

# 스프링이 없는 진동형 전자기식 에너지 하베스터의 제작과 그 특성

류경일 · 정귀상\*

## Fabrication of Vibration-Driven Electromagnetic Energy Harvester with Spring-Less and Its Characteristics

Kyeong-il Ryu and Gwi-yang Chung\*

### Abstract

This paper describes the fabrication and characteristics of vibration-driven electromagnetic energy harvester without spring to use at low frequency like a human body motion. The implemented energy harvester consists of NdFeB magnets, copper coil. The optimization of induced voltage was done by the various widths of coil, number of the turns, size of fixed and moving magnets and thicknesses of the cylinder. The fabricated energy harvester is capable of producing up to 15.0 V<sub>pp</sub> for basic model and 28.80 V<sub>pp</sub> for improved model at 5.0 Hz resonance frequency and 0.75 g acceleration level. The basic model and improved model are provided a maximum power of 6.375 mW and 25.831 mW at 1 KHz of load resistance in rectifier circuit.

**Keywords :** Energy Harvester, Electromagnetic, Vibration, NdFeB

### 1. 서론

최근 반도체 및 MEMS 기술의 급속한 발달로 스마트 폰, 카메라, 음성 및 영상통화 그리고 인터넷과 같은 다양한 기술이 개발되어 시간 및 공간의 제약 없이 사용이 가능한 각종 휴대, 이동, 착용식 소형 전자기기의 사용이 증가하고 있다. 그러나 이러한 전자기기의 구동에는 배터리가 사용되기 때문에 충전 및 사용시간, 폭발의 위험성, 환경오염 등과 같은 다양한 문제점이 발생할 수 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 최근 주위로 부터 에너지를 얻는 에너지 하베스팅에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1, 2]. 에너지 하베스팅은 인체활동과 같은 일상생활에서 발생하는 에너지원으로 이용할 수 있으며, 그 중에서 진동을 이용한 에너지 하베스팅 방법에는 압전, 정전, 전자기 방식이 있다. 그 중에서 압전 및 정전기 방식은 동작 주파수 대역이 높아서 일상생활에 적용이 어려운 반면, 전자기식은 저주파수 환경에서도 쉽게 전력을 획득이 가능하고, 발전기 구조가 간단하여 쉽게 제작이 가능하므로 최근 연구가 활발히 이루어지고 있다[3-5].

따라서, 본 연구에서는 인체활동에서 발생하는 저주파수(10 Hz 이하) 범위에서 동작이 가능한 진동형 전자기식 에너지 하베스터를 개발하기 위하여 스프링을 대신 자석간의 척력을 이용한

원통형 전자기식 에너지 하베스터의 제작과 그 특성에 관한 것이다.

### 2. 제작

Fig. 1은 본 연구에서 제작한 스프링이 없는 원통형 전자기식 에너지 하베스터의 개념도를 나타낸 것으로 원통의 양단에 자석을 고정시키고 내부에 자석을 위치시켜 상하로 움직일 수 있는 구조이다.

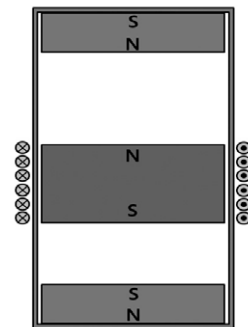


Fig. 1. Schematic diagram of energy harvester.

외부로부터의 진동 에너지에 의하여 내부 자석이 움직일 경우, 발생하는 유도 기전력은 아래의 식 (1)과 같이 표현된다.

$$V_{oc} = NBL\dot{z}(t) \quad (1)$$

울산대학교 전기공학부(School of Electrical Eng., University of Ulsan)  
\*Corresponding author : gschung@ulsan.ac.kr  
(Received : Mar. 15, 2011, Accepted : Jun. 22, 2011)

여기서  $V_{oc}$ 는 발생된 유도 기전력,  $N$ 은 코일의 권선수,  $B$ 는 코일과 쇠교하는 자속밀도,  $L$ 은 코일의 1회 길이,  $z(t)$ 은 시간에 따른 이동자석과 원통의 상대 속도를 나타낸다.

