한국음향학회지 제38권 제2호 pp. 222~230 (2019)
The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.38, No.2 (2019)
https://doi.org/10.7776/ASK.2019.38.2.222

pISSN : 1225-4428
eISSN : 2287-3775

와류를 이용한 압전 에너지 수확 회로의 전력 분석

Electrical power analysis of piezoelectric energy harvesting circuit using vortex current

박건민,[1] 이종현,[1†] 조치영[2]

(Geon-Min Park,[1] Chong-Hyun Lee,[1†] and Cheeyoung Cho[2])

[1]제주대학교 해양시스템공학과, [2]국방과학연구소

(Received November 6, 2018; revised December 21, 2018; accepted March 25, 2019)

초 록: 본 논문에서는 유체의 와류 현상을 이용한 에너지 하베스팅 회로의 전력을 분석하였다. 와류를 전기 에너지로 바꾸기 위한 소자로 PVDF(Polyvinylidene fluoride) 압전 센서를 사용하였으며, 전력 분석을 위해 잘 알려진 브리지 다이오드 정류 회로와 전력 변환 효율을 향상시키기 위해 다이오드 정류회로 입력단에 병렬 동기 스위치 회로를 접목한 P-SSHI(Parallel Synchronized Switch Harvesting on Inductor) 정류 회로를 사용하였다. 다이오드 및 P-SSHI 정류 회로의 출력 전력은 이론을 통해 분석하였고 실험을 통해 검증하였다. 공기에 의한 와류를 이용한 실험을 통해 P-SSHI 정류 회로의 전력효율이 69 % 증가됨을 확인하였다. 또한 수확된 와류 에너지를 슈퍼 커패시터에 저장하는 회로를 구현하여 2차 전지로써 활용이 가능함을 확인하였다.

핵심용어: 에너지 하베스팅, PVDF (Polyvinylidene fluoride), P-SSHI (Parallel Synchronized Switch Harvesting on Inductor) 회로, 슈퍼커패시터

ABSTRACT: In this paper, the power of the energy harvesting circuit using the PVDF (Polyvinylidene fluoride) piezoelectric sensor transformed by vortex was analyzed. For power analysis, a general bridge diode rectifier circuit and a P-SSHI (Parallel Synchronized Switch Harvesting on Inductor) rectifier circuit with a switching circuit were used. The P-SSHI circuit is a circuit that incorporates a parallel synchronous switch circuit at the input of a general rectifier circuit to improve energy conversion efficiency. In this paper, the output power of general rectifier circuit and P-SSHI rectifier circuit is analyzed and verified through theory and experiment. It was confirmed that the efficiency was increased by 69 % through the experiment using the wind. In addition, a circuit for storing the harvested energy in the supercapacitor was implemented to confirm its applicability as a secondary battery.

Keywords: Energy harvesting, PVDF (Polyvinylidene fluoride), P-SSHI (Parallel Synchronized Switch Harvesting on Inductor), Supercapacitor

PACS numbers: 43.38.Fx, 43.40.At

I. 서 론

최근 화석 연료에 의한 환경파괴에 대한 우려가 높아지는 상황에서, 친환경 에너지 하베스팅에 관한 관심과 이에 따른 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 압력을 이용한 압전 소자가 친환경 에너지 하베스팅 소자로 많이 사용되고 있다.

압전 에너지 소자로부터 발생되는 교류 신호를 직류 신호로 바꾸는데 사용되는 대표적인 회로인 정류 회로는 4개의 다이오드를 연결한 전파정류회로이다. 전파정류회로는 다이오드의 순방향 전압강하로 전력 손실이 발생해서 전력효율 성능이 좋지 않아, 이를 개선하기 위한 다양한 회로 연구들이 수행되어 왔다. 대표적인 정류 회로로는 동기 정류 방식,[1,2] 능

†**Corresponding author:** Chong-Hyun Lee (chonglee@jejunu.ac.kr)
Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, 102, Jeju Daehakro, Jejusi, Jejudo 63243, Republic of Korea
(Tel: 82-64-754-3481, Fax: 82-64-754-3480)

동 소자 기반 회로,[3] 자체 리셋 기반 회로,[4] 자려 부스터 기반 회로[5] 등이 존재한다.

대부분의 압전 소자를 이용한 에너지 하베스팅 회로는 압전소자에 가해진 외부 충격에 의한 변위에 기반한 연구들이 주류를 이루어 왔다.

이에 반해 본 논문은 유체의 움직임 특히 유체에 의해 발생되는 와류를 이용하는 에너지 하베스팅 회로에 관한 것이다. 와류 현상은 유체의 이동이 장애물에 의해 방해를 받게 되면 장애물 뒷부분에 입자들의 회절로 인해 소용돌이가 발생되는 현상이다. 유연한 압전소자를 유체의 흐름 속에 위치시키면, 와류에 의해 압전소자의 변위가 발생하게 되고 그 결과 전기 에너지가 발생하게 된다. 생성되는 전기 에너지는 와류의 특성에 따라 달라지며, 이에 대한 압전 센서의 진폭 변위와 주파수에 대한 선행 연구가 진행되어 왔다.[1,6-8]

