

진동 구동식 원통형 전자기 에너지 하베스터의 설계 및 해석

정귀상^{1,a}, 류경일¹

¹ 울산대학교 전기전자정보시스템공학부

Design and Analysis of Vibration Driven Cylindric Electromagnetic Energy Harvester

Gwiy-Sang Chung^{1,a} and Kyeong-Il Ryu¹

¹ School of Electrical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

(Received April 22, 2010; Revised September 4, 2010; Accepted October 14, 2010)

Abstract: This paper describes the design and analysis of vibration driven cylindric electromagnetic energy harvester. The proposed harvester consists with spring, coil and rear earth magnet. The design utilizes an electromagnetic transducer and its operating principle is based on the relative movement of a magnet pole with respect to a coil. In order to optimal design and analysis, ANSYS FEA (Finite Elements Analysis) and Matlab model were used to predict the magnetic filed density with vibration and the generated maximum output power with load resistance. The system was designed for 6 Hz of natural frequency and spring constant was 39.48 N/m between 2 mm and 6 mm of displacement in moving magnet. When moving magnet of system was oscillated, each model was obtained that induced voltage in the coil was generated 2.275 Vpp, 2.334 Vpp and 2.384 Vpp, respectively. Then maximum output powers of system at load resistance (1303Ω) were generated 124.2~132.2 μW during magnets input displacement of 3 mm and 6 Hz periodic oscillation.

Keywords: Energy harvester, Vibration, Cylindric, Electromagnetic.

1. 서론

저전력 및 무선 소자의 출현으로 인하여 휴대 및 장시간 사용 가능한 전원을 요구하고 있다. 지금까지는 주로 배터리를 이용해 왔으나 수명이 제한적이며 폭발의 위험성이 존재하고 폐기처분으로 인한 환경오염을 유발시킨다. 특히, 배터리 교체가 불가능한 환경에서는 자가 발전기와 같은 대체 전원이 대단히 유용하다. 또한, 자가발전 능력을 갖는 무선센서는 자율 조건 모니터링과 무선 데이터 송수신용으로 사용 가능성이 있으며 진동형 에너지 하베스팅은 이러한 시스템의 대체 전원중 하나로 잠재력이 있기 때문에 최근에 활발히 연구되고 있다 [1]. 진동은 동시에 어디

에서나 존재하기 때문에 이동식, 착용식, 휴대용, 삽입형 전자정보통신과 바이오 장치의 자가발전 전원으로 대단히 유용하다. 더구나, 접근이 어렵거나 불가능한 환경에서 사용하기 위해 최소한의 유지 보수 및 관리 능력 측면에서 가장 매력적인 전원이다. 태양광과 열전 등의 다른 에너지 하베스팅은 태양빛과 온도차를 각각 필요로 하기 때문에 사용이 제한적이다. 주변의 다양한 진동을 이용하는 에너지원은 다른 것과 달리 단순한 진동이 발생하는 환경에서 시간적 제약 없이 지속적으로 사용이 가능하며 더욱이 전자소자와 집적화가 가능하다 [2].

일반적으로 진동을 이용한 하베스터는 압전, 정전기, 전자기 등 크게 세 가지로 분류된다. 주변 환경에서 발생하는 진동이나 충격으로 석영, 전기석, 로셀

