

저주파수 진동형 전자기식 마이크로 발전기의 설계 및 해석

이병철 · 정귀상*

Design and Analyses of Vibration Driven Electromagnetic Energy Harvester with High Power Generation at Low Frequency

Byung-Chul Lee and Gwi-Sang Chung*

Abstract

This paper presents a design and analysis of an electromagnetic micro generator which can convert low frequency vibration energy to electrical power. The design aspects of the micro generator comprised planar spring, Cu coil and a permanent magnet(NdFeB). Three-type spring designs and four materials(Parylene, FR-4, Cu and Si) were compared to find resonance frequency. It was found that the resonance frequency will be changed according to the spring shape and material. Mechanical and magnetic parameters had been adjusted to optimize the output power through a comprehensive theoretical study.

Keywords : Energy harvester, Electromagnetic, Vibration, Soft magnetic material

1. 서론

최근 무선 기술 및 MEMS와 같은 저전력 전자기술의 발전과 더불어 휴대용 전자기기 및 무선 센서 등의 초소형화가 급속히 이루어지고 있다. 현재 대부분의 장치에서는 건전지가 전원으로 사용되고 있으나, 건전지는 지속적인 충전 및 교체가 불가피하고, 연결 장치의 구조가 복잡하여 단가상승 및 부피에 따른 소형화 문제의 원인이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근 주변 환경으로부터 에너지를 얻는 에너지 하베스팅 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 다양한 에너지원 중에서도 진동을 이용한 방법은 태양전지에 비해 효율은 낮지만, 소형 소자의 전원으로 적용이 가능하고 빛 에너지를 이용한 기술과 달리 기기가 외부에 노출될 필요가 없어 디바이스에 내장하거나 삽입형 장치에 적용이 가능하다.

진동형 에너지 하베스터 기술은 소재와 변환 방식에 따라 압전기, 정전기, 전자기식 방법으로 구분할 수 있다[2]. 압전기식은 에너지 변환 효율이 가장 높으며 압전기 재료에는 고분자, 다결정, 단결정 및 복합체 재료 등이 사용되고 단결정 재료가 압전율이 가장 우수한 것으로 알려져 있다[3-5]. 정전기식은 에너지 변환 효율은 압전기식에 비해 낮지만, 초소형화가 가능한 장점이 있다[6].

한편, 전자기식은 에너지 밀도는 높지만, 변환 효율이 낮으며 집적화가 어려운 단점이 있다[7-9].

일반적으로 사람이 걷거나 천천히 달리는 경우에 인체에서는 약 2~3 Hz의 저주파수가 발생한다[8]. 이러한 저주파수 영역에서는 전자기식 방법이 적합하기 때문에 본 연구에서는 저주파수에서 동작이 가능한 진동형 전자기식 마이크로 발전기를 설계 및 해석하였다.

2. 설계

Fig. 1은 본 연구에서 설계한 진동형 전자기식 마이크로 발전기의 단면도를 도식적으로 나타낸 것으로 발전기는 스프링 부분과 코일 부분으로 구성된다. 스프링 부분에서 스프링은 자석의 편향을 증가시키기 위해 캔틸레버 형태로 설계되고, 자석은 발전기의 관성을 증가시키기 위해 스프링 중앙에 위치된다. 외부로부터의 진동에 의해 자석은 코일 방향으로 상하 운동하고, 이러한 자석의 운동은 코일 부분에 자속 변화를 발생시켜 전자기 유도법칙에 의해 전압이 유도된다[10].

발전기의 크기는 $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ 이며 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 20 \text{ }\mu\text{m}$ 의 크기로 설계된 스프링 중앙에 $2 \text{ }\Phi \times 2 \text{ T}$ 의 영구 자석(NdFeB)을 부착하였다. 코일의 선폭과 간격은 $100 \text{ }\mu\text{m}$ 로 동일하며 구리선을 이용한 나선형 구조로 설계하였다.

울산대학교 전기공학부 (School of Electrical Eng., University of Ulsan)

*Corresponding author: gschung@ulsan.ac.kr

(Received : Nov. 1, 2010, Revised : Mar. 4, 2011,

Accepted : Mar. 5, 2011)

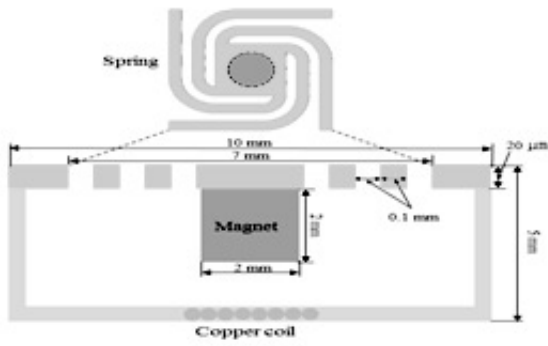


Fig. 1. Schematic structure of the proposed generator.