또한 본 논문에서는 생성된 압전 에너지를 저장하는 저장회로를 구현하였다. 구현된 저장회로는 충전 및 방전 횟수가 거의 무한대로 반영구적인 수명과 짧은 충방전 시간으로 인한 높은 출력 밀도가 장점인 슈퍼커패시터에 기반한 에너지저장장치를 구현하였다. 회로에 사용된 슈퍼커패시터는 두 장의 분극전극을 배치하여 비교적 제조가 용이하고 저비용으로 제작이 가능한 EDLC(Electrical Double Layer Capacitor)를 사용했다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 와류 에너지 하베스팅 소자인 PVDF(Polyvinylidene fluoride) 압전 센서를 이용한 전파정류회로 및 P-SSHI(Parallel Synchronized Switch Harvesting on Inductor) 정류 회로 모델을 소개하고 두 회로의 전력을 이론적으로 분석한다. 그리고 분석된 두 정류회로의 전력을 실험을 통해 검증한다. 끝으로 수확된 에너지를 슈퍼커패시터에 저장한 후 출력되는 전력을 분석한다.

II. 에너지 하베스팅 회로 전력 분석

와류 현상은 Fig. 1(a)와 같이 유체 입자들의 회절로 인해 소용돌이가 발생되는 현상이다. 유연한 압전소자를 유체의 흐름이 생성된 곳에 위치시키면 Fig. 1(b)와 같이 와류가 발생되며 와류에 의해 진동

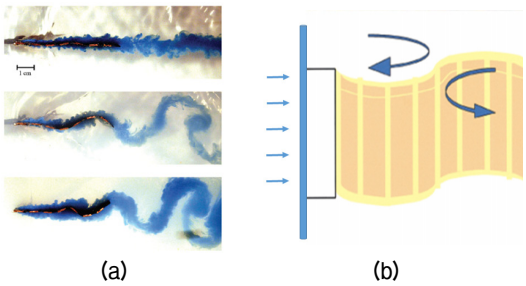


Fig. 1. (a) Fluid flow visualization by vortex, (b) vibration of piezoelectric sensor by vortex.

Fig. 2. PVDF piezoelectric sensor.

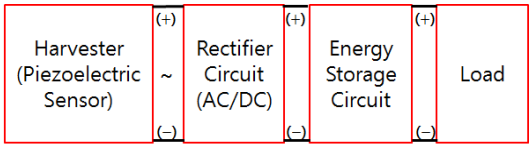


Fig. 3. Block diagram of piezoelectric energy harvesting circuit.

에 의해 압전 센서의 변위가 발생된다. 전형적으로 발생되는 와류 진동의 주파수대역은 1 Hz ~ 5 Hz이며, 와류로 인한 압전 센서의 변위 진폭은 0 mm ~ 2 mm이다.[7-9]

진동을 에너지로 변환할 수 있는 압전 센서의 종류는 PVDF, PZT 등과 같이 다양하며 압전체의 성분에 따라 서로 다른 특성을 가지고 있다. PVDF는 PZT에 비해 낮은 압전 효율을 내포하지만 유연성이 뛰어난 장점이 있다. 따라서 본 논문은 Fig. 2와 같이 외력이 작은 환경적 요인인 와류에서 작동이 용이한 PVDF 센서를 사용하였다.

전체적인 압전 에너지 하베스팅 회로의 구성도는 Fig. 3과 같다. 전단부는 와류 에너지를 압전 센서의 변형으로 변환하고 교류 전압 및 전류 신호로 변환하는 센서부와, 센서부에서 생성된 교류신호를 직류신호로 바꾸어 주는 정류회로부로 구성된다. 후반부는 정류회로부와 에너지 저장회로 및 부하로 구성되어 있어 정류된 직류신호의 에너지를 저장 회로에 저장하여 필요에 의해 부하에 전력을 공급한다.

압전 센서를 이용한 전형적인 에너지 하베스팅 정류 회로는 Fig. 4(a)와 같이 전파정류회로(bridge diode)

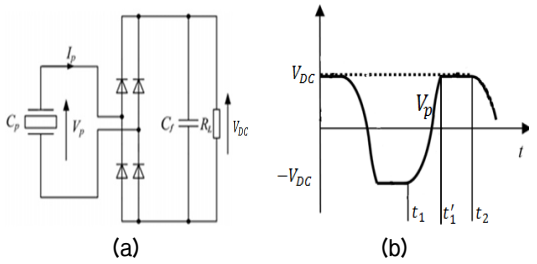


Fig. 4. (a) General energy harvesting circuit, (b) output voltage waveform of piezoelectric sensor.

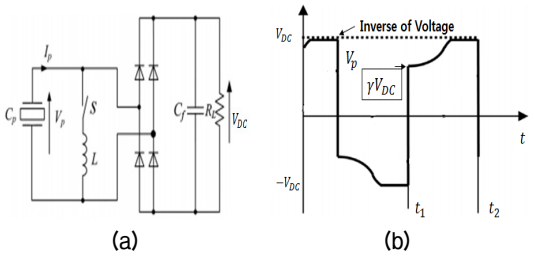


Fig. 5. (a) P-SSHI energy harvesting circuit, (b) output voltage waveform of piezoelectric sensor.