Fig. 2는 발전 시스템의 전기적 회로를 도식적으로 나타낸 것이다.

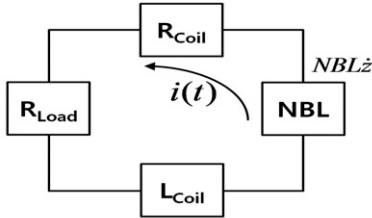


Fig. 2. Schematic of electrical circuit.

발생된 유도 기전력이 폐회로를 통해 흐르는 경우, 발전 시스템은 아래의 식 (2)로 표현될 수 있다.

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

여기서  $L$ 은 코일의 인덕턴스,  $R_{coil}$ 은 코일 저항,  $R_{load}$ 은 부하 저항을 나타내며, 폐회로에 전류가 흐르는 경우, 인덕턴스에서 발생하는 역기전력은 식 (3)과 같이 표현된다. 이 식에서 자석과 발전기의 상대 속도를 곱하면 일률인 전력을 나타낼 수 있다.

$$F_e = NBLi(t) \quad (3)$$

$$P(t) = F_e \dot{z}(t) \quad (4)$$

또한, 외부로부터의 진동 에너지를 발전기에 직접적으로 전달하는 경우, 발생하는 기계적 전력은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며, 식 (2)를 이용하여 평균전력인 식 (6)을 구할 수 있다[6].

$$P = \frac{m Y_0^2 \zeta^3 \omega^3}{[(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2]} \quad (5)$$

$$P = \frac{Y_0^2 \omega^2 S^2}{8\zeta_T^2 (R_L + R_c)} \quad (6)$$

본 연구에서 제작된 발전기는 N35 영구자석 (NdFeB)과 테플론 원통 그리고 지름이 0.1 T인 구리 코일을 사용하였으며, Fig. 3은 제작한 발전기와 해석에 사용된 변수들을 도식적으로 나타낸 것이다.

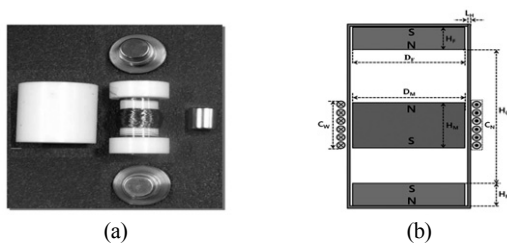


Fig. 3. (a) Photography of fabricated vibration-driven electromagnetic energy harvester with spring-less and (b) evaluation parameters.

먼저, 고정자석( $\phi 15 \times T5$ ), 이동자석( $\phi 15 \times T10$ ), 권선수 (1500 회), 코일 폭(10 mm), 원통 길이(119 mm)로 구성된 기본 모델을 제작하고, 표 1과 같은 일부 변수들의 변화에 따른 유도 기전력 변화를 분석하였다.

Table 1. Parameters for induced electromagnetic force

Parameter	Values
Turn No. of the coil( $C_N$ )	700~1500
Widths of coil( $C_W$ )	5~30 [mm]
Thickness of cylinder( $L_H$ )	1~3 [mm]
Heights of moving magnet( $H_M$ )	10~20 [mm]
Heights of fixed magnet( $H_F$ )	2~6 [mm]
Diameters of fixed magnet( $D_F$ )	4~12 [mm]

Fig. 4는 본 연구에서 제작한 발전기의 출력 측정 및 분석용 시스템을 나타낸 것으로 진동 에너지를 발생시키기 위한 가진기와 이를 제어하기 위한 제어기, 발생된 유도 기전력을 측정하기 위한 측정기로 구성된다. 또한, 정류전압 및 전력을 측정을 위하여 정류회로를 사용했다. 실험은 인체활동과 비슷한 주파수 환경을 조성하기 위하여 3 Hz~10 Hz에서의 진동환경에서 측정하였다[7].

