

유한요소 해석을 이용한 전자기형 진동 에너지 하베스터의 최적설계 프로세스

Design Optimization Process for Electromagnetic Vibration Energy Harvesters Using Finite Element Analysis

이 한 민†·김 영 철*·임 재 원*·박 성 환*·서 중 호**

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

(Received August 26, 2014 ; Revised October 2, 2014 ; Accepted October 2, 2014)

Key Words : Electromagnetic Vibration Energy Harvester(전자기형 진동 에너지 하베스터), Design Optimization(최적설계), Electromagnetic Finite Element Analysis(전자기 유한요소 해석)

ABSTRACT

This paper presents a systematic optimization process for designing an electromagnetic vibration energy harvester using FEA(finite element analysis) to improve computational accuracy and efficiency. A static FEA is used in the optimization process where trend analysis in a short period of time is rather important than precise computation, while a dynamic FEA is used in the verification step for the final result where precise computation is more important. An electromechanical transduction factor can be calculated efficiently by using an approach to use the radial component of magnetic flux density directly instead of an approach to compute the flux density gradient. The proposed optimization process was verified through a case study where simulation and experiment results were compared.

1. 서 론

진동 에너지 하베스터는 주위의 버려지는 진동 에너지를 무선 센서 노드의 전원 공급과 같은 곳에 유용하게 활용하기 위해 전기 에너지로 변환하는 장치이며, 변환 방식에 따라 압전형, 전자기형, 정전기형 등으로 나눌 수 있다. 전자기형 진동 에너지 하베스터는 코일과 자석의 상대운동에 의해 기전력이 유도되는 패러데이 법칙에 기반하며, 주로 외팔보와 판 형태로만 구현되는 다른 타입에 비해 다양한 형

태로 설계가 가능하며 변환 효율이 비교적 높다는 장점이 있다⁽¹⁾.

전자기형 진동 에너지 하베스터에 대해 다양한 연구가 진행되어 왔지만⁽²⁻⁵⁾ 설계 최적화에 대한 연구는 많지 않다. 대부분의 연구에서 코일과 자석 등 주요 부품의 치수는 단순한 가정, 경험 또는 직관에 의존하여 결정되었다⁽¹⁾.

Dahari 등⁽⁶⁾은 유한요소 해석을 통해 출력 전압을 최대화하는 자석의 배치에 대한 연구를 수행하였으며, 구체적인 치수 최적화보다는 자석의 배치 설계에 초점이 맞춰진 연구였다. Spremann 등^(7,8)은 전자기

† Corresponding Author ; Member, Korea Institute of Machinery and Materials

E-mail : hmlee@kimm.re.kr

Tel : +82-42-868-7812, Fax : +82-42-868-7186

* Korea Institute of Machinery and Materials

** Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

‡ Recommended by Editor SungSoo Na

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

형 에너지 하베스터의 다양한 타입에 대해 출력 파워를 최대화하는 코일과 자석의 치수를 찾는 연구를 수행하였다. 그러나 이 연구에서는 출력 파워를 얻는 과정에서 기계-전기 변환 계수(electromechanical transduction factor)를 계산하기 위해 수식을 이용한 준해석적(semi-analytic) 방법을 이용하기 때문에 계산 정확도가 떨어지는 단점이 있으며, 중간 단계에서 자속밀도의 미분값을 계산해야 하므로 자속밀도를 직접 이용하는 방식에 비해 계산과정이 효율적이지 못하다는 문제가 있다.

따라서 이 논문에서는 출력 파워와 전압의 계산 정확도를 높이고 효율을 향상시키기 위해 정적 유한요소 해석 기반의 최적설계 프로세스를 제안한다. 동적 유한요소 해석을 이용하면 출력 파워와 전압을 보다 정확하게 계산할 수 있지만 해석시간이 많이 걸리는 단점이 있기 때문에 정확성 보다 시간 단축과 경향성 파악이 더 중요한 최적화 과정에서는 정적 유한요소 해석을 이용하고, 정확성이 보다 요구되는 최종결과에 대한 검증 과정에는 동적 유한요소 해석을 이용하도록 하였다.