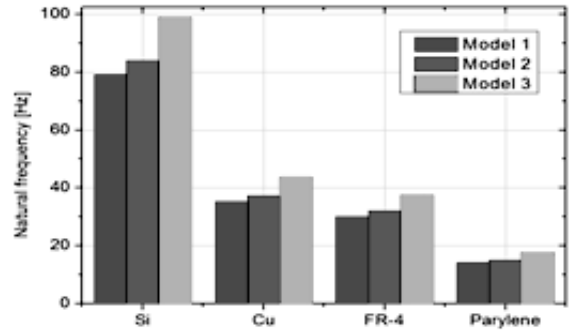


Fig. 3. Resonance frequency as a function of spring material and model.

3. 해석

3.1 공진 주파수 해석

진동형 전자기식 마이크로 발전기의 최대 출력은 시스템의 공진 상태에서 발생하고 시스템의 공진 주파수는 스프링의 형상, 재료 그리고 두께에 따라 결정된다. 따라서, 본 연구에서는 시스템의 공진 주파수를 결정하는 다양한 변수들에 대한 관계를 해석하여 최적화된 전자기식 마이크로 발전기를 설계하였다. 스프링의 형상에 따른 스트레스 분포와 공진 주파수 해석을 위해 선폭 500 μm, 간격 500 μm, 두께 20 μm인 페럴린 스프링을 설계하였다.

Fig. 2는 스프링의 형상에 따른 SMX(Max Von Mises Stress) 값을 나타낸 것이다. SMX 값(Pa)은 모델 1 - 355, 모델 2 - 261, 모델 3 - 258 순으로 낮아짐과 동시에 보다 넓은 범위에서 균일하게 나타났다. 따라서, 스프링의 형상은 모델 3과 같이 원형에 가깝게 설계되는 것이 적합하지만, 제한된 크기 내에서 다양한 형태로 설계변경이 어렵으며 공진 주파수가 높아 모델 2를 스프링 모델로 선정하여 설계 및 해석하였다.

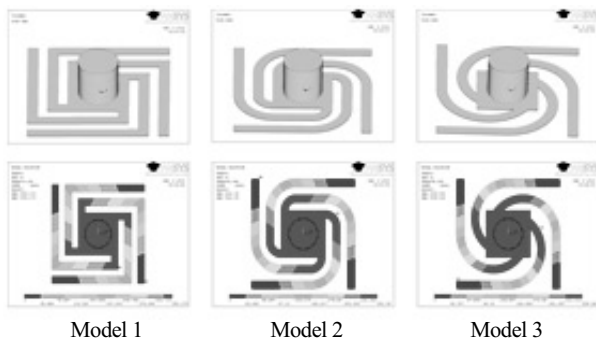


Fig. 2. Variation of spring shape and stress distribution.

Fig. 3은 모델 1, 2, 3에서 스프링의 재료에 따른 공진 주파수 나타낸 것이다. 본 연구에서는 Si, Cu, FR-4, 페럴린을 사용했으며 공진 주파수는 모델에 상관없이 Si - Cu - FR-4 - 페럴린 순으로 낮게 나타났다. 페럴린을 스프링으로 사용할 경우에 저주파수 진동에서 동작이 가능한 발전기의 설계가 적합할 것으로 사료된다.

Fig. 4는 모델 2에서 스프링의 선폭과 간격(500 μm, 300 μm, 100 μm)에 따른 공진 주파수 특성을 나타낸 것이다. 페럴린 경우에 선폭과 간격이 100 μm일 때, 2.5 Hz의 가장 낮은 공진 주파수가 나타났다. 한편, Si는 높은 탄성계수로 인해 모든 스프링 형상에서 높은 공진 주파수가 나타나기 때문에 저주파수용 진동형 에너지 하베스터의 스프링 재료로 부적합함을 알 수 있다.