를 기반으로 하여 부하에 전력을 공급한다. Fig. 4(b)는 C_p에서의 전압 파형을 나타낸 것이다. 즉, 전파정류회로에 연결되었을 때 압전 센서의 출력 전압 파형이다.

부하저항에 공급되는 전력은 압전 전기 방정식인 Eq. (1)과 반주기 동안의 전하량인 Eq. (2)를 연립하여 계산할 수 있다.[10,11]

$$I_p = \alpha \dot{u}_m - C_p \dot{V}_p , \tag{1}$$

$$\int_{t_1}^{t_2} I_p dt = \frac{V_{DC}}{R_L}\frac{T}{2}, \tag{2}$$

여기서 I_p는 압전 센서의 출력 전류, α는 압전 센서의 전기-기계 변환 계수, u_m은 압전 센서의 기계적 변위 진폭, C_p는 압전 센서의 정전 용량, V_p는 압전 센서의 출력 전압, R_L은 부하저항, V_{DC}는 부하저항에 인가되는 직류 전압, T는 전압의 한 주기, $t_1 \sim t_2$는 Fig. 4(b)에 표기된 바와 같이 반주기이다.

Eqs. (1)과 (2)를 연립하여 V_{DC}에 대해 정리하면 Eq. (3)과 같이 V_{DC}를 구할 수 있다.

$$V_{DC} = \frac{R_L \alpha w u_m}{R_L C_p w + \frac{\pi}{2}}, \tag{3}$$

여기서 w는 각주파수로 $\frac{2\pi}{T}$이다.

일반 정류 회로를 거쳐 부하저항(R_L)에 공급되는 전력($P_{standard}$)은 Eq. (4)와 같이 구할 수 있다.

$$P_{standard} = \frac{V_{DC}^2}{R_L} = \frac{R_L \alpha^2 w^2 u_m^2}{(R_L C_p w + \frac{\pi}{2})^2}, \tag{4}$$

전파정류회로는 압전 센서의 출력 전압(V_p)이 부하저항의 전압(V_{DC})이하로 감소하기 시작하는 시점(t_1)이 되면 전위차로 인해 에너지가 부하저항으로 전달되지 않는다. 이 같은 경우를 개선하기 위해 부하저항으로 에너지가 전달되지 않는 구간($t_1 \sim t_1'$)을 최소하기 위해 스위치에 의한 전압 반전을 유도하는 P-SSHI 정류회로는 Fig. 5(a)와 같다.

P-SSHI 정류 회로는 전파정류회로의 인덕터와 스위치를 병렬로 연결한 구조이며,[10] 인덕터와 압전 센서의 정전용량(C_p)의 LC공진을 이용하여 전압 반전을 유도하고, 전압 반전을 시킬 시점은 스위치로써 제어함으로써 부하에 공급되는 전력을 증가시키는 원리이다. P-SSHI 정류 회로의 전력은 전파정류회로와 동일한 방식으로 압전 전기 방정식과 반주기 동안의 전하량을 연립하여 구한다. 압전 전기 방정식은 Eq. (1)과 동일하다. P-SSHI 회로에서 반주기 동안의 전하량은 Eq. (5)와 같다.

$$\int_{t_1}^{t_2} (I_p + i_S) dt = \frac{V_{DC}}{R_L}\frac{T}{2}, \tag{5}$$

여기서 i_S는 스위치가 닫혔을 때 흐르는 전류이다.

반주기 동안의 전하량은 Eq. (6)과 같다.

$$\int_{t_1}^{t_2} i_S dt = C_p \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} \dot{V} dt = C_p V_{DC}(1+\gamma), \tag{6}$$

여기서 Δt는 전압 반전에 걸리는 시간이다.

γ는 Eq. (7)과 같이 전압이 반전될 때 스위치로 인한 반전 계수로써 스위칭 회로의 특성을 표현하는 상수(보통 $0.3 < \gamma < 0.9$)이며 스위칭 회로의 전기적 Q인자(Q_i)에 대한 함수이다.[6-8]

$$\gamma = e^{-\frac{\pi}{2Q_i}}. \tag{7}$$

Eq. (1)과 Eqs. (5), (6)을 연립하여 풀면 Eq. (8)과 같이 V_{DC}를 구할 수 있다.

$$V_{DC} = \frac{2R_L \alpha w u_m}{R_L C_p (1-\gamma) w + \pi}. \tag{8}$$

구해진 V_{DC}를 이용하면, P-SSHI 정류 회로를 거쳐 부하저항(R_L)에 공급되는 전력(P_{P-SSHI})을 Eq. (9)와 같이 구할 수 있다.

$$P_{P-SSHI} = \frac{V_{DC}^2}{R_L} = \frac{4R_L \alpha^2 w^2 u_m^2}{(R_L C_p (1-\gamma) w + \pi)^2}. \tag{9}$$

끝으로 정류회로를 거쳐 수확된 에너지 저장회로는 Fig. 6과 같이 슈퍼커패시터와 저항으로 구성된 RC회로로 구현하였다. 이때 각 RC회로의 시상수는 다음과 같은 조건으로 설계하였다.[12]

$$\tau_i \ll \tau_d \ll \tau_l, \tag{10}$$

여기서 τ_i는 Fig. 6의 첫 번째 단 저항(R_i)와 커패시터(C_i)에 의한 시상수, τ_d는 두 번째 단 저항(R_d)와 커패시터(C_d)에 의한 시상수, τ_l는 세 번째 단 저항(R_l)와 커패시터(C_l)에 의한 시상수이다.