2장에서는 정적 유한요소 해석을 통해 기계-전기 변환계수와 출력 파워 및 전압을 효율적으로 계산하는 방법과 이를 이용한 최적설계 프로세스를 설명하고, 3장에서는 제안 방법의 신뢰성 검증을 위하여 예제 타입에 대해 적용한 결과를 제시한다.

2. 전자기형 진동에너지 하베스터의 최적설계 프로세스

2.1 출력 파워 및 전압 계산

전자기형 진동에너지 하베스터에 대해 기계적 관점에서의 운동 방정식과 전기회로 관점에서의 지배 방정식을 결합하여 출력 전압과 파워에 대한 식을 유도할 수 있다. 부하저항에 걸리는 전압과 파워는 공진일 때 최대가 되며 각각 식 (1)과 식 (2)와 같이 계산된다⁽⁹⁾.

$$V = \frac{k_t m \omega_n^2 Y R_l}{c_m (R_c + R_l) + k_t^2} \quad (1)$$

$$P = \frac{k_t^2 m^2 \omega_n^4 Y^2 R_l}{2(c_m (R_c + R_l) + k_t^2)^2} \quad (2)$$

위 식에서 외부가진 변위 Y 와 주파수 ω_n 은 가진 환경이 정해지면 주어지는 값이고, 기계 감쇠값 c_m 은 제작이 끝나야 측정 가능한 값이지만 대략적인 값을 가정하여 설계를 진행할 수 있다. 또한 질량 m , 코일 저항 R_c , 부하 저항 R_l 은 형상 설계변수로부터 도출할 수 있는 값들이다. 따라서 기계-전기 변환계수 k_t 를 구하면 출력 전압과 파워를 예측할 수 있다.

이 논문에서 예제로 제시하는 타입은 Fig. 1과 같다. 원통형 자석이 코일 바깥에서 상하 방향으로 진동하며 코일에 걸리는 자속의 세기가 시간에 따라 변함으로써 전기가 발생된다. 자석과 코일을 감싸는 전체 체적(높이 h , 반경 R_o)은 코일(높이 h_{coil} , 내측 반경 R_i , 외측 반경 R_o)과 자석(높이 h_{mag} , 반경 R_{mag})으로 구성되어 있으며 코일과 자석 사이의 간격은 Z_{max} 이다.

이 모델에 대해서 m , R_c 를 구해보면 각각 식 (3)과 식 (4)와 같이 설계변수(h_{mag} , R_{mag} , h_{coil} , R_o , R_i)의 함수 형태로 나타낼 수 있다.

$$m = \rho_{mag} (\pi R_{mag}^2 h_{mag}) \quad (3)$$

$$R_c = \frac{4k_{co} h_{coil} (R_o^2 - R_i^2)}{d_{co}^2} R' \quad (4)$$

위 식에서 d_{co} 는 코일 와이어 지름, k_{co} 는 코일의 구리 충전율(copper fill factor), R' 은 코일의 단위 길이 당 저항을 나타낸다.

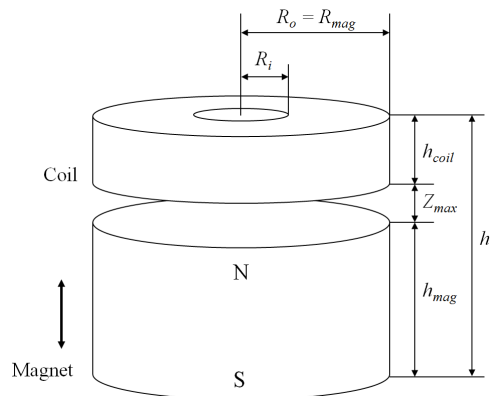


Fig. 1 Geometrical parameters of a basic type of electromagnetic energy harvesters

한편, 출력 파워를 최대화하는 최적의 부하저항은 식(5)와 같이 계산된다⁽⁹⁾.

$$R_{l,opt} = R_c + \frac{k_t^2}{c_m} \tag{5}$$

위와 같이 전자기형 진동에너지 하베스터의 출력 전압과 출력 파워를 계산하는 과정에서 대부분의 변수가 값이 주어지거나 설계변수로부터 도출 가능한 값들이다. 다만 기계-전기 변환계수 k_t 에 대해서는 보다 상세한 분석이 요구된다.

