

유한요소법을 이용한 전자기형 진동 에너지 하베스터의 최적설계

Optimum Design of Electromagnetic Vibration Energy Harvesters Using Finite Element Method

이한민†·김영철*·임재원*·박성환*

Hanmin Lee, Young-Cheol Kim, Jaewon Lim and Seong-Whan Park

2. 진동 에너지 하베스터 설계

1. 서 론

진동 에너지 하베스터는 주위의 버려지는 진동 에너지를 수집하여 전기로 변환하여 무선 센서 노드 등의 전원 공급원으로 유용하게 쓰일 수 있으며 변환 방식에 따라 전자기형, 압전형, 정전기형 등으로 나눌 수 있다.

본 연구에서는 자석과 코일로 구성된 전자기형 진동 에너지 하베스터에 대해서 일정 체적 조건 하에서 전력량을 최대화시키는 형상을 도출하기 위하여 최적설계를 수행하였다.

전자기형 진동 에너지 하베스터의 최적설계와 관련된 기존의 연구^(1,2)가 기계-전기 변환 계수(transduction factor)를 준해석적(semi-analytic) 방법으로 근사화하여 출력을 계산한 반면, 본 논문에서는 유한요소해석을 이용하여 계산함으로써 기계-전기 변환 계수의 비선형성을 고려할 수 있고 실제와 보다 근접한 출력을 계산하였다. 또한, 기존의 연구들이 하우징의 높이와 반경을 고정한 상태에서 내부 형상에 대해서만 최적설계를 수행하거나⁽¹⁾ 자석의 배치를 바꾸는 것만을 설계 변수로 선정한 반면⁽³⁾, 본 논문에서는 하우징의 체적을 고정시키고 높이나 반경은 자유롭게 변경 가능하도록 함으로써 보다 자유도가 높은 최적설계를 수행하였으며 이를 통해 하우징의 높이나 반경의 변화에 따른 출력 특성을 파악할 수 있었다.

2.1 초기 설계

진동 에너지 하베스터를 설계하기 위한 선행단계로써 하베스터의 대략적인 부피를 정하기 위하여 주어진 가진 정보와 요구 전력량을 바탕으로 다음과 같은 수식을 이용하여 요구 질량과 최대 변위를 구한다.

$$m = \frac{a^2}{16\omega_n \zeta_m} P_{req}$$

$$Z = \frac{Y}{4\zeta_m}$$

가진 주파수(f)는 60Hz, 가속도(a)는 5m/s², 요구 전력량(P_{req})은 20mW로 정하였고, 기계적 감쇠비(ζ_m)을 0.01로 가정하였다. 위 식을 통해 요구되는 질량(m)은 480g, 최대 변위는 1.7mm로 계산되었고, 이 값들을 바탕으로 진동 에너지 하베스터의 전체적인 부피를 50cm³로 설정하였다.

2.2 최적 설계

본 연구에서는 Figure 1과 같은 타입의 진동 에너지 하베스터에 대하여 최적설계를 수행하였다. 각 파라미터 간에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$V_{constr} = \pi R_o^2 h$$

$$h_{mag} = h - h_{coil} - Z_{max}$$

전체 체적(V_{constr})은 고정되어 있으므로 하우징의 높이(h)가 정해지면 하우징의 반경(R_o)은 정해지고, 최대 변위(Z_{max})도 고정되어 있으므로 코일의 높이(h_{coil})가 정해지면 자석의 높이(h_{mag})도 정해진다. 따라서 설계 변수를 h , h_{coil} , R_i 로 정하면 전체 형상을 결정할 수 있다. 다만, 최적설계 과정

† 교신저자; 정희원, 한국기계연구원 기계시스템안전연구본부

E-mail : hmlee@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7812, Fax : 042-868-7186

* 한국기계연구원 기계시스템안전연구본부

에서 변수의 범위를 명시적으로 지정하기 위해서 h_{coil} 과 R_i 에 대해서는 h_{coil}/h , R_i/R_o 과 같은 비율 형태를 도입하였다.