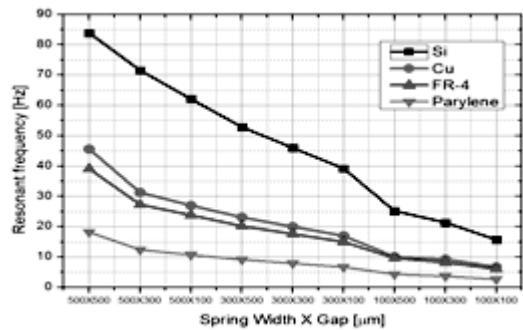


Fig. 4. Resonance frequency as a function of spring material and spring shape(Model 2).

Fig. 5는 스프링의 선폭과 간격이 다른 각각의 형상에서 스프링의 두께에 따른 공진 주파수를 나타낸 것으로 두께가 증가할수록 공진 주파수는 증가하는 것을 알 수 있다.

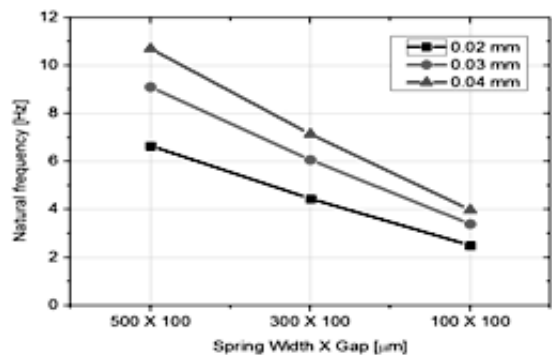


Fig. 5. Resonance frequency as a function of spring thickness and spring shape.

Fig. 6은 영구 자석의 길이 변화에 따른 공진 주파수 변화를 나타낸 것이다. 시중에서 구매 가능한 자석의 최소 크기는 $1\Phi \times 1T$ 이며 자석의 길이는 질량과 관련되므로 질량 변화에 의한 공진 주파수를 해석할 수 있다. 그 결과 자석의 길이가 증가하면, 공진 주파수가 감소되는 것으로 나타났다.

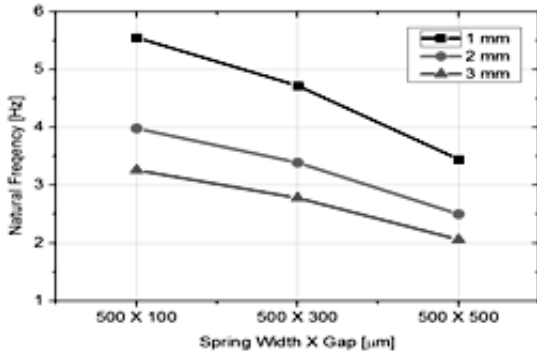


Fig. 6. Resonance frequency as a function of magnet thickness(mass) and spring shape.

3.2 발전기 해석

최적화된 진동형 전자기식 마이크로 발전기를 설계하기 위해서는 다양한 시스템 변수들을 고려해야 한다. Table 1은 이러한 설계 변수들을 정리한 것으로 다양한 식에 적용이 가능하다. 식 (1)은 템핑률 ($\gamma = \omega/\omega_n$)의 변화에 의한 평균전력을 나타낸 것이다.

$$P_{\text{average}} = \frac{mY^2\zeta \frac{W^3}{W_n^3} W^3}{[(1 - \frac{W^2}{W_n^2})^2 + (2\zeta \frac{W}{W_n})^2]} \quad (1)$$

Table 1. Design optimization parameters

Variables	Description
m	Mass
Y	Vibration Amplitude
ω	Vibration Frequency
ω_n	Resonance Frequency
ζ	Damping Ratio
l	Coil length
B	magnetic field strength
N	Turns
R_c	Coil resistance
R_L	Load resistance

Fig. 7은 정규화된 평균전력을 나타낸 것으로 $P_{\text{average}}/mY^2\omega^3$ 을 통해 구해지며 주파수 비 ($\omega/\omega_n = 1$)가 1이고, 템핑률이 낮을 때 높게 나타난다.

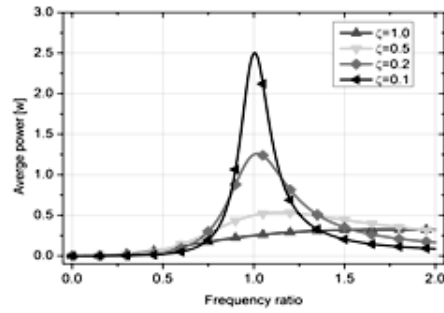


Fig. 7. Average power as a function of damping ratio and frequency ratio.