a. Corresponding author; gschung@ulsan.ac.kr

염, PZT, ZnO, AlN, PVDF 등과 같은 압전 물질의 결정 표면에 전압이 발생하는 원리를 이용한 압전형은 높은 에너지 밀도, 적절한 결합계수, 소형화가 용이하며 외부 전원이 불필요하는 등 많은 장점이 있지만, 수백 Hz 이상의 높은 주파수를 갖는 운동 에너지원이 필요하기 때문에 고진동하에서 압전체가 쉽게 파손되고 출력 임피던스가 크므로 고품질의 압전체가 요구된다 [3]. 한편, 정전기형은 진동에 의해 축전기판이 움직이면서 정전용량의 크기가 최대, 최소로 변화할 때 발생하는 충전 및 방전 현상을 통해 전압을 발생하는 것으로 제작이 용이하며 집적화가 가능하지만, 낮은 에너지 변환효율과 높은 동작 전압 그리고 외부 전압원을 필요로 하기 때문에 소형 전원으로는 적합하지 않다 [4]. 마지막으로 Faraday 법칙을 기반으로 하는 전자기형은 코일과 영구자석을 이용하여 외부에서 발생하는 충격이나 진동을 에너지원으로 이용할 수 있지만, 초소형으로 제작하기에는 한계가 있다. 그러나, 에너지 변환효율이 낮지만 저주파수의 가진 운동 에너지원을 이용하여 동작이 가능하다는 장점을 가지고 있기 때문에 이동식, 착용식, 휴대용 소형 전자기기의 자가 발전형 전원 공급 장치로 가장 적합하여 최근에 크게 주목을 받고 있다 [5].

1996년도에 C. B. Williams 등이 4.4 kHz의 가진 주파수에서 0.3 uW의 전력을 발생할 수 있는 진동형 전자기식 에너지 하베스터를 처음으로 발표한 이래 주로 100 Hz 이상의 높은 주파수에서 다양한 연구개발이 진행되고 있다 [6-10].

진동형 에너지 하베스터는 최근 IT 기술의 급속한 발달과 보급으로 인하여 이동식, 착용식, 휴대용 소형 전자정보통신기기와 건물의 안전 및 진단용 자가발전형 자율 센서노드의 전원으로써 주목을 받고 있다. 특히, 사람이 움직일 때 인체의 각 부분에서 발생하는 운동 주파수 대역은 1~10 Hz와 약 1 G의 가속도로 저주파수에서 높은 에너지 변환 효율을 갖는 에너지 하베스터에 관한 연구개발이 요구되고 있다 [11].

따라서, 본 연구에서는 전자기 에너지 하베스터용으로 사용 가능한 NdFeB, SmCo, CoPt 등의 자석중에서도 가격이 저렴하고 보자력과 자속밀도가 비교적 큰 NdFeB 영구자석과 구리 코일을 이용하여 10 Hz와 1 G 이하의 저주파수에서 최적의 에너지 변환 효율을 갖는 진동 구동식 원통형 전자기 에너지 하베스터를 설계했다. 특히, ANSYS로 유도 기전력과 이동자석의 상대변위를 해석했으며 또한, Matlab으로 부하저항의 크기에 따른 최대 발생전력을 분석하였다.

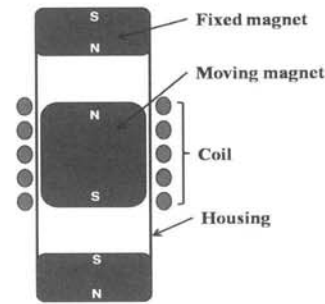


Fig. 1. Schematic structure of vibration driven cylindrical electromagnetic energy harvester.

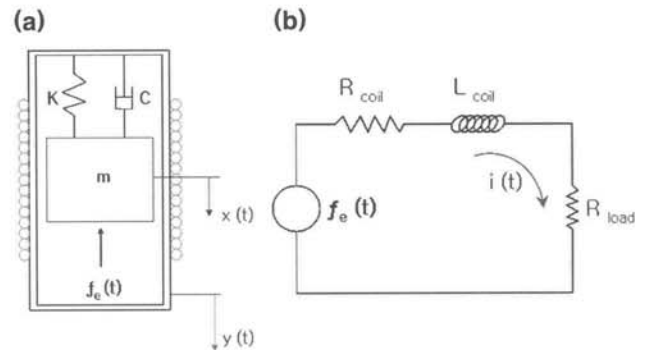


Fig. 2. Electromagnetic energy harvester based on vibration; (a) schematic diagram and (b) equivalent circuit.