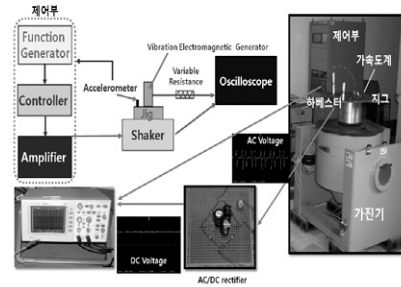


Fig. 4. Composition of measurement system.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 5는 제작된 발전기의 권선수와 공진 주파수에 따른 유도 기전력 변화를 나타낸 것으로 권선수가 증가할 경우 변화하는 자기력선과 코일이 쇠교할 수 있는 영역이 증가되기 때문에 보다 큰 유도 기전력이 발생하는 것을 알 수 있다.

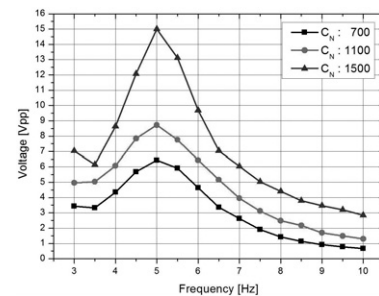


Fig. 5. Vpp variations of harvester with the coil turns and the input frequency.

Fig. 6은 권선수가 1100회에서 코일 폭과 입력 주파수에 따른 유도 기전력 변화를 나타낸 것으로 코일 폭이 감소할수록 코일과 쇠교하는 자기력선의 변화 증가로 유도 기전력이 증가함을 수 있다.

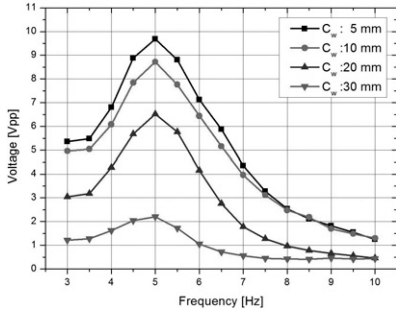


Fig. 6. Vpp variations of harvester with the widths of the coil and the resonant frequency.

Fig. 7은 원통의 두께와 공진 주파수에 따른 유도 기전력을 나타낸 것으로 두께가 증가할수록 자석에 의한 코일에서의 자기력선의 변화율이 감소되어 유도 기전력이 낮게 나타난다.

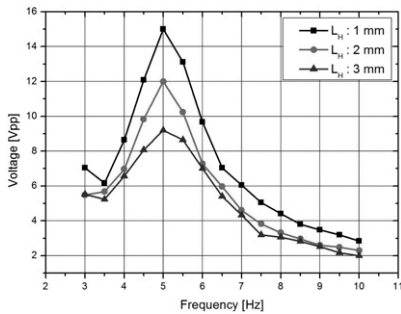


Fig. 7. Vpp variations of harvester with the thicknesses of cylinder and the resonant frequency.

Fig. 8은 이동자석의 높이와 입력 주파수에 따른 유도 기전력 변화를 나타낸 것으로 이동자석의 높이가 증가하면 자석간의 척력이 증가하여 공진 주파수는 0.5 Hz씩 증가하지만, 코일과 쇠교하는 자기력선의 변화가 증가하여 보다 큰 유도 기전력이 발생된다.

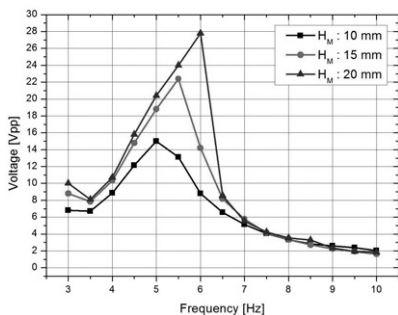


Fig. 8. Vpp variations of harvester with the heights of moving magnet and the resonant frequency.