자석의 질량과 진폭에 의한 최대전력은 식 (2)로 표현할 수 있다.

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

Fig. 8은 자석의 질량과 진폭에 대한 발전기의 최대전력을 나타낸 것으로 식 (2)에서 알 수 있듯이 질량과 진폭이 증가할수록 최대 전력도 증가된다.

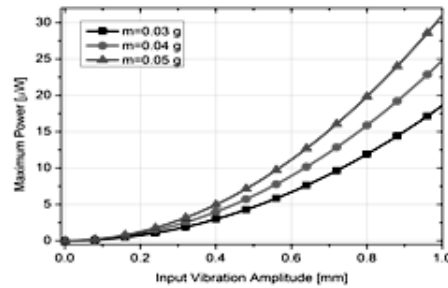


Fig. 8. Maximum power as a function of input vibration amplitude and the seismic mass.

Fig. 9는 입력 주파수와 진폭 변화에 따른 최대전력의 변화를 나타낸 것으로 최대전력은 입력 주파수와 진폭의 증가할수록 증가되는 것으로 나타났다.

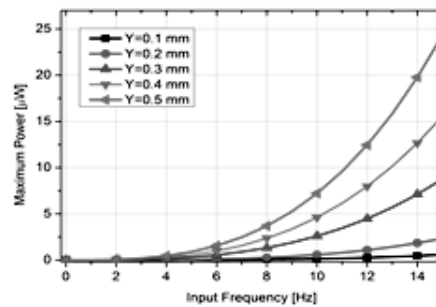


Fig. 9. Power vs. input vibration frequency with different amplitude of vibration.

전자기 해석에서 시스템의 다양한 변수(부하저항, 코일저항, 권선수, 자기장 세기)에 의한 최대전력은 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$P_{\max} = \frac{Y^2 \omega^2 S^2}{8 \zeta_T^2 (R_L + R_C)} \quad (3)$$

여기서, S는 변환요소로서 NBI 를 나타내며 ζ_T 는 댐핑률의 합 ($\zeta_T = \zeta_e + \zeta_m$)이며 ζ_e 는 전기적 댐핑률, ζ_m 는 기계적 댐핑률을 나타낸다.

Fig. 10은 부하저항에 따른 최대전력을 나타낸 것으로 211.2 Ω 의 부하저항에서 1.802 μW 의 최대전력이 발생된다. 따라서, 최대전력을 얻기 위해서는 적절한 부하저항의 선택이 필요하다.

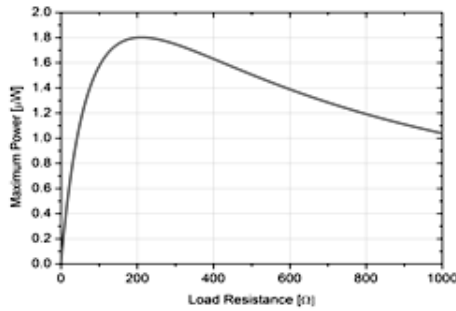


Fig. 10. Calculated power vs. the load resistance.

Fig. 11은 권선수에 따른 최대전력을 나타낸 것으로 권선수가 증가할수록 최대전력도 증가됨을 알 수 있다. 그러나, 일정 권선수가 넘으면 코일의 내부저항이 증가하여 최대전력이 감소됨으로 코일의 권선수와 내부저항 사이의 상관관계를 고려하여 최대전력이 발생될 수 있는 권선수 값을 선택하는 것이 중요하다.

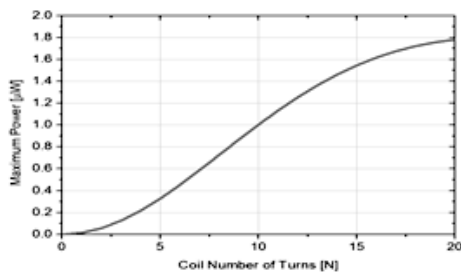


Fig. 11. Calculated power vs. the coil no. of turns.

Fig. 12는 코일 저항에 따른 최대전력을 나타낸 것으로 코일 저항이 증가할수록 최대전력은 감소하며, 본 설계에서의 최대전력은 코일 저항이 0.1068 Ω 일 때 발생한다.