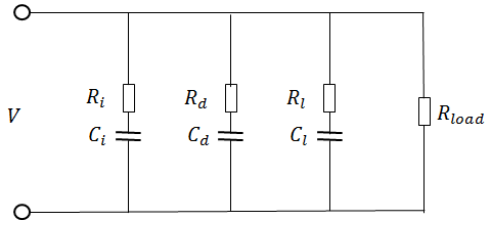


Fig. 6. Energy storage circuit model of supercapacitor.

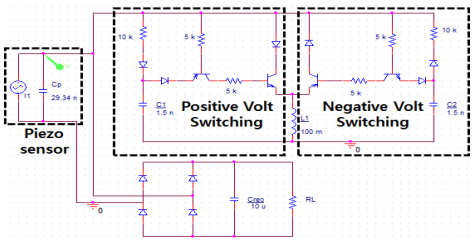
Eq. (10)에 의해 첫 번째 단에서는 즉각적으로 방전이 일어나고, 두 번째 단에서는 첫 번째 단에 비해 지연된 방전이 발생하고, 세 번째 단에서는 비교적 긴 시간에 거쳐 방전을 한다. 따라서 충전이 빈번히 발생하지 않더라도 서로 다른 시상수 때문에 방전되어지는 시간을 극대화시켜 부하에 지속적으로 전력 공급할 수 있다.

III. 모의 실험

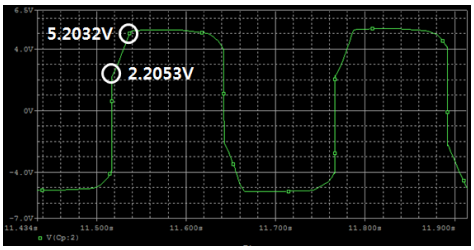
두 종류의 정류회로의 전력 특성을 분석하기 위한 사전 모의실험을 진행하였다. 우선 P-SSHI 정류회로의 반전계수(γ)를 구하기 위한 PSPICE를 통하여 모의실험을 Fig. 7과 같이 진행하였다. Fig. 7(a) 회로도이며, Fig. 7(b)는 모의실험으로 압전 센서의 출력 전압으로 회로도 상에서 압전 센서의 커패시터(C_p)에서 측정한 값이다.

본 논문에서 설계된 스위칭 회로는 압전 센서의 출력 전압 파형인 Fig. 7(b)로부터 아래 Eq. (11)과 같이 반전계수(γ)를 구할 수 있다.

$$\gamma = \frac{2.2053}{5.2032} \approx 0.4. \tag{11}$$



(a)



(b)

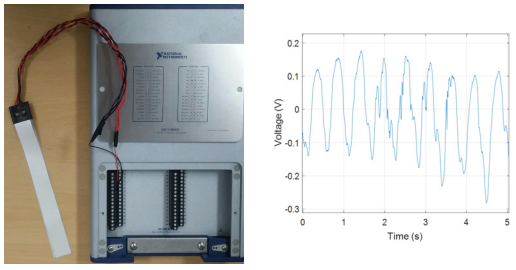
Fig. 7. PSPICE simulation of P-SSHI circuit (a) P-SSHI circuit and, (b) output voltage waveform of piezoelectric sensor.

Table 1은 모의 실험에 적용된 센서 및 PSPICE 실험을 통해 얻어진 각 변수들의 값이다. Table 1의 α와 C_p는 압전 센서의 한 종류인 PVDF에 대한 파라미터이다. u_m은 와류에 의한 압전 센서가 변형되어지는 변위로서 1.5 mm로 설정하였다.[7,8] w는 압전 센서의 출력 주파수이다. 모의 실험에 필요한 센서 출력 주파수를 산정하기 위해 Fig. 8(a)와 같은 셋업을 구성하여, 선풍기를 이용하여 공기 유체 흐름발생시켜 실험을 진행하였고, Fig. 8(b)와 같은 결과를 얻어서 $f = 2\,Hz$로 설정하였다.

II장에서 구한 $P_{standard}$과 P_{P-SSHI}를 R_L의 변화에 따른 전력 분석을 위해 모의실험을 했고 그 결과는 Fig. 9와 같다.

Table 1. Parameters of each variable applied to the simulation.

Parameters	Value
α (N/V)	2.6751×10^{-6}
C_p (F)	29.34×10^{-9}
γ	0.4
$w(=2\pi \times f)$	$2\pi \times 2$
u_m (m)	1.5×10^{-3}



(a) (b)

Fig. 8. (a) Experiment set up, (b) output voltage waveform of piezoelectric sensor.