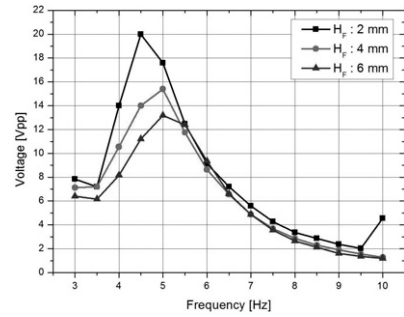


Fig. 9. Vpp variations of harvester with the heights of fixed magnet and the resonant frequency.

Fig. 9는 고정자석의 높이와 입력 주파수에 따른 유도 기전력 변화를 나타낸 것으로 고정자석의 높이가 증가할수록 자석 간에 큰 척력으로 작용하여 이동자석의 변위를 감소시켜 유도 기전력이 감소하게 된다.

한편, 고정자석의 직경에 따른 유도 기전력 변화를 분석한 결과 Fig. 10에서처럼 직경이 감소할수록 보다 큰 유도 기전력이 발생됐다. 이것은 고정자석의 직경이 작아질수록 자석사이의 척력이 감소하여 이동자석의 변위를 증가시키기 때문이다.

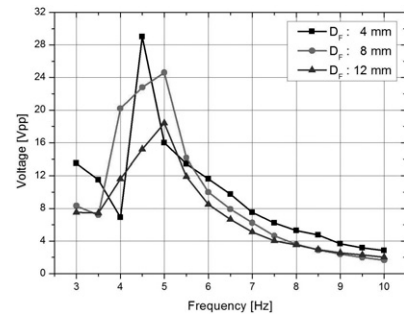


Fig. 10. Vpp variations of harvester with diameters of fixed magnet and the resonant frequency.

이러한 결과들을 바탕으로 개선된 에너지 하베스터의 모델을 제작하여 특성을 분석 및 평가하였다. Fig. 11은 개선된 모델과 기본 모델의 발생된 유도 기전력을 비교한 것으로 개선된 모델에서 약 1.91배의 출력 특성이 증가된 것으로 나타났다.

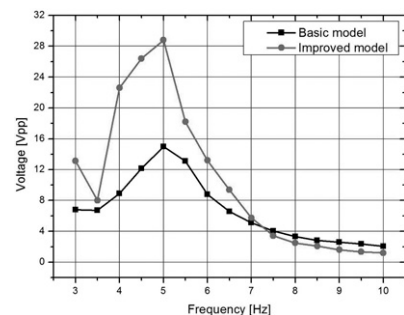


Fig. 11. Vpp variations of a harvester with the resonant frequency at improved model.

진동형 에너지 하베스터는 교류전압이 발생하기 때문에 실제로 각종 전원으로 사용하기 위해서는 직류전압을 평가하는 것이 대단히 중요하므로 본 연구에서는 쇼트키 다이오드를 이용한 전파정류기 양단 전압을 측정하였다. Fig. 12는 본 연구에서 제작한 진동형 에너지 하베스터의 공진 주파수에 따른 AC/DC 변환기 양단의 전압 변화로 기본 및 개선된 모델에서 각각 2.525 Vrms와 5.035 Vrms로 약 2배 가까이 큰 전압이 발생함을 알 수 있다.

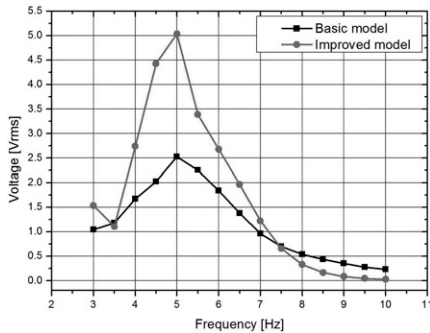


Fig. 12. Generated rectified voltage variations of a harvester with the resonant frequency.

