수 있는 범위에서 최대한 넓게 설계되는 것이 바람직하다. 자기장의 범위는 자석의 종류와 형상에 따라 다르게 나타나므로 특정한 거리를 지정할 수는 없지만, 본 연구에서 사용된 자석의 경우는 약 20 mm 가량의 최대 거리가 나타났다.

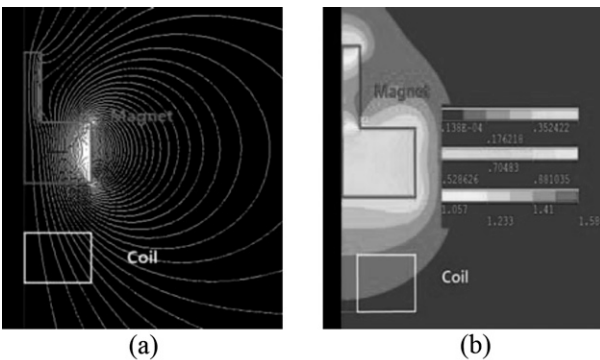


Fig. 4. (a) Magnetic flux lines and (b) density distributions of fabricated generator.

2.2 설계

Fig. 5는 기존에 보고된 FR-4 스프링과 구리 코일을 이용한 에너지 하베스터를 나타낸 것이다[10]. 제작된 FR-4 스프링의 지름과 두께는 각각 25 mm 와 200 μm 이며, 약 7 Hz 의 공진 주파수에서 최대 변위를 가진다. 자석은 상단 (4 Φ × 2 T), 가운데 (4 Φ × 10 T), 그리고 하단 (8 Φ × 2 T)으로 구성된 영구자석 (NdFeB, N35)들이 스프링 중앙에 위치하도록 제작하였다. 코일은 지름이 0.1 mm 인 구리 선을 1200회 감아 원통형으로 제작하였다.

Fig. 5의 FR-4 스프링의 경우 7 Hz 라는 낮은 공진 주파수에서 동작이 가능하지만, 영구자석에 의한 처짐 현상 (약 8 mm)이 심하게 발생하여 자석 선택의 제약이 발생하였다. 원통형 코일은 제작이 쉬운 장점이 있지만 자석의 두께가 크지 않으면 출력 특성을 향상시키는 것이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 자석의 하단에 코일을 위치시켜 자석 두께의 영향 없이 출력을 향상시키는 방법을 제안하였다.

Fig. 6은 제작된 FR-4 스프링과 평판형 코일을 나타낸 것으로 Fig. 5에서 설명한 스프링과 비교하여 동일한 두께(200 μm)에서 약 5 mm 가량 지름을 감소시켰다. 작아진 스프링으로 인해 빔의 길이

는 짧아져 공진 주파수는 약 2 Hz 가량 증가하였지만 처짐(2 mm) 문제는 개선되었다.

본 연구에서 사용된 자석은 상단에 4 Φ × 2 T, 가운데 4 Φ × 5 T, 그리고 하단에 12 Φ × 5 T 원통형 영구자석들을 사용하였으며, 평판형 코일은 지름이 0.1 mm 인 구리 코일을 사용하여 자석의 하단에 위치시켰다. 기존에 보고된 FR-4 스프링을 이용한 에너지 하베스터와 비교하여 부피를 약 48.1 cm³에서 24.5 cm³로 감소시켰다.

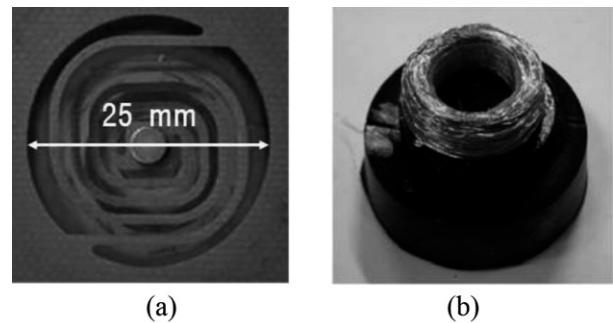


Fig. 5. Fabricated (a) FR-4 spring and (b) copper coil.

