압전소자를 이용한 에너지 하베스터 모델링 및 실험

조성우, 안현성, 김영철*, 이한민*, 서종호*, 차한주
충남대학교, 한국기계연구원*

Modeling and Experiment of Energy Harvester Using a Piezoelectric Element

Sungwoo Cho, Hyunsung An, Young-Cheol Kim*, Hanmin Lee*,
Seo Jong Ho*, Hanju Cha
Chungnam National University, Korea Institute of Machinery & Materials*

ABSTRACT

본 논문에서는 압전소자를 이용한 에너지 하베스터의 전기적 모델링을 제안하였고 이를 시뮬레이션 및 실험을 통해 비교 분석하였다. 에너지 하베스터는 압전소자를 이용한 발전기, 풀브리지 정류기, 평활용 콘덴서, 부하로 구성된다. 본 논문에서는 에너지 하베스팅 방법으로 Standard AC 방법과 이에 풀브리지 정류기를 추가한 Standard DC 방법을 사용하였고 전기적 모델링, 시뮬레이션, 실험의 분석을 위해 압전 발전기를 RLC 등가모델로 구성하였다. 에너지 하베스터 실험장치를 구성하였으며, 두 가지의 전력변환 기법 각각 $73.7\mu W$, $69.3\mu W$를 하베스팅 하는 것을 확인하였다.

1. 서론

석탄, 석유와 같은 1차 에너지의 부족으로 인해 신재생 에너지와 같은 대체에너지의 연구개발이 끊임없이 이루어지고 있고, 대체에너지원으로부터 새로운 에너지를 생산해내 신재생 에너지를 만든다. 이 중 우리 주변에서 흔히 발생하는 진동(기계적 에너지)은 무한한 에너지원이 될 수 있는데, 이 진동에너지가 압전소자의 변형을 발생시켜 에너지 변환특성을 이용하여 전압(전기적 에너지)을 만들어 내는데 이를 에너지 하베스팅이라고 한다. 압전소자에 의해 발생 된 전력은 대전력의 관점에서 보면 매우 작은 크기일 수 있으나, 무선 센서에 사용되는 전원으로는 충분한 전력이기 때문에 기존의 전원을 대체하는 에너지로 충분히 사용가능하다.

본 논문에서는 에너지 하베스터를 전기적으로 등가모델링을 하고 에너지 하베스터 전력변환 기법 중 Standard AC 방법과 풀브릿지 정류기를 추가한 Standard DC 방법을 전기적 등가모델에 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 통해 에너지 하베스터의 전력변환 기법의 성능을 분석하였다.[1]

2. 에너지 하베스터

2.1 에너지하베스터 모델링

에너지 하베스터는 그림 1과 같이 전기, 기계적으로 결합된 등가모델로 나타낼 수 있고, 전기, 기계적 운동방정식은 식 (1), (2)와 같이 나타낸다. 식 (1)은 기계적인 정보를 모델링 한 부분으로 정류기를 기준으로 왼쪽이고, 식 (2)는 전기적 정보를 모델링 한 부분으로 정류기의 오른쪽이며, 두 식은 압전상수 Θ로 결합되어있다. M은 질량, η_m은 기계적 감쇠, K는 스프링상수, C_p는 압전소자의 클램프 커패시터를 나타내며 C_e는 정류된 전압을 부하에 안정적으로 전달해주기 위한 평활용 커패시터이다.