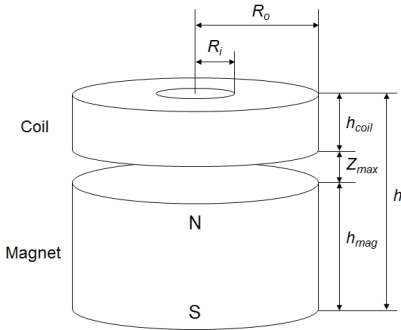


Figure 1 Geometrical parameters of vibration energy harvester

Table 1에서 볼 수 있듯이, V_{constr} 는 50cm^3 , Z_{max} 는 2mm , 부하 저항(R_l)은 $1\text{k}\Omega$ 으로 고정된 상태에서 h , h_{coil}/h , R_i/R_o 를 설계 변수로 하여 부하 저항에서 계산되는 출력 파워를 최대화시키는 최적형상을 구하였다. 최적설계 정식화는 다음과 같다.

$$\max P_l(h, h_{coil}/h, R_i/R_o)$$

s.t.

$$1\text{cm} \leq h \leq 10\text{cm}$$

$$0.01 \leq h_{coil}/h \leq 0.6$$

$$0.05 \leq R_i/R_o \leq 0.9$$

자석과 코일의 형상 변화에 따른 출력 전력을 계산하기 위하여 전자기 유한요소해석 프로그램에서 외부 가진력, 스프링 힘, 기계적 감쇠값을 입력하였고 동적 전자기해석을 수행하였다. Figure 2는 초기 설계안에 대한 자기장 분포와 함께 코일에 유도되는 전압의 파형을 나타낸다.

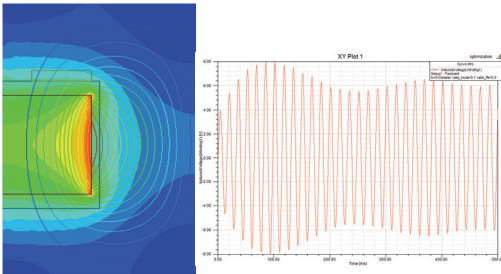


Figure 2 Magnetic field distribution and induced voltage of initial design

Table 1 Fixed parameters of the overall boundary conditions used for optimization

Item	Symbol	Description	Value	Unit
Geometry	V_{constr}	Construction volume	50	cm^3
	Z_{max}	Maximum inner displacement	2	mm
	$R_{i,min}$	Minimum inner radius	2	mm
Magnet	B_r	Residual flux density	1.1	T
	ρ_{mag}	Density of magnet	7.6	g/cm^3
Coil	k_{co}	Copper fill factor	0.6	-
	d_{co}	Wire diameter	0.1	mm
	R'	Resistance per unit length	2.177	Ω/m
Other	Y_{acc}	Excitation acceleration	5	m/s^2
	f	Excitation frequency	60	Hz
	ζ_m	Mechanical damping ratio	0.01	-
	R_l	Load Resistance	1000	Ω

실험계획법을 통해 입력 데이터를 샘플링하고 유한요소해석을 통해 각 입력 데이터에 대한 출력값을 계산한 후, 이 데이터를 바탕으로 크리깅 방법을 통해 Figure 3과 같은 반응표면모형을 얻었다. 이렇게 생성한 반응표면모형을 기반으로 근사최적설계를 수행하여 진동 에너지 하베스터의 최적설계안을 도출하였다.

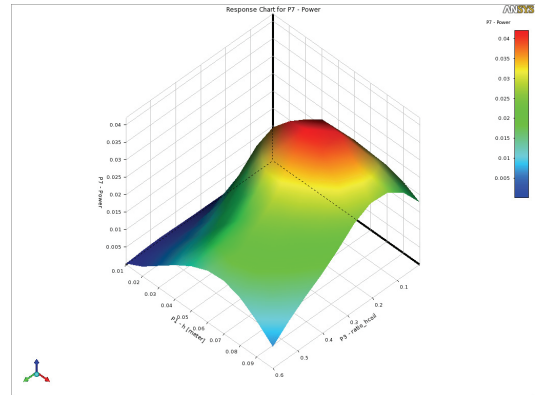


Figure 3 Response surface of power for h and h_{coil}/h

2.3 결과 고찰

Figure 4는 초기 설계안과 최적 설계안의 형상에 대한 비교를 나타낸다. 초기 설계안($h=3\text{cm}$, $h_{coil}/h=0.1$, $R_i/R_o=0.3$)은 출력 전력이 $9\text{mW}(3\text{V})$ 정도였던 반면, 최적 설계안($h=7\text{cm}$, $h_{coil}/h=0.25$, $R_i/R_o=0.7$)은 출력 전력이 $57\text{mW}(8\text{V})$ 로 6배 이상 향상된 결과를 얻었다. 코일 면적은 48mm^2 에서 78mm^2