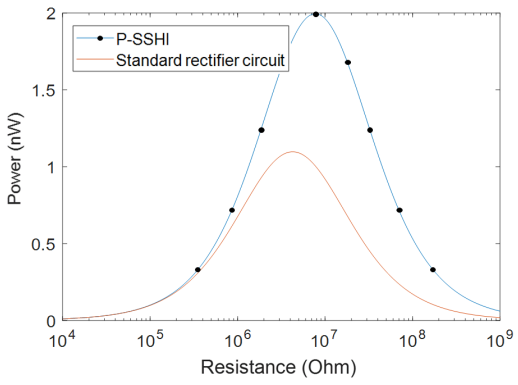


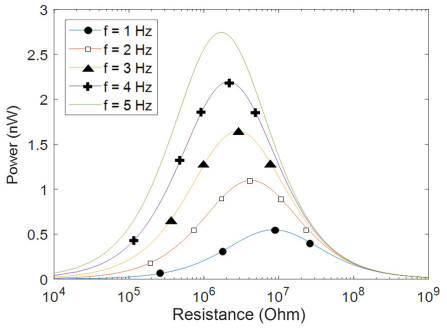
Fig. 9. Output power of harvest circuit by load resistance.

일반 정류 회로의 경우 부하저항이 4 MΩ일 때 최대 출력 전력은 1.098 nW이고, P-SSHI 정류 회로는 8 MΩ일 때 최대 출력 전력은 1.996 nW를 생산하여 최적 저항에서 P-SSHI 정류 회로의 출력 전력이 일반 정류 회로에 비해 1.9배 증가되었다.

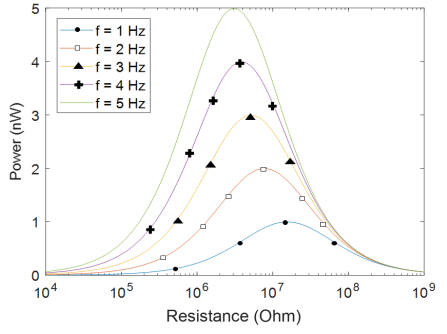
Figs. 10~13은 각각 와류에 의한 압전 센서의 진동 주파수(f)의 변화, 와류에 의해 변형되어지는 압전 센서의 변위(u_m)변화, 압전 센서의 정전용량(C_p) 변화, P-SSHI 정류 회로의 반전계수(γ)에 영향을 주는 스위칭 회로의 전기적 Q인자(Q_i)의 변화에 따른 P_{P-SSHI}을 보여준다. 모의 실험에 사용된 파라미터는 변경되는 파라미터를 제외하고 Table 1의 값을 사용하였다.

Fig. 10은 와류에 의해 압전 센서의 변형 주파수에 따른 각 정류 회로의 출력 전력 변화를 보여준다. 사용된 주파수의 범위는 와류의 진동 주파수 대역인 1 Hz~5 Hz로 설정하였다.

Fig. 10(a)는 일반 정류 회로의 출력 전력($P_{standard}$)



(a) Standard rectifier circuit



(b) P-SSHI rectifier circuit

Fig. 10. Output power of rectifier circuit by vibration frequency.

으로 Eq. (4)를 통해 예상 할 수 있듯이 주파수에 비례하여 출력 전력이 증가되는 것을 알 수 있다.

Fig. 10(b)는 P-SSHI 정류 회로의 출력 전력(P_{P-SSHI})으로 Eq. (9)를 통해 예상 할 수 있듯이 주파수에 비례하여 증가되는 것을 알 수 있다. 또한 $P_{standard}$와 P_{P-SSHI}를 비교하였을 때 전체적으로 P-SSHI 정류 회로가 1.8배 더 높은 전력을 출력하는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 와류에 의해 압전 센서의 변위(u_m)에 따른 각 정류 회로의 출력 전력 변화를 보여준다. 사용된 압전 센서 변위 범위는 0 mm ~ 2 mm로 설정하였다.

Fig. 11(a)는 일반 정류 회로의 출력 전력($P_{standard}$)으로 Eq. (4)를 통해 예상 할 수 있듯이 변위(u_m) 증가량의 제곱에 비례하여 출력 전력이 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 11(b)는 P-SSHI 정류 회로의 출력 전력(P_{P-SSHI})으로 Eq. (9)를 통해 예상 할 수 있듯이 변위(u_m) 증가량의 제곱에 비례하여 출력 전력이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 $P_{standard}$와 P_{P-SSHI}를 비교하였을 때 전체적으로 P-SSHI 정류 회로가 1.84배 더 높은 전력을 출력하는 것을 알 수 있다.

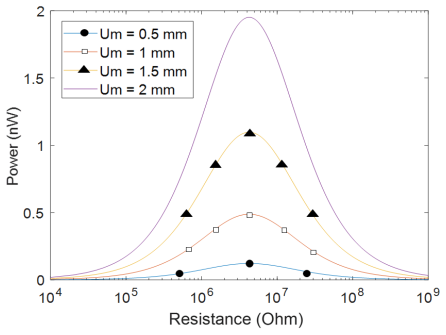
Fig. 12는 압전 센서의 정전용량(C_p)에 따른 각 정류 회로의 출력 전력 변화를 보여준다. 압전 센서의 정전용량은 PVDF의 면적에 따라 변화하기 때문에 면적이 작은 경우의 정전용량을 $5\,nF$, 큰 경우 $40\,nF$로 설정하였다.