2.2 기계-전기 변환계수 계산

기계-전기 변환계수는 패러데이 법칙으로부터 구해지며, 코일과 자석의 상대운동 방향에 따라 서로 다른 방법으로 계산되어진다⁽¹⁰⁾. 코일과 자석의 상대운동 방향이 코일의 회전축과 수직인 경우, 자속밀도는 일정한 반면 자속과 교차하는 코일 면적이 시간에 따라 변하므로 $k_t = NBl$ 과 같은 간단한 식으로 계산할 수 있다. 여기서 N 은 코일 턴 수, B 는 자속밀도, l 은 자속과 운동 방향에 수직인 코일의 길이를 나타낸다. 그러나 Fig. 2와 같이 상대운동 방향이 코일의 회전축과 일치하는 경우, 면적은 일정하지만 코일과 교차하는 자속밀도가 시간에 따라 변하므로 $k_t = N \frac{dB}{dz} A$ 와 같은 식으로 구해야 한다. 여기서 z 는 자속과 코일의 상대 운동 변위, A 는 자속과 교차하는 코일의 면적을 나타낸다. 이 경우 거리에 따른 자속밀도의 변화율을 추가로 계산해야 하므로 자속밀도를 직접 이용하는 방식에 비해 계산이 복잡하고 오류가 발생하기 쉽다는 단점이 있다⁽¹¹⁾.

이러한 문제를 해결하기 위하여 식 (6)의 가우스 자기 법칙(Gauss's law for magnetism)을 이용하여 보다 간단한 형태로 변환계수를 계산할 수 있다⁽¹¹⁾.

$$\oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \tag{6}$$

Fig. 2에서는 일반화를 깨지 않는 범위에서 계산의 편의를 위해 코일의 모든 턴이 하나의 와이어에 집중되어 있다고 가정한다. 이 와이어를 둘러싸는 미소 두께의 가상 원통 영역에 식 (6)을 적용하면 다음과 같이 식을 전개할 수 있다.

$$B_{z,avg}(z - \frac{\Delta z}{2})A - B_{z,avg}(z + \frac{\Delta z}{2})A - B_\rho(z)l\Delta z = 0 \tag{7}$$

$$\frac{dB}{dz}A \approx \frac{B_{z,avg}(z + \frac{\Delta z}{2}) - B_{z,avg}(z - \frac{\Delta z}{2})}{\Delta z}A = -B_\rho l \tag{8}$$

여기서 $B_{z,avg}(z)$ 는 코일 단면적 A 와 교차하는 자속 밀도의 z 성분의 평균값을 나타내며, $B_\rho(z)$ 는 코일에 작용하는 반경 방향의 자속밀도를 나타낸다.

식 (8)로부터 기계-전기 변환계수를 계산하는 과정에서 $\frac{dB}{dz}A$ 를 $-B_\rho l$ 로 대체하면 식 (9)와 같이 쓸 수 있다.

$$k_t = N \frac{dB}{dz}A = -NB_\rho l \tag{9}$$

즉, Fig. 2와 같이 코일에 교차하는 자속밀도가 시간에 따라 변하는 경우에도 코일 와이어 상에 걸리는 반경 방향의 자속밀도 B_ρ 만 구하면 식 (9)에 의해 미분 계산 없이 쉽게 기계-전기 변환계수를 계산할 수 있다.