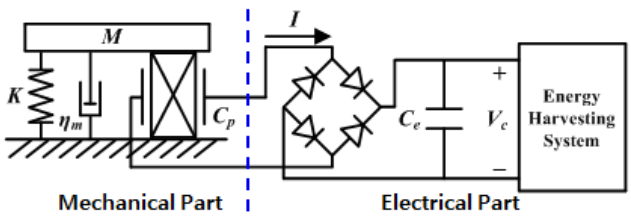

그림 1 에너지 하베스터 등가모델
Fig. 1 Equivalent Model of Energy Harvester

$$M\ddot{u}(t)+\eta_m\dot{u}(t)+Ku(t)+\Theta V_p(t)=F(t) \quad (1)$$

$$-\Theta\dot{u}(t)+C_p\dot{V}_p(t)=-I(t) \quad (2)$$

2.2 에너지 하베스팅 전력변환기법

에너지 하베스터의 압전소자에서 발생한 전압을 부하에서 사용하기 위해서는 추가적인 회로가 필요하다. 본 논문에서는 에너지 하베스팅에 사용하는 다양한 전력변환 기법 중에서 Standard AC와 Standard DC를 사용하였고 회로는 그림 2와 같다. Standard AC는 압전소자에서 발생한 전압을 직접 부하에 연결하여 사용하고, Standard DC는 압전소자에서 발생한 전압을 부하에서 사용하기 전에 정류기와 평활용 커패시터를 통과한 DC전압을 부하에서 사용한다. 두 가지의 전력변환기법은 힘 F와 변위의 미분 $\dot{u}$이 동상일 때를 가정으로 하며 식 (3)으로 나타낸다.

$$F(t)=\sin\omega t, \qquad \dot{u}(t)=u_0\omega\sin\omega t \quad (3)$$

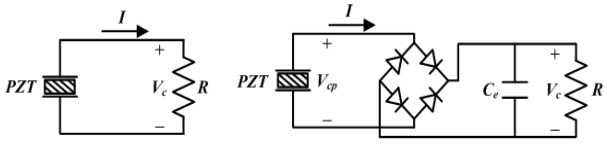

그림 2 전력변환기법 (a) Standard AC, (B) Standard DC
Fig. 2 Power Conversion Method
(a) Standard AC, (B) Standard DC

Standard AC에서 압전소자에 의해 발생한 전압은 식 (4)와 같이 주파수 영역으로 나타낼 수 있고, 하베스팅 된 전력은 식 (5)로 나타낼 수 있으며, 최적부하와 최대 전력은 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$\hat{V}=\frac{R\Theta}{1+jRC_p\omega}j\omega\hat{u} \tag{4}$$

$$P^{AC}=\frac{\hat{V}^2}{R}=\frac{R\Theta^2F^2}{\{1+(RC_p\omega)^2\}\times 2\eta_m^2} \tag{5}$$

$$R_{opt}^{AC}=\frac{1}{C_p\omega},\qquad P_{\max}=\frac{\Theta^2F}{4C_p\omega\eta_m^2} \tag{6}$$

Standard DC에서 압전소자의 전압에 의해 부하에 흐르는 반주기 동안의 전류는 식 (7)과 같이 나타내고, 발생한 전압은 식 (8), 하베스팅 된 전력은 식 (9)로 나타낼 수 있으며, 최적부하와 최대전력은 식 (10)과 같다.

$$\int_{t_1}^{t_2}Idt=\frac{V_{oc}}{R}\frac{T}{2} \tag{7}$$

$$V_{oc}=\frac{R\Theta}{\pi/2+RC_p\omega}\omega u \tag{8}$$

$$P^{DC}=\frac{R\Theta^2F^2}{\{(RC_p\omega+\pi/2)^2\times\eta_m^2\}} \tag{9}$$

$$R_{opt}^{DC}=\frac{\pi}{2C_p\omega},\qquad P_{\max}=\frac{\Theta^2F}{2\pi C_p\omega\eta_m^2} \tag{10}$$

3. 시뮬레이션 및 실험

2 절에서 제안한 Standard AC와 Standard DC 전력변환 기법을 시뮬레이션하기 위해 식 (1), (2)를 이용해 $R=\eta_m$, $L=M$, $C=1/K$, $V=F$로 모델링하여 RLC 직렬 모델로 나타내었다. PSIM으로 시뮬레이션을 진행하여 에너지 하베스트용 전력변환기법의 성능을 확인하였다. 그림 3은 동일한 힘으로 두 가지의 전력변환기법에 적용하였을 경우 결과를 나타낸다.