Fig. 12(a)는 일반 정류 회로의 출력 전력($P_{standard}$)으로 Eq. (4)를 통해 예상 할 수 있듯이 압전 센서의 정전 용량(C_p)의 증가량의 역수에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다.

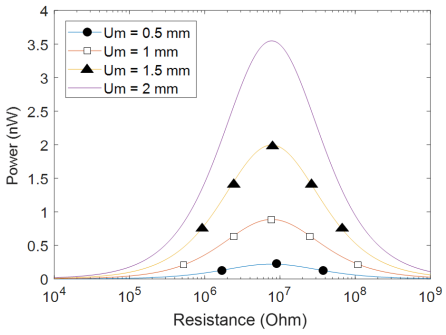
Fig. 12(b)는 P-SSHI 정류 회로의 출력 전력(P_{P-SSHI})으로 Eq. (9)를 통해 예상 할 수 있듯이 압전 센서의 정전 용량(C_p)의 증가량의 역수에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 $P_{standard}$와 P_{P-SSHI}를 비교하였을 때 전체적으로 P-SSHI 정류 회로가 1.82배 더 높은 전력을 출력하는 것을 알 수 있다.

Figs. 10 ~ 13을 통해 일반 정류 회로 대비 P-SSHI 정류 회로의 경우 전력 효율이 적게는 1.8배 크게는 1.84배 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 스위칭 회로의 전기적 Q인자(Q_i)에 따른

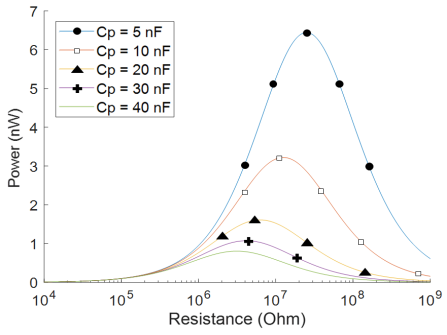


(a) Standard rectifier circuit

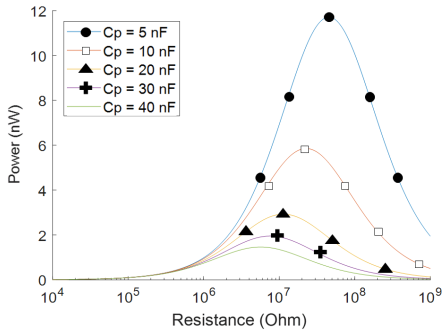


(b) P-SSHI rectifier circuit

Fig. 11. Output power of rectifier circuit by displacement of piezoelectric sensor.



(a) Standard rectifier circuit



(b) P-SSHI rectifier circuit

Fig. 12. Output power of rectifier circuit by capacitance of piezoelectric sensor.

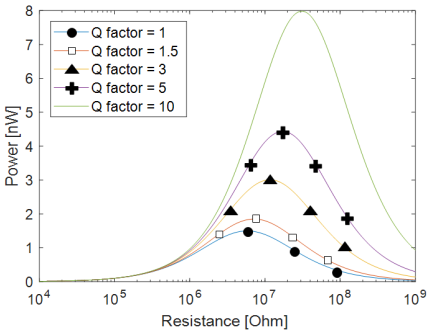


Fig. 13. Output power of P-SSHI rectifier circuit by Q factor of switching circuit.

정류 회로의 출력 전력 변화를 분석하였다. 일반 정류 회로에서는 스위칭 회로가 포함되어 있지 않기 때문에 P-SSHI 정류 회로에 대해 모의 실험을 진행하였다. Q인자가 증가하면 반전계수(γ)는 Eq. (7)에 따라 지수 함수적으로 감소하게 되어 결과적으로 P_{P-SSHI}는 Eq. (9)에 의해 $(1-\gamma)$의 역수에 비례하여 증가함을 알 수 있다.

IV. 실측 실험

전술한 이론적인 전력 분석 결과를 검증하기 위하여 Fig. 8과 동일한 세기의 선풍기 바람을 이용하여 공기 흐름을 발생하여 PVDF 압전 센서로부터 생성되는 전력을 측정하였다. 따라서 진동 주파수는 2 Hz이고, 압전 센서의 진폭 변위는 1.5 mm이다. 설계된 전파 정류 회로와 P-SSHI 스위칭 회로를 제작하여 Fig. 14와 같이 실험을 하였다. 다양한 부하 저항에 따른 전압을 측정하여 전력을 계산하였다.

전파정류회로 및 P-SSHI 정류회로에서 측정된 부하에 따른 전압은 Fig. 15에 나타내었다. 또한 부하에 따른 전력은 Fig. 16에 표시하였다.

일반 정류회로의 경우 부하저항이 4 MΩ일 때 이론적인 최대 전력은 1.098 nW이지만, 실험을 통한 결과는 5 MΩ일 때 최대 출력 전력은 1.156 nW을 얻었다. P-SSHI 정류회로의 경우 부하저항이 8 MΩ일 때 이론적인 최대 전력은 1.996 nW이지만, 실험을 통해서는 동일한 8 MΩ부하에서 1.953 nW 최대 전력을 얻었다.