자속밀도를 계산하는 방법에는 수식을 이용하는 방법과 유한요소 해석을 이용하는 방법이 있다. 수식을 이용하는 방법은 영구자석을 자기 쌍극자

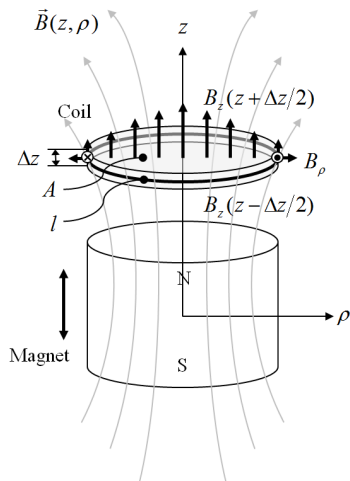


Fig. 2 Axial and radial magnetic flux density for one wire loop

(magnetic dipole)로 근사하여 수식을 유도할 수 있지만, 유도 과정에서 거리가 멀리 떨어진 곳에서의 자기장이라는 가정을 하기 때문에 가까운 거리의 자속 밀도를 구하는 데에는 적합하지 않고, 자석의 형상이 복잡하거나 철심을 포함하는 구조에서는 적용이 불가하다⁽¹²⁾.

따라서 이 연구에서는 유한요소 해석을 통해 자속 밀도를 정확하고 효율적으로 계산하는 방법을 제안한다. 계산량을 줄이기 위하여 Fig. 3과 같이 코일의 단면적을 n 개의 셀로 나누고 각 셀 별로 변환계수를 구한 후 이들을 합해서 전체 변환계수를 계산한다.

전체 코일 턴 수를 N 이라 하면 각 셀에는 $\frac{N}{n}$ 개의 턴이 모여 있다고 할 수 있으며, i 번째 셀의 중심에 작용하는 반경 방향의 자속밀도를 $B_{\rho,i}$, 셀 중심을 지나는 가상의 와이어의 길이를 l_i 라고 하면 식 (9)를 이용하여 코일 전체의 기계-전기 변환계수를 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$k_t = \sum_{i=0}^n \frac{N}{n} B_{\rho,i} l_i \tag{10}$$

이 때 전체 코일 턴 수와 각 셀의 가상 와이어의 길이는 각각 식 (11)⁽⁶⁾과 식 (12)와 같이 설계변수의 형태로 표현할 수 있다.

$$N = \frac{4k_{co}(R_o - R_i)h_{coil}}{\pi d_{co}^2} \tag{11}$$

$$l_i = 2\pi r_i \tag{12}$$

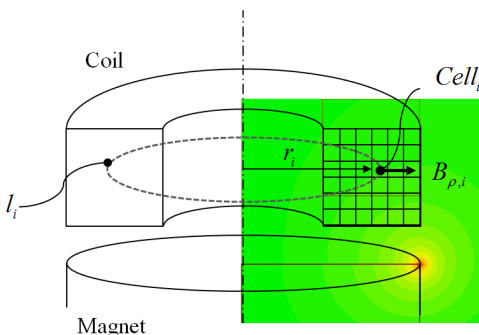


Fig. 3 Radial magnetic flux density computed by FEA software and the coil area divided into cells to reduce computation time

2.3 유한요소 해석 기반 최적설계 프로세스

Fig. 4는 앞 장에서 제시한 내용을 바탕으로 이 연구에서 제안하는 유한요소 해석 기반의 최적설계 프로세스를 나타낸다.

정적 유한요소 해석을 통해 각 셀 별로 B_{ρ} 를 구하고 식 (10)에 의해 기계-전기 변환계수를 구한 후, 식 (1)과 식 (2)에 의해 출력 전압과 파위를 계산하여 최적화 모듈에 전달한다. 최적화 모듈에서 설계 변수 값을 업데이트하여 다시 유한요소 해석 모듈로 전달함으로써 최적설계 사이클을 완성하게 된다. 최적화 과정에는 다양한 방법이 사용될 수 있지만, 본 연구에서는 실험계획법을 통해 해석을 수행할 표본점들을 정하고 해석 결과로부터 크리깅 방법을 통해 근사모델을 생성한 후 전역 최적해를 찾는 근사최적설계 방법을 사용하였다. 크리깅 방법은 특정 위치에서의 미지의 값을 예측하기 위하여 이미 알고 있는 주위 값들의 가중 선형조합을 이용하는 근사 기법으로 식 (13)과 같이 표현된다.