2. 실험 방법

2.1 모델링 및 설계

그림 1은 본 연구에서 제안하고 있는 진동 구동식 원통형 전자기 에너지 하베스터를 도식적으로 나타낸 것으로 하우징 양단에 자석을 고정시키고 그 사이에 이동자석을 위치시켜 움직일 수 있도록 했으며 하우징 중심에 코일을 감아 놓았다. 따라서, 이동자석이 외부의 진동에 의해 움직일 때, 코일 내부의 자속밀도를 변화시킴으로 인하여 유도 기전력을 발생시킨다.

그림 2(a)와 (b)는 진동 구동식 원통형 전자기 에너지 하베스터의 도식적 다이어그램과 전기적 등가 회로 모델로 각각 나타낸 것이다.

그림 2의 등가모델 상태방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{z}(t) + c\dot{z}(t) + kz(t) + NBI(t) = -m\ddot{y}(t) \quad (1)$$

$$NBI\dot{z}(t) - L\frac{di(t)}{dt} - R_{coil}i(t) - R_{load}i(t) = 0 \quad (2)$$

여기서 $m, c, k, L, R_{coil}, R_{load}$ 는 각각 영구자석의 무게, 기계적 감쇠, 스프링 상수, 코일의 인덕턴스, 코일저항 그리고 부하저항을 각각 나타낸다. 그리고 $x(t), y(t), z(t), i(t)$ 는 이동자석의 절대변위, 하우징의 절대변위, 이동자석과 하우징 사이의 상대변위와 회로 내에 흐르는 전류를 각각 나타낸다. 또한 N, B, l 은 코일의 권선수, 자속밀도 그리고 코일의 둘레길이를 각각 나타낸다.

식 (1)에서 기계적인 부분만 고려한 발생된 전력 P 를 주파수 영역에서 구하면 다음과 같이 주어진다.

$$P = \frac{m Y_0^2 \zeta r^3 \omega}{[(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2]} \quad (3)$$

여기서, $r = \omega/\omega_n$ 이며 ω 는 가진 주파수, ω_n 는 공진주파수, ζ 는 기계적 감쇠비 그리고 Y_0 는 최대 가진 변위를 나타낸다. 이때의 시스템 공진 주파수는 식 (4)와 같이 스프링 상수 및 이동자석의 질량에 의해 결정된다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

또한, 식 (1)과 (2)의 등가모델 식을 이용하여 발생되는 전력을 주파수 영역에서 구하면 다음과 같이 식 (5)로 주어진다.

$$P = \frac{Y_0^2 \omega^2 S^2}{8\zeta_T^2 (R_L + R_c)} \quad (5)$$

여기서, ζ_T 는 각각 기계적, 전기적 감쇠비를 합친 값인 $\zeta + \zeta_c$ 이며 변환요소인 S 는 NBl , Y_0 는 최대 가진 변위를 나타낸다.

식 (5)을 통하여 부하저항 변화의 출력 전력을 예상할 수 있으며, 이동자석이 움직일 때 코일에서 발생하는 유도기전력은 식 (6)으로 주어진다.

$$V = NBl\dot{z}(t) \quad (6)$$

3. 결과 및 고찰

그림 3(a)는 ANSYS를 이용하여 원통형 전자기 에너지 하베스터를 설계하였다. 소자의 전체 크기는 150 x

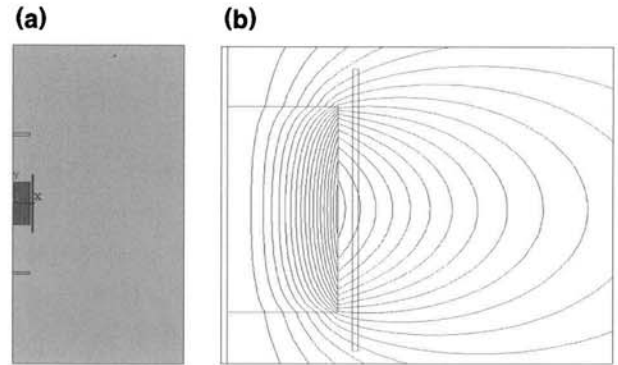


Fig. 3. (a) Design drawing and (b) contour of flux line near the coil.