끝으로, 슈퍼커패시터를 이용한 에너지 저장 회로

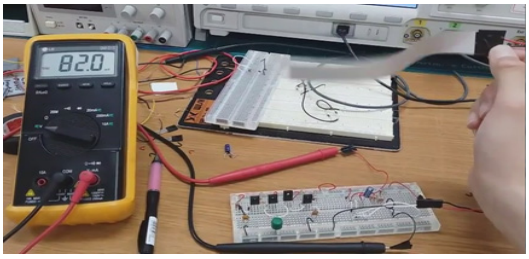


Fig. 14. Experiment setup.

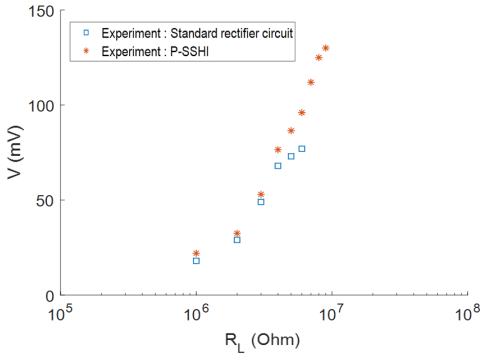


Fig. 15. Output voltage of harvest circuit by load resistance.

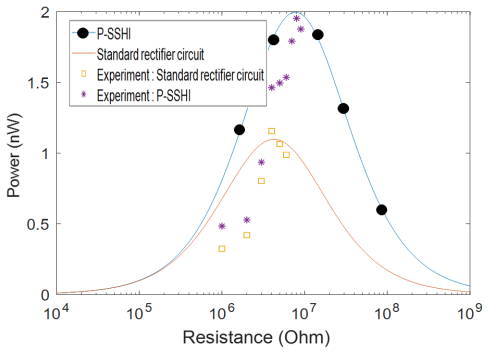


Fig. 16. Output power of harvest circuit by load resistance.

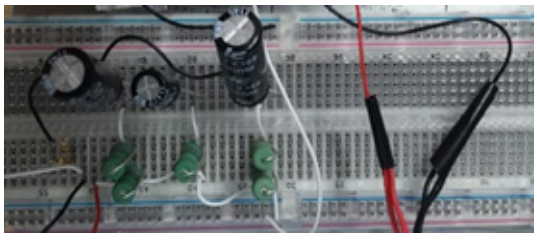


Fig. 17. Energy storage circuit design of supercapacitor.

는 Fig. 17과 같이 구현하였다. 첫 번째 단에서는 0.6 Ω(R_i)과 10 F(C_i)을 직렬 연결하여 시상수(τ_i)는 6 s, 두 번째 단은 62 Ω(R_d)과 1 F(C_d)을 직렬 연결하여

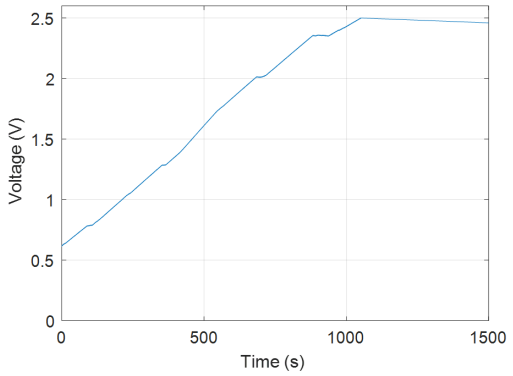


Fig. 18. Output voltage waveform of supercapacitor.

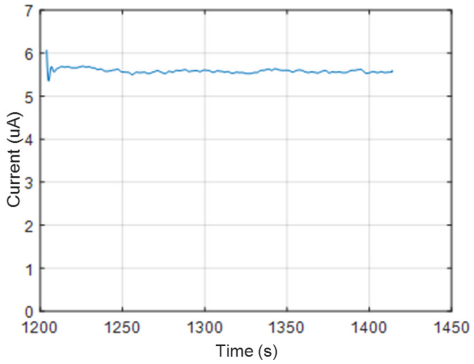


Fig. 19. Output current waveform after charging of supercapacitor.

시상수(τ_d)는 62 s, 세 번째 단은 124 Ω(R_l)과 10 F(C_l)을 직렬 연결하여 시상수(τ_l)는 1240 s가 되도록 에너지 저장 회로를 Fig. 17과 같이 구현하였다.

PVDF를 바람의 와류현상에 의한 진동은 앞서 에너지 하베스팅 회로 실험의 방법과 동일하게 진행하였다. 전압은 Labview의 DAQ(Data Acquisition)를 활용하여 데이터를 수집하였고 전류는 슈퍼커패시터가 완충된 이후 전류계측기를 통하여 측정하였다. 측정된 에너지 저장회로의 출력 전압은 Fig. 18과 같다. 최대 시상수(τ_l) 1240 s에 의해 슈퍼커패시터가 충전 될 때 까지 1100 s 걸렸으며 전압은 2.5 V로 충전된 이후 방전으로 인해 서서히 전압이 감소하는 추세를 보였다.