로 늘어났지만 자석의 질량은 오히려 316g에서 274g으로 줄어들었기 때문에 경제성 측면에서도 향상된 효과를 얻을 수 있었다. Figure 5는 최적 설계안에 대한 자기장 분포와 함께 코일에 유도되는 전압의 파형을 나타낸다.

이와 같은 최적설계 과정을 통해, 본 연구에서 사용한 타입의 에너지 하베스터의 경우에는 전체 하베스터와 자석의 형상을 진동이 일어나는 방향으로 길게 제작함으로써 진동 방향으로의 자기장 변화율(magnetic flux gradient)을 높일 수 있고, 이를 통해 기계-전기 변환 계수를 높여 출력 파워를 최대화할 수 있음을 확인하였다.

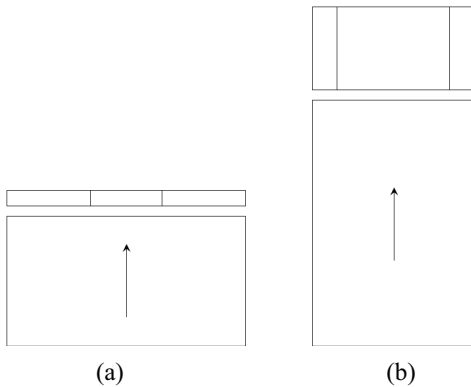


Figure 4 Layout of (a) Initial design and (b) Optimized design

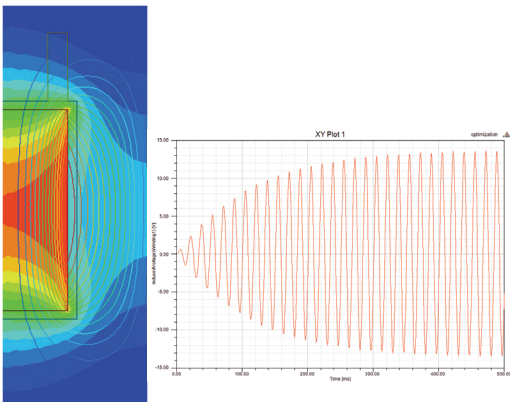


Figure 5 Magnetic field distribution and induced voltage of optimized design

3. 결 론

본 연구에서는 자석의 진동 방향과 코일의 회전 축이 일치하고 코일이 자석 상단에 위치하는 일반적인 타입의 전자기형 에너지 하베스터에 대하여 유한 요소법을 이용한 최적설계를 수행하였다. 초기 설계안에 비해 6배 이상 향상된 출력을 얻었고, 자석의 무게는 15% 정도 경량화된 설계안을 도출하였다. 전체 체적이 일정할 경우 하우징의 반경보다는 높이를 크게 설계하는 것이 출력 전압 및 전력을 최대화할 수 있다는 특성도 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 2013년도 한국기계연구원 자체사업의 지원을 받아 수행한 연구입니다.

참 고 문 헌

- (1) Spreemann, D., Folkmer, B. and Manoli, Y., 2008, Comparative Study of Electromagnetic Coupling Architectures for Vibration Energy Harvesting Devices, Proceeding of PowerMEMS 2008, pp. 257~260
- (2) Spreemann, D., Hoffmann, D., Folkmer, B. and Manoli, Y., 2008, Numerical Optimization Approach for Resonant Electromagnetic Vibration Transducer Designed for Random Vibration, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 18, No. 10, pp. 1~10
- (3) Dahari, Z., Chye, W. C., Sidek, O. and Miskam, M. A., 2011, A Comparative Study of Electromagnetic Generator via Finite Element Analysis, 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics(ICEEI), pp.1~6