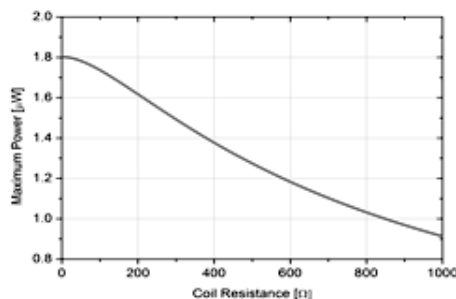


Fig. 12. Calculated power vs. the coil resistance.

Fig. 13은 자기장의 세기에 따른 최대전력을 나타낸 것으로 자기장 세기의 증가에 따라 최대전력도 증가하며 약 1.4 T일 때 최대전력이 발생한다. 식 (3)에서처럼 자기장의 세기가 증가하면 전기적 댐핑값도 증가되기 때문에 일정 값이 넘으면 출력전력이 감소된다.

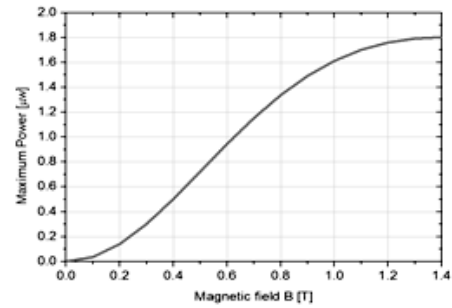


Fig. 13. Calculated power vs. magnetic field strength B.

4. 결론

본 연구에서는 저주파수 진동형 전자기식 마이크로 발전기의 새로운 모델을 설계하고 그 특성을 분석 및 평가하였다. 또한, 발전기 스프링의 재료와 형상, 두께에 따른 공진 주파수를 분석하고, 최대전력을 얻기 위해 시스템 변수에 따른 특성을 해석하였다. 설계 결과, 인체에 적용이 가능한 저주파수 진동형 발전기를 설계할 수 있었으며 시뮬레이션 해석 결과, 출력전력은 주파수 비(입력 주파수/공진 주파수), 질량, 진폭, 부하저항, 권선수, 코일저항, 자기장 세기의 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었다.

향후, 다양한 분야에서 전원으로 활용하기 위해서는 에너지 증폭 회로와 광대역에서 동작 가능한 발전기에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소 지원으로 수행되는 차세대군용전원특화연구센터 사업의 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] S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. M. White, "Energy harvesting vibration sources for microsystems applica-

tions”, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 175–195, 2006.

[3] M. Renaud, K. Karakaya, T. Sterken, P. Fiorini, C. Van Hoof, and Puers, “Fabrication, modelling and characterization of MEMS piezoelectric vibration harvesters”, *Sens. Actuators A*, vol. 145–146, pp. 380–386, 2008.

[4] P. Glynne-Jones, S. P. Beeby, and N. M. White, “Towards a piezoelectric vibration-powered micro-generator”, *IEE Proc. -Sci. Meas Technol.*, vol. 148, pp. 68–72, 2001.

[5] Y. C. Shul, and C. Lien, “Efficiency of energy conversion for a piezoelectric power harvesting systems”, *J. Micromech. Microeng.*, vol. 16, pp. 2429–2438, 2006.

[6] I. Kuehne, A. Frey, D. Marinkovic, G. Eckstein, and H. Seidel, “Power MEMS—a capacitive vibration-to-electrical energy converter with built-in voltage”, *Sens. Actuators A*, vol. 142, pp. 263–269, 2008.

[7] 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.

[8] C. R. Saha, T. ODonnell, N. Wang, and P. McCloskey, “Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion”, *Sens. Actuators A*, vol. 147, pp. 248–253, 2008.

[9] 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.

[10] N. Awaja, D. Sood, and T. Vinay, “Design and analyses of electromagnetic microgenerator”, *J. Sens. Trans.*, vol. 103, pp. 109–121, 2009.



이 병 철(Byung-Chul Lee)

- 2010년 2월 울산대학교 전기공학부 (공학사)
- 현재 울산대학교 전기공학부 석사과정
- 주관심분야 : Energy harvesting based on M/NEMS



정 귀 상(Gwi-Sang Chung)

- 1992년 3월 TUT (공학박사)
- 2004년 2월 UC Berkeley 연구교수
- 2009년 8월 Stanford University 방문 교수
- 현재 울산대학교 전기공학부 교수
- 주관심분야 : Sensor nodes & Energy harvesting based on M/NEMS