슈퍼커패시터의 완전히 충전된 이후 출력되는 전류파형은 Fig. 19와 같다. Fig. 19에서 보는 바와 같이 최대 출력 전류은 6 uA이며, 충전 및 방전으로 인해 전류출력이 안정적인 전류가 생산됨을 알 수 있다. 구현된 저장회로의 순간 최대 전압인 2.5 V와 최대 출력 전류는 6 uA이다. 이때 최대 출력 전력은 15 uW이며 슈퍼커패시터가 완충된 이후 평균 전압은 2.5 V이며, 평균 전류는 5.7 uA이다. 따라서 평균 전력은 14.25 uW이다.

V. 결 론

본 논문은 바람의 와류현상에 의한 압전 센서 진동을 활용하여 에너지 하베스팅 회로의 전력을 이론적으로 분석하고 실험을 통해 검증했다. 고려된 일반적인 정류회로와 SSHI 를 병렬로 연결한 정류회로를 비교한 결과 P-SSHI 정류회로의 전력이 1.81배 증가되며, 실험을 통해 전력 효율이 1.69배 증가됨을 확인하였다. 또한 슈퍼커패시터를 이용한 저장하는 회로를 구현하여 안정적으로 14.25 uW 전력을 공급할 수 있어 저장회로를 통해 nW급의 출력 전력을 uW급으로 공급할 수 있어 2차 전지로써 활용이 가능함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음(계약번호 UD170023DD).

References

1. X. D. Do, Y. H. Ko, H. H. Nguyen, H. B. Le, and S. G. Lee, “An efficient parallel SSHI rectifier for piezoelectric energy scavenging systems,” 13th ICACT, 1394-1397 (2011).
2. L. Garbuio, M. Lallart, D. Guyomar, C. Richard, and D. Audigier, “Mechanical energy harvester with ultralow threshold rectification based on SSHI nonlinear technique,” IEEE Trans. Ind. Electron. **56**, 1048-1056 (2009).
3. C. Peters, J. Handwerker, D. Maurath, and Y. Manoli, “A sub-500 mV highly efficient active rectifier for energy harvesting applications,” IEEE Trans. Circuit and System, **58**, 1542-1550 (2011).
4. X. D. Do, H. H. Nguyen, S. K. Han, D. S. Ha, and S. G. Lee, “A self-powered high-efficiency rectifier with automatic resetting of transducer capacitance in piezoe-

lectric energy harvesting systems," IEEE Trans. VLSI, **23**, 444-453 (2015).
5. H. -J. Kim and G. -B. Chung, "AC/DC resonant piezo-powered boost converter for piezoelectric energy harvestingv" (in Korean), J. KIPE. 448-495 (2009).
6. A. Giacomello and M. Porfiri, "Underwater energy harvesting from a heavy flag hosting ionic polymer metal composites," J. Applied Physics, **109**, 084903 (2011).
7. G. W. Taylor, J. R. Burns, S. MKammann, W. B. Powers, and T. R. Welsh, "The energy harvesting eel: a small subsurface ocean/river power generator", IEEE J. Oceanic Engineering, **26** (2001).
8. R. Song, X. Shan, J. Li, T. Xie, and Q. Sun, "A piezoelectric energy harvester with vortex induced vibration," Symp. Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications, 322-325 (2015).
9. S. K. Kumar, C. Bose, S. F. Ali, S. Sarkar, and S. Gupta, "Investigations on a vortex induced vibration based energy harvester," Applied Physics Lett. **111**, 243903 (2017).
10. M. Lallart, Y. Chieh, and D. Guyomar, "Switching delay effects on nonlinear piezoelectric energy harvesting techniques," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 464-472 (2012).
11. L. Zhu, R. Chen, and X. Liu, "Theoretical analyses of the electronic breaker switching method for nonlinear energy harvesting interfaces," J. Intelligent material Systems and Structures, **23**, 441-451 (2012).
12. L. Zubieta and R. Bonert, "Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications," IEEE Transactions on Industry Applications, **36**, 199-205 (2000).

저자 약력

▸ 박 건 민 (Geon-Min Park)

2014년: 제주대학교 해양시스템공학과 학사 졸업
2018년 ~ 현재: 제주대학교 해양시스템공학과 석사과정
<관심분야> 에너지 변환회로 설계

▸ 이 종 현 (Chong-Hyun Lee)

1985년: 한양대학교 전자공학과 학사 졸업
1987년: Michigan Technological University 석사 졸업
2002년: 한국과학기술원(KAIST) 전기 및 전자공학과 박사 졸업
1990년 ~ 1995년: 한국전자통신연구원 선임연구원
2000년 ~ 2002년: ㈜KM Telecom 연구소장
2003년 ~ 2006년: 서경대학교 전자공학과 전임강사
2017년~2018년: Georgia Institute of Technology 방문교수
2006년 ~ 현재 제주대학교 해양시스템공학과 교수
<관심분야> 배열 신호처리, 기계학습 및 분류, 간섭 신호 제거, 전자파센서 설계, 에너지 변환 회로 설계

▸ 조 치 영 (Cheeyoung Cho)

1984년 2월: 부산대학교 기계설계공학과 (공학사)
1986년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
1992년 8월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
1986년 3월~1988년 2월: 한국중공업 열교환기 설계실 주임 연구원
1992년 10월 ~ 현재: 국방과학연구소 수중센서연구실 수석연구원
<관심분야> 수중음향센서