$$y(x) = f(x) + Z(x) \tag{13}$$

여기서 x 는 설계변수를 의미하며, $y(x)$ 는 표본점으로부터 구한 크리깅 근사 함수를 나타낸다. $f(x)$ 는 주어진 표본점으로부터 상수, 선형, 2차 근사 등으로 구할 수 있는 전역 모델을 나타내고, $Z(x)$ 는 표본점들과 전역모델 간의 국부적 편차를 확률 모델

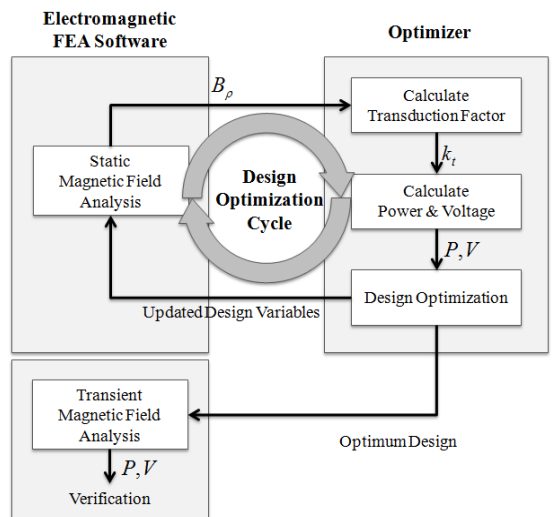


Fig. 4 Design optimization process using an electromagnetic FEA software

형태로 나타낸 함수이다.

최적설계안이 도출되면 실제 제작에 들어가기 전에 동적 유한요소 해석을 수행하고 출력 전압과 파워를 계산하여 최적설계 결과와 비교한다. 동적 해석에서는 시간에 따른 가진력을 입력 힘으로 부여할 수 있고 해석 결과로써 시간에 따라 코일에 유도되는 전압을 구할 수 있기 때문에 정상 상태의 출력 전압 및 파워를 직접 계산할 수 있다. 따라서 정적 유한요소 해석을 이용한 출력 파워 및 전압의 계산에 비해 보다 실제에 가까운 해답을 얻을 수 있지만 해석 시간이 많이 걸린다는 단점이 있다. 따라서 해석을 많이 수행해야 하는 최적설계 사이클에서는 정확성이 조금 떨어지지만 시간을 단축할 수 있는 정적 유한요소 해석을 이용하고, 최종적으로 얻은 최적설계 결과에 대한 검증은 위해서는 더 많은 시간이 소요되지만 정확성이 비교적 높은 동적 유한요소 해석을 이용하는 방법을 제안한다.

3. 사례 연구

3.1 최적설계 결과

이 연구에서 제안하는 전자기형 진동에너지 하베스터의 최적설계 프로세스를 Fig. 1과 같은 예제 모델에 적용해보았다. Fig. 1 모델은 전자기형 진동에너지 하베스터의 기본적인 타입 중의 하나로 자석이 코일 외부에서 진동하며 자석과 코일의 상대운동 방향과 코일의 회전축 방향이 일치하는 타입이다.

하우징의 높이 h 와 최대 변위 Z_{max} 가 정해져 있으므로 코일의 높이 h_{coil} 이 정해지면 자석의 높이 h_{mag} 도 정해진다. 하우징의 반경이자 코일의 외측 반경인 R_o 도 정해져 있으므로 동일한 값을 갖는 자석의 반경 R_{mag} 도 정해진 값이다. 따라서 코일의 높이 h_{coil} 과 내경 R_i 를 설계변수로 정하면 코일과 자석의 형상과 전체적인 레이아웃을 결정할 수 있다. 최적설계 과정에서 변수의 범위를 명시적으로 지정하기 위해서 h_{coil} 과 R_i 대신에 h_{coil}/h , R_i/R_o 와 같은 비율 형태를 도입하였다. 이 최적설계의 목적은 하우징의 체적(V_{constr})과 높이(h)가 정해져 있을 때 부하저항에서 얻어지는 출력 파워(P)를 최대화하는 것이며, 최적설계의 정식화