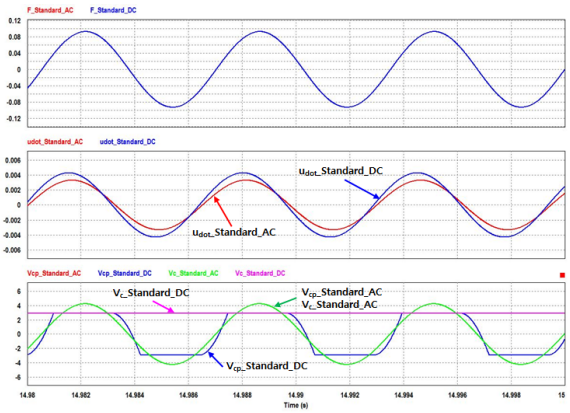

그림 3 에너지 하베스팅 시뮬레이션 결과
Fig. 3 Simulation results of Energy Harvesting

그림 4는 실험장치 구조로 가진기와 변위를 측정할 수 있는 측정센서, 부하로 사용할 가변저항으로 구성되어 있다. 그림 5는 압전소자 고유의 공진특성을 확인하기 위해 $140Hz$~$180Hz$로 가변을 시켜 측정전압을 확인한 것이며, 본 실험장치의 압전소자는 $10K\Omega$에서 156Hz의 공진주파수를 가지는 것을 확인하였다. 그림 6의 실험조건은 공진주파수 $156Hz$, 부하 $100K\Omega$으로 설정하여 실험한 결과이다. Standard AC의 경우 하베스팅 전압은 $3.84V_{rms}$이고 Standard DC의 경우 $2.58V_{peak}$로 측정되었다. 또한 5가지 부하조건에 따라 하베스팅 된 전압을 표 1에 나타내었다. 두 가지 방법 모두 $100K\Omega$의 부하조건에서 각각 $73.7\mu W$, $69.3\mu W$로 최대의 전력을 생산해냈다.

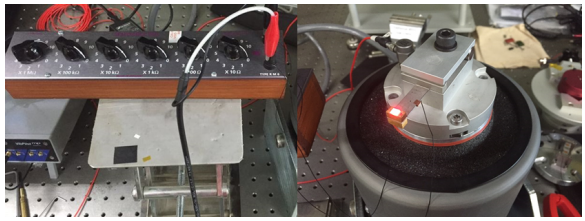

그림 4 에너지 하베스팅 실험장치
Fig. 4 Experiment Device of Energy Harvesting

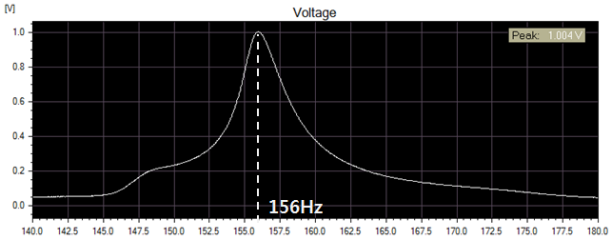

그림 5 압전소자의 특성실험
Fig. 5 Experiment of Piezo Element Characteristic

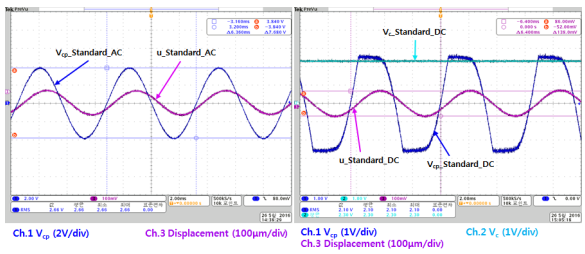

그림 6 에너지 하베스팅 실험결과
Fig. 6 Experiment Results of Energy Harvesting

표 1 부하조건에 따른 실험결과
Table 1 Experiment Results According to Load

Harvesting Method	부하조건 (KΩ)				
	1	10	100	1000	10000
Standard AC (V_{peak})	0.11	1.00	3.84	5.88	6.26
Standard DC (V_{peak})	0.30	0.79	2.58	4.48	5.04

4. 결론

본 논문에서는 압전소자를 이용한 에너지 하베스터의 전기적 모델링을 제안하였고 이에 대한 시뮬레이션 및 실험과 성능분석에 대해 서술하였다. 에너지 하베스팅 방법은 Standard AC와 Standard DC를 사용하였고, 두 가지의 방법으로 시뮬레이션 및 실험을 통해 최적 저항에서 각각 $73.7\mu W$, $69.3\mu W$를 발전하여 에너지 하베스터 전력변환기법의 성능을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] J Ajitsarial, S Y Choe, D Shen, D J Kim “Modeling and Analysis of a Bimorph Piezoelectric Cantilever Beam for Voltage Generation”, Smart Materials And Structures, 16, IOP, 447-454, 2007