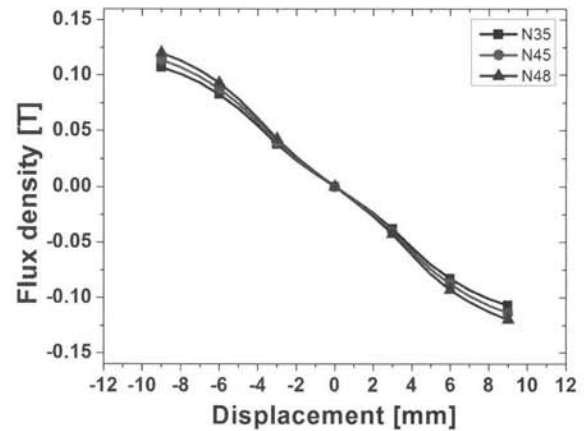


Fig. 4. Variations of flux density with displacement.

110 mm²이며 진동형 전자기 에너지 하베스터의 크기는 55 x 17 mm²이다. 또한, 8032개의 요소와 21215개로 절점으로 구성되어 있다. 경계 조건은 Y축에 대하여 고정 및 대칭 원통형 구조로 가정하였으며 코일영역은 Fillfactor 0.78을 적용하였다. 한편, 그림 3(b)는 자석에서 발생하는 자기력선을 코일 주변으로 한정하여 나타낸 자기력선 등고선이다.

그림 4는 이동자석이 상하로 움직일 때, 코일 내부의 평균 자속밀도를 나타낸 것이다. 가장 조밀한 자기력선이 이동자석의 양극에서 발생되므로 가장 큰 자속밀도가 나타난다. 그러나, 이동자석이 0 mm인 중앙에 위치하는 경우, 코일을 수직으로 지나가는 자기력선이 존재하지 않으므로 자속밀도가 0으로 나타났다. 그러므로 이동자석의 움직임에 의하여 코일 내부의 자속밀도는 변화하게 된다. 이러한 자속밀도의 변화는 패러데이의 법칙에 의해 코일에서 유도기전력이 발생된다. 또한 N35

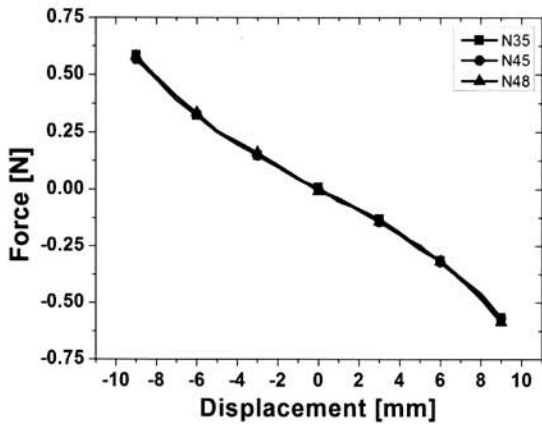


Fig. 5. Force of displacement for moving magnet between moving and fixed magnet.

에서 N48로 변경될 경우, 큰 자속밀도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 5는 6 Hz의 공진 주파수를 가지는 스프링 상수를 구하기 위해 각각의 자석이 동일한 공진주파수를 갖도록 고정 및 이동자석간의 거리 조절이 필요하며 이때 발생하는 반발력을 나타낸 것이다. 여기서, 반발력은 고정 및 이동자석간에 발생하는 힘을 의미하며 스프링 상수는 반발력의 기울기로 구할 수 있다. 이동자석의 이동이 선형 구간인 2 ~ 6 mm에서 스프링 상수는 약 39.48 N/m였다.