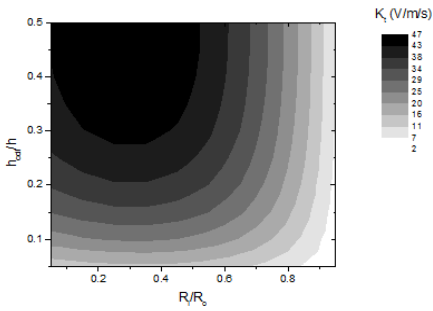
$$\begin{aligned}
 &\text{Find} && h_{coil}/h, R_i/R_o \\
 &\text{to maximize} && P \\
 &\text{subject to} && \\
 &&& 0.01 \leq h_{coil}/h \leq 0.5 \\
 &&& 0.05 \leq R_i/R_o \leq 0.9 \\
 &&& V_{constr} = 25.5 \text{ cm}^3 \\
 &&& h = 52 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Table 1은 이 연구에서 사용한 고정 변수값을 나타낸다. 자석은 NdFeB N35 계열을 이용하였고, 코일은 0.1 mm 구리 동선에 대한 IEC60317 규격⁽¹³⁾을 이용하여 물성치를 정하였다. 외부 가진은 0.5G, 60 Hz로 가정하였다.

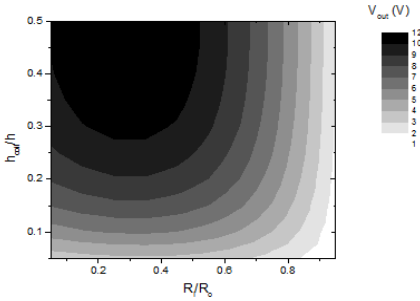
Fig. 5는 최적화 결과를 나타낸다. Fig. 5(a)에서 기계-전기 변환계수는 코일 턴수에 비례하므로 h_{coil} 이 클수록, R_i 가 작을수록 값이 증가하는 경향성을 갖는다. 다만 h_{coil} 이 커짐에 따라 h_{mag} 가 감소하여 자속밀도가 줄어들기 때문에 턴수와 자속밀도가 서로 균형을 이루는 위치에 최적점이 존재한다. 출력 전압은 변환계수와 속도에 비례하며, 이 모델의 경우 설계변수와 속도 간의 상관도가 크지 않아서 Fig. 5(b)와 같이 출력 전압의 경향성이 변환계수의 경향성과 거의 일치하는 결과를 얻었다. Fig. 5(c)를 보면 출력 파워의 최적점이 출력 전압의 최적점과 다른 위치에 존재함을 알 수 있다.

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

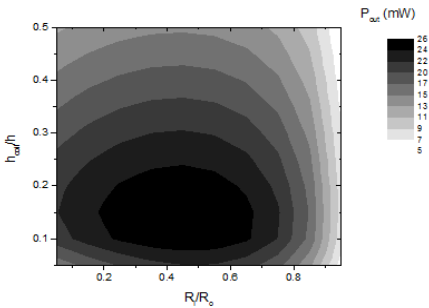
Item	Symbol	Description	Value	Unit
Geometry	V_{constr}	Construction volume	25.5	cm ³
	h	Height of construction volume	52	mm
	Z_{max}	Maximum inner displacement	3	mm
Magnet	B_r	Residual flux density	1.23	T
	ρ_{mag}	Density of magnet	7.4	g/cm ³
Coil	k_{co}	Copper fill factor	0.6	-
	d_{co}	Wire diameter	0.1	mm
	R'	Resistance per unit length	2.177	Ω/m
Others	Y_{acc}	Excitation acceleration	5	m/s ²
	f	Excitation frequency	60	Hz
	ζ_m	Mechanical damping ratio	0.0135	-