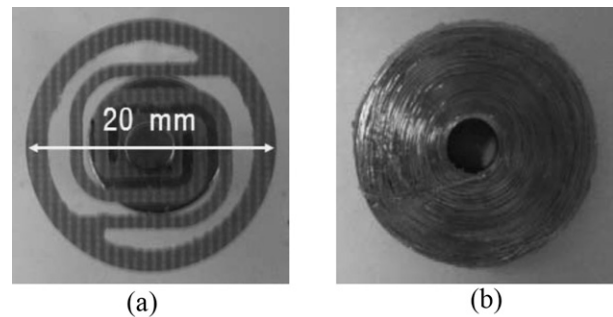


Fig. 6. Fabricated high-efficiency (a) FR-4 spring and (b) planar-type copper coil.

2.3 특성

제작된 FR-4 평판형 스프링 기반 고효율 에너지 하베스터의 공진 주파수는 약 9 Hz 이며, 코일의 길이가 증가할수록 높은 출력특성이 나타났다.

Fig. 7은 입력 주파수와 코일 길이에 따른 출력 전압을 나타낸 것으로 입력 주파수와 코일의 길이가 각각 9 Hz, 30 m 일 때, 약 1.36 V의 최대 전압이 발생하였다. 기존에 보고된 FR-4 스프링 기반 에너지 하베스터와 비교하여 출력 전압이 약 550 mV 에서 1.36 V 크게 증가하였다. 또한 한 시간 이상의 실험에도 출력 값의 변화와 피로 파괴와 같은 내구성 적인 문제가 발생되지 않았다는 점에서 신뢰성 있는 결과라 생각된다.

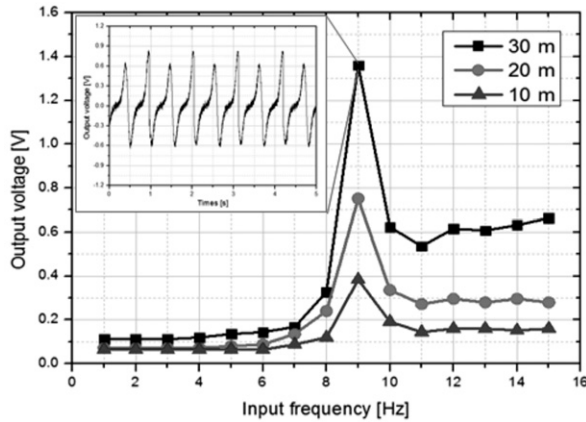


Fig. 7. Measured output voltages vs. coil lengths with input frequencies and waveform.

Fig. 8은 Matlab 을 이용하여 기본형과 고효율 발전기의 부하저항에 따른 출력특성을 나타낸 것으로 해석에 사용된 수식은 아래와 같다.

$$P = \frac{Y^2 \omega^2 S^2}{8 \zeta^2 (R_L + R_C)} \quad (1)$$

식 (1)에서 Y 는 시스템의 변위, w 는 각주파수, S 는 시스템 변수 ($S = \text{권선수} \times \text{자속밀도} \times \text{코일길이}$), ζ 는 댐핑, R_L 과 R_C 는 각각 부하저항과 코일저항을 나타낸다. 기본형 발전기의 경우 1.75 k Ω 의 부하저항에서 최대 148 μW 의 출력이 발생되며, 새롭게 설계된 고효율 발전기의 경우 3.25 k Ω 의 부하저항에서 최대 639 μW 의 출력이 발생하는 것으로 나타났다.