그림 6은 원통형 전자기 에너지 하베스터의 하우징에 외부 주파수와 변위를 6 Hz와 3 mm로 가진 할 경우, 자석의 종류에 의해 변화하는 이동자석의 움직임 나타낸 것이다. 각각의 자석에 대하여 시스템 공진 주파수는 동일하므로 이동자석의 변위는 일정하게 나타났다. 만약에 이동자석의 변위가 다르다면, 스프링 상수가 달라져 시스템 공진 주파수가 변하게 될 것이다.

그림 7은 코일에서 유도되는 유도 기전력을 나타낸 것이다. 각각의 모델은 동일한 시스템 공진 주파수를 가지므로 각 자석에 대해 동일한 변위가 발생했다. 그러므로 자석의 자속밀도에 대한 영향만이 다르기 때문에 식 (6)을 통하여 자속밀도의 변화에 의해 유도 기전력이 달라짐을 알 수 있다. 각각의 자석에서 발생된 유도 기전력의 피크값인 V_{pp} 는 자석에 따라 조금씩 다른 결과를 보이고 있다. N35의 경우는 2.275 V_{pp} , N46는 2.334 V_{pp} 그리고 N48은 2.348 V_{pp} 였다. 이것은 N48의 자속밀도가 N35에 비해 크기 때문에 좀 더 큰 유도 기전력을 얻을 수 있음을 보여준다.

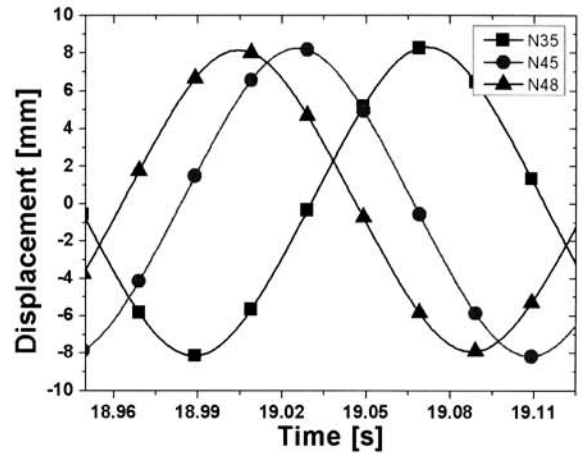


Fig. 6. Displacements of moving magnet with magnets.

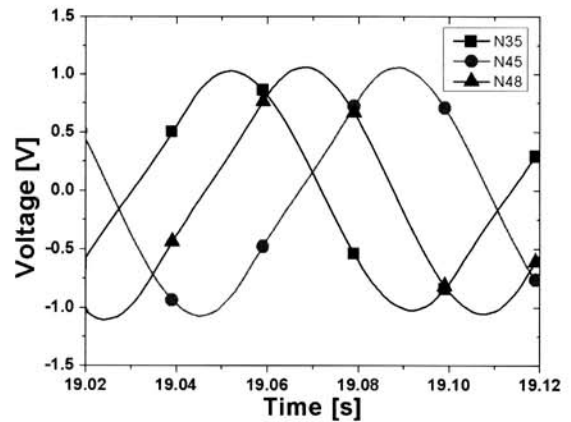


Fig. 7. Variations of induced voltage with magnets.