(a) Transduction factor

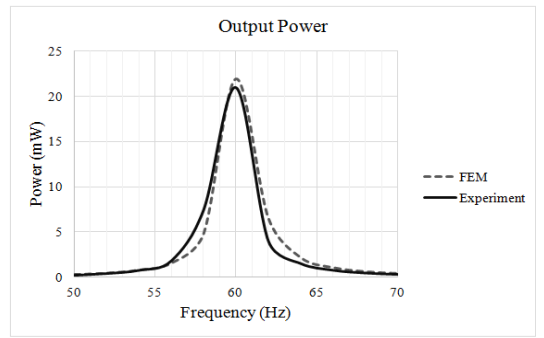


(b) Output voltage

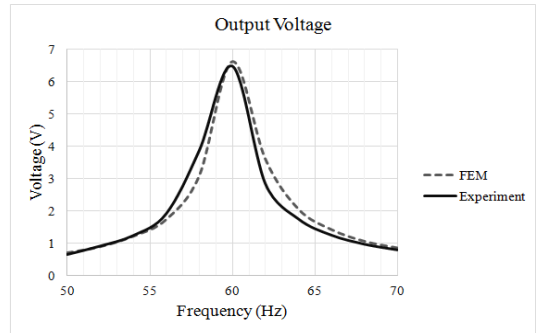


(c) Output power

Fig. 5 Optimization result of (a) the transduction factor, (b) the output voltage and (c) the output power



(a) Output power



(b) Output voltage

Fig. 7 Measured and simulated frequency responses of (a) the output power and (b) the output voltage

3.2 시제 제작 및 실험 결과

최적화 결과로부터 시제 제작을 위해 Fig. 6(a)와 같이 코일과 자석의 최종형상을 도출하였다. 이것으로부터 Fig. 6(b)와 같이 구리 재질의 판 스프링과 알루미늄 하우징을 포함하여 시제를 설계하였고, Fig. 6(c)와 같이 제작하여 주파수 응답 실험을 수행하였다.

주파수를 변화시켜가면서 부하 저항에 걸리는 출력 파워와 전압을 측정하여 Fig. 7과 같은 결과를 얻었다. 파워와 전압 모두 유한요소 해석 결과와 실험 결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 공진이 발생하는 60 Hz에서 출력 파워의 해석 결과는 21.92 mW, 실험 결과는 20.96 mW로 4.6%의 오차가 발생하였으며, 출력 전압의 해석 결과는 6.62 V, 실험 결과는 6.47 V로 2.3%의 오차가 발생하였다.

4. 결 론

이 연구에서는 전자기형 진동에너지 하베스터에

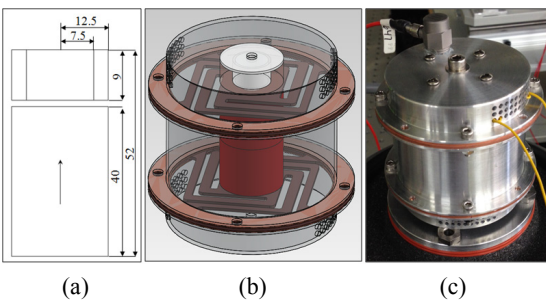


Fig. 6 (a) Optimal dimensions for the maximum output power, (b) 3D CAD model of the prototype and (c) photograph of an assembled device

대한 체계적인 최적설계 프로세스를 제안하였다. 기계-전기 변환계수를 계산하는 과정에 유한요소 해석을 이용함으로써 수식을 이용한 방법에 비해 보다 정확한 값을 얻을 수 있고 철심을 포함하는 경우와 같이 보다 다양한 형태에 대해서도 적용이 가능하다. 또한 운동 방향으로의 자속밀도 변화율을 구하는 대신에 반경 방향의 자속밀도를 직접 이용하는 방식을 써서 계산 효율을 향상시켰다.

동적 유한요소 해석을 이용하면 기계-전기 변환계수를 구해야 하는 중간 과정 없이 바로 출력 전압과 파워를 계산할 수 있지만 해석시간이 많이 걸리는 단점이 있기 때문에 최적화 과정에서는 정적 유한요소 해석을 이용하고, 동적 유한요소 해석은 최종 검증에만 활용하는 방안을 제안하였다.

사례 연구를 통해 해석 결과와 실험 결과를 비교 해봄으로써 제안하는 최적설계 프로세스에 대한 신뢰성을 검증하였다. 출력 전압과 출력 파워 모두 해석과 실험의 오차 범위가 5% 이하가 됨을 확인하였다.

이 논문에서 제안하는 유한요소 해석 기반 최적설계 프로세스는 해석 모델과 설계변수 변경을 통해 다양한 형태의 전자기형 진동에너지 하베스터 설계에 쉽게 적용할 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 2014년도 한국기계연구원 자체사업의 지원을 받아 수행한 연구입니다.