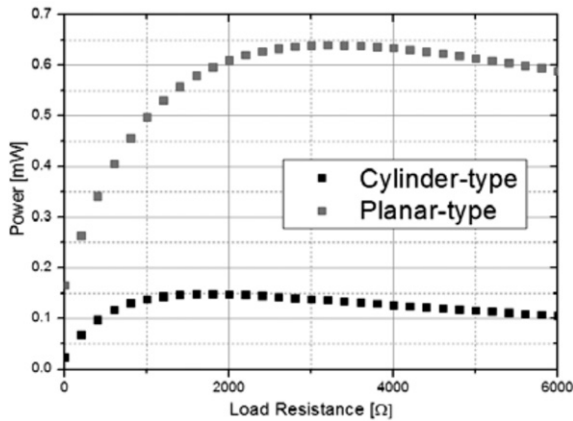


Fig. 8. Calculated output powers vs. load resistance.

Fig. 9는 본 연구에서 제작한 고효율 진동형 전자기식 에너지 하베스터의 출력 측정 및 분석에 사용된 장비들을 나타낸 것으로 신호 발생기, 오실로스코프 그리고 가진기로 구성된다.

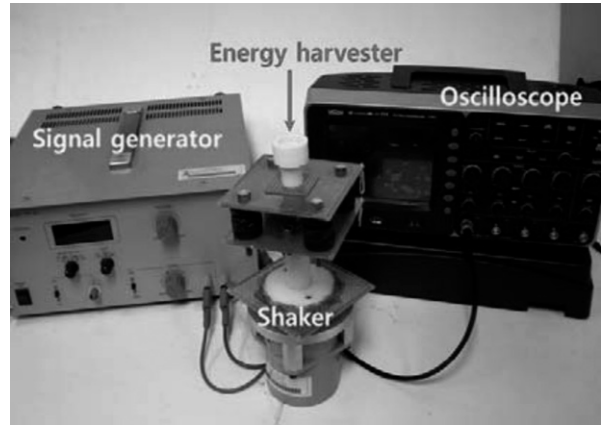


Fig. 9. Experimental setup for the evaluation of generator.

3. 결론

본 논문은 FR-4 스프링과 평판형 코일을 이용하여 효율이 향상된 저 주파수용 진동형 전자기식 에너지 하베스터의 설계 및 제작에 관한 것이다. 특히, 인체에 적용이 가능한 저 주파수에서 동작하도록 설계하였으며, 출력 특성 향상과 스프링의 내구성 향상을 위해 코일은 평판형으로 설계되고 스프링 빔의 길이를 줄여 처짐 문제를 해결하였다.

제작된 고효율 발전기는 9 Hz 의 공진 주파수에서 약 1.36 V 의 유도 기전력이 발생되며, 3.25 k Ω 의 부하저항에서 최대 639 μW 의 출력이 발생하는 것으로 나타났다. 앞으로 다양한 분야에서의 전원 장치로 활용하기 위해서는 정류기 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, 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”, *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 20, 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. Actu. 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. Actu. 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] G. Hatipoglu and H. Urey, “FR-4-based electromagnetic energy harvester for wireless tyre sensor nodes”, *Proceedings of the Eurosensors XXIII conf.*, vol. 1, pp. 1211-1214, 2009.
- [9] 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.
- [10] B. C. Lee and G. S. Chung, “Fabrication of a low frequency vibration driven electromagnetic energy harvester using FR-4 planar spring and its characteristics”, *Journal of Sensor Science and Technology*, vol. 20, no. 4, pp. 238-242, 2011.



이 병 철 (Byung-Chul Lee)

- 2010년 2월 울산대학교 전기공학부(공학사)
- 현재 울산대학교 전기공학부(석·박사통합과정)
- 주관심분야 : 에너지 하베스팅



정 귀 상 (Gwi-Sang Chung)

- 1992년 3월 TUT(공학박사)
- 2004년 2월 UC Berkeley(연구교수)
- 2009년 8월 Stanford University(방문교수)
- 현재 울산대학교 전기공학부 교수
- 주관심분야 : Sensor nodes, M/NEMS based energy harvesting, Graphene.