그림 8은 그림 7의 유도 기전력을 이용하여 부하저항의 변화에 의해 발생하는 최대 전력으로 나타낸 것이다. 이때 발생하는 전력은 부하저항이 임피던스 매칭인 1303 Ω 일 때, 124.2 μW , 130.6 μW 그리고 132.2 μW 로 각각 나타났다. 이는 동일 조건에서 보다 큰 유도 기전력을 얻을 수 있는 N48이 N35에 비해 많은 전력을 발생시킬 수 있음을 보여준다. 그러므로 자속밀도가 크다면 더 많은 유도 기전력과 전력을 획득할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 구성이 간단하고 제작이 용이하여 저주파수에서도 적용이 가능한 진동 구동식 원통형

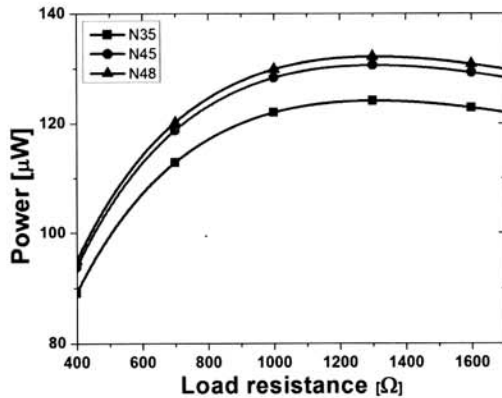


Fig. 8. Variations of generated power with load resistors and magnets.

전자기 에너지 하베스터 시스템을 개발하기 위해 자석의 움직임을 이용하는 에너지 발전 장치를 설계 및 분석을 하였다. 또한, 시스템의 공진 주파수를 일정하게 하기 위하여 고정자석간의 거리를 조절하여 ANSYS FEA를 했으며, Matlab을 이용하여 발생하는 최대 전력을 예측하였다. 설계 및 분석 결과, 외부 주파수 및 변위가 6 Hz와 3 mm 가진 될 때, 발생하는 유도 기전력(V_{pp})과 이동자석의 변위는 N35의 경우에 2.275 V_{pp}와 8.152 mm로 각각 나타났다. 또한, 부하저항의 경우에 임피던스 매칭인 1303 Ω에서 최대 전력인 124.2 μW가 발생되었으며 N45와 N48을 사용할 경우에 자속밀도가 N35보다 크기 때문에 보다 많은 전력을 얻을 수 있음을 확인했다.

따라서, 저주파수에서 높은 에너지 변환 효율을 갖는 진동 구동식 원통형 전자기 에너지 하베스터 개발에 유용하게 사용 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소 지원으로 수행되는 차세대군용전원특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] S. A. Wilson and R. P. Jourdain, *Mat. Sci. Eng. R*, **56**, 1 (2007).
- [2] S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. M. White, *Meas. Sci. Technol.*, **17**, 175 (2006).
- [3] S. R. Anton and H. A. Sodano, *Smart Mater. Struct.*, **16**, R1 (2007).
- [4] S. Roundy, P. K. Wright, and K. S. J. Pister, *Proc. IMECE*, **17** (2002).
- [5] D. P. Arnold, *IEEE Trans. Magn.*, **43**, 3940 (2007).
- [6] C. B. Williams and R. B. Yates, *SENSOR ACTUAT A-PHYS*, **52**, 8 (1996).
- [7] T. V. Buren and G. Trsster, *SENSOR ACTUAT A-PHYS*, **135**, 765 (2007).
- [8] S. P. Beeby, R. N. Torah, M. J. Tudor, P. Glynn-Jones, T. O'Donnell, C. R. Saha, and S. Roy, *J. Micromech. Microeng.*, **17**, 1257 (2007).
- [9] P. H. Wang, X. H. Dai, D. M. Fang, and X. L. Zhao, *Microelectron. J.*, **38**, 1175 (2007).
- [10] P. Glynn-Jones, M. J. Tudor, S. P. Beeby, and N. M. White, *SENSOR ACTUAT A-PHYS*, **110**, 344 (2004).
- [11] B. J. Bowers and D. P. Arnold, *Tech. Dig. 8th Int. Workshop on Micro and Nanotechnology for power Generation and Energy Conversion Apps. Sendai, Japan, Nov*, 281 (2008).