References

(1) Spreemann, D. and Manoli, Y., 2012, *Electromagnetic Vibration Energy Harvesting Devices*, Springer.

(2) Williams, C. B. and Yates, R. B., 1996, *Analysis of a Micro-electric Generator for Microsystems, Sensors and Actuators A*, Vol. 52, pp. 8~11

(3) Beeby, S. P., Torah, R. N., Tudor, M. J., Glynne-Jones, P., O'Donnell, T., Saha, C. R. and Roy, S., 2007, *A Micro Electromagnetic Generator for Vibration Energy Harvesting*, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 17, pp. 1257~1265.

(4) Arnold, D. P., 2007, *Review of Microscale Magnetic Power Generation*, *IEEE Transactions on*

Magnetics, Vol. 43, pp. 3940-3951.

(5) Cho, S. W., Son, J. D., Yang B. S. and Choi, B. K., 2009, *Vibration-based Energy Harvester for Wireless Condition Monitoring System*, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 19, No. 4, pp. 393~399.

(6) 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.

(7) 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.

(8) Spreemann, D., Folkmer, B. and Manoli, Y., 2008, *Comparative Study of Electromagnetic Coupling Architectures for Vibration Energy Harvesting Devices*, *Proceedings of PowerMEMS 2008*, pp. 257~260.

(9) Stephen, N. G., 2006, *On Energy Harvesting from Ambient Vibration*, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.293, pp. 409~425.

(10) Mitcheson, P. D., Green, T. C., Yeatman, E. M. and Holmes, A. S., 2004, *Architectures for Vibration-Driven Micropower Generators*, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.13, pp.429~40.

(11) Cepnik, C., Radler, O., Rosenbaum, S., Ströhla, T. and Wallrabe, U., 2011, *Effective Optimization of Electromagnetic Energy Harvesters Through Direct Computation of the Electromagnetic Coupling*, *Sensors and Actuators A*, Vol. 167, pp. 416~421.

(12) Griffiths, D. J., 2012, *Introduction to Electrodynamics*, Addison-Wesley.

(13) IEC 60317, *Specifications for Particular Types of Winding Wires*.

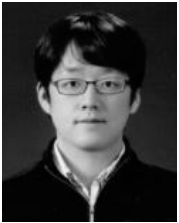


Hanmin Lee is a senior researcher at Korea Institute of Machinery and Materials(KIMM). He received his B.S., M.S. and Ph.D. in mechanical engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology(KAIST)

in 1998, 2000, and 2005, respectively. His current research interests include vibration energy harvesting, design optimization, and multiphysics simulation.



Young-Cheol Kim is a principal researcher at Korea Institute of Machinery and Materials(KIMM). He received his B.S. and M.S. in mechanical engineering from Pusan National University in 1990 and 1993, respectively, and Ph.D. in mechanical engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology(KAIST) in 2008. His current research interests include rotordynamics, tribology, and energy harvesting.

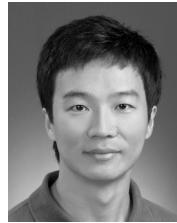


Jaewon Lim is a senior researcher at Korea Institute of Machinery and Materials(KIMM). He received his B.S., M.S. and Ph.D. in electrical engineering from Seoul National University in 2004, 2006, and 2011, respectively. His current research interests include motor,

actuator, and maglev applications.



Seong-Whan Park is a principal researcher at Korea Institute of Machinery and Materials(KIMM). He received his B.S. and M.S. in naval architecture engineering from Seoul National University in 1983 and 1985, respectively, and Ph.D. in structural engineering from Hiroshima University in 1996. His current research interests include vibration energy harvesting, structural integrity, and design optimization.



Jongho Seo received his B.S. in mechanical engineering from Chungbuk National University in 2008. He is currently taking a M.S.-Ph.D. joint course in Department of Mechanical Engineering, Hanyang University. His current research interest is electromagnetic and piezoelectric vibration energy harvesting.