끝으로 Fig. 13은 부하 저항의 변화에 따른 진동형 에너지 하베스터의 전력특성을 나타낸 것이다. 기본 및 개선된 모델은 1 KΩ의 부하저항에서 각각 6.375 mW와 25.351 mW로 기본 모델보다도 개선된 모델에서 약 3.97배 전력이 증가하였다.

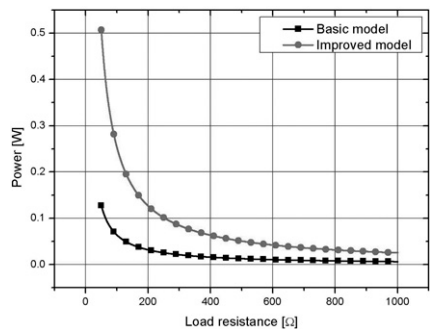


Fig. 13. Generated power variations of a harvester with load resistances.

#### 4. 결 론

본 연구는 인체활동과 같은 저주파수에서 동작이 가능하며 스프링이 없는 동작하는 진동형 전자기식 에너지 하베스터의 제작과 특성에 관한 것이다. 다양한 실험을 통하여 5.0 Hz의 공진 주파수를 갖는 에너지 하베스터를 제작할 수 있었으며, 1 KΩ의 부하 저항이 연결된 정류회로에서 기본 및 개선된 모델은 각각 단위 체적당 194 μW/cm<sup>3</sup>, 923 μW/cm<sup>3</sup>의 전력 발생으로 개선된 모델이

기본 모델과 비교하여 약 4.75배 전력이 증가함을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서 제안한 진동형 에너지 하베스터는 인체 활동과 같은 저진동 환경에서 이동, 휴대, 착용형 각종 전자기기의 전원장치로 활용이 가능할 것으로 기대되며, 앞으로 인체 활동 중에 발생하는 다양한 주파수원을 이용하여 안정적이며 보다 큰 출력을 얻을 수 있는 광대역 및 충전용 소자에 대한 연구가 필요할 것이다.

#### 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] R. Torah, P. Glynne-Jones, J. Tudor, T. O' Donnell, S. Roy, and S. Beeby, "Self-powered autonomous wireless sensor node using vibration energy harvesting", *Sens. & Actu. A*, vol. 145, pp. 336-342, 2008.
- [2] S.A. Wilson and R.P. Jourdain, "New materials for micro-scale sensors and actuators an engineering review", *Mat. Sci. Eng. R*, vol. 56, pp. 1-129, 2007.
- [3] 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.
- [4] I. Sari, T. Balkan and H. Kulah, "An electromagnetic micro power generator for wideband environmental vibrations", *Sens. & Actu. A*, vol. 145, pp. 405-413, 2008.
- [5] P. Wang, K. Tanaka, S. Sugiyama, X. Dai, X. Zhao, and J. Liu, "A micro electromagnetic low level vibration energy harvester based on MEMS technology", *Microsyst. Technol.*, vol. 15, pp. 941-951, 2009.
- [6] N.Awaja, D. Sood, and T. Vinay, "Design and analyses of electromagnetic microgenerator", *Sens & Trans. J.*, vol. 103, pp. 109-121, 2009.
- [7] T. von Buren and G. Troste, "Design and optimization of a linear vibration driven electromagnetic micro power generator", *Sens & Actu. A*, vol. 135, pp. 756-775, 2007.



**류 경 일(Kyeong-il Ryu)**

- 2009년 2월 울산대학교 전기공학부(공학사)
- 현재 울산대학교 전기공학부(석사졸업)
- 주관심 분야 : 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
- 주관심 분야 : Wireless Sensor nodes, Energy harvesting, Graphene