

정류다이오드의 특성이 저전력 압전발전기의 효율에 미치는 영향

김혜중*, 민현준, 강성묵, 김호성
 중앙대학교 전자전기공학부

The effect of rectifying diodes on the efficiency of Piezoelectric Micro-Power Generator

Hyejoong Kim, Hynjun Min, Sungmuk kang, Hoseong Kim
 School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University

Abstract - 본 논문에서는 기존의 Piezoelectric micropower generator 연구에서 주로 사용되던 Schottky 다이오드 대신 역방향 누설전류가 아주 작은 PAD1과 같은 다이오드를 사용함으로써 기계적 에너지로부터 전기적 에너지로의 에너지 변환효율을 획기적으로 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 시뮬레이션을 위해 실험결과를 초기 값으로 한 최적화된 등가회로를 구성하였으며, 실험과 PSPICE 시뮬레이션을 통해 분석한 결과 에너지 변환효율은 최고 100% 이상 증가됨을 알 수 있었다. 특히 미세한 진동으로부터의 매우 작은 기계적 에너지를 이용하는 경우에는 PAD1과 같이 역방향 누설전류가 아주 작은 다이오드를 이용해야만 전기에너지로의 변환이 가능함을 증명하였다.

1. 서 론

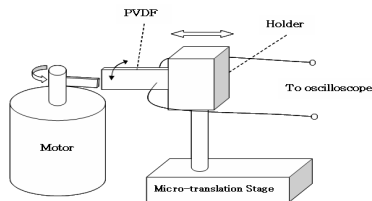
최근 ubiquitous 무선 센서 네트워크 기술의 발달은 일상생활에의 다양한 적용은 물론이고, 생태학적 혹은 군사적 목적으로의 응용까지 그 가능성을 인정받고 있다. 또한 점차 발전하고 있는 저전력 소자의 설계 및 제작기술은 이러한 ubiquitous 무선 센서들의 주기적인 구동에 필요한 에너지수준을 microwatt 정도로 낮추었으며, 이를 통해 자가발전 마이크로 센서 및 통신의 가능성을 크게 증가시켰다.

이러한 독립적인 전력공급을 위한 여러 가지 방법 중 가장 주목 받고 있는 방법은 바로 압전소자(piezoelectric transducer)의 진동으로부터 전기적 에너지를 얻는 방식이다. 높은 electromechanical coupling, 그리고 미세한 진동으로도 에너지 수집이 가능하다는 장점을 가진 압전소자를 이용한 MPG의 경우 압전소자 자체의 높은 내부저항 등의 이유로 에너지 변환효율이 특히 중요한 요소로 작용하게 되는데, 본 논문에서 확인한 바와 같이 역방향 누설전류가 작은 다이오드를 정류회로에 이용하고, 작은 용량의 커패시터와 그에 따른 높은 전압을 이용하는 방식으로 MPG 연구를 진행한다면 보다 효율적인 MPG의 개발과 이를 이용한 다양한 분야에서의 응용이 가능할 것으로 판단된다.

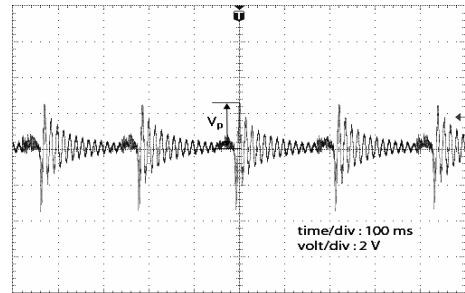
2. 본 론

2.1 저장커패시터의 충전량 비교 실험

저장커패시터의 충전량 비교 실험을 위해 진동하는 PVDF 외팔보(Cantilever)를 그림 1과 같이 구성하여 실험에 임하였다. 실험에 사용된 PVDF 외팔보는 5 mm × 20 mm × 90 μm의 크기를 가지며, micro-translation stage위에 고정되어 출력전압의 크기와 주기를 조절할 수 있도록 하였다. 외팔보의 최대 출력전압(V_p)은 0.1 ~ 2.5 V로 조정하면서 실험하였으며, 그림 2에서 보는바와 같이 230 ms의 주기로 편이 충돌할 때 발생하는 전압은 고유 주파수가 약 72 Hz인 감쇠진동임을 알 수 있다. 또한 이때 PVDF 외팔보의 내부 임피던스는 수십 MΩ에 이르므로 (Sect. 2.2에서 설명) Thevenin 등가회로에 의한 전원의 출력전압은 그림 2의 V_p 보다 훨씬 크다고 가정할 수 있다.



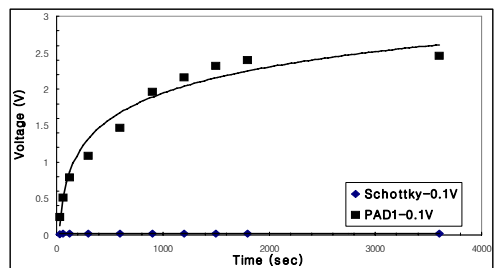
〈그림 1〉 진동하는 PVDF의 출력전압 측정



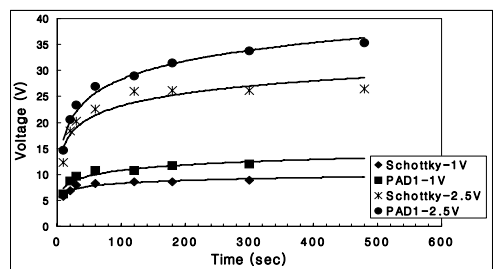
〈그림 2〉 진동하는 PVDF의 출력전압 (가격주기 : 230 ms)

한편 bridge 정류회로와 저장커패시터를 이용한 충전 속도 측정 실험은 100 nF의 저장커패시터를 이용하였는데 이때 커패시터의 용량이 너무 크면 충전시간이 너무 길어지게 되고, 또 반대로 용량이 너무 작으면 부하를 구동할 수 있을 정도의 충분한 에너지를 충전할 수 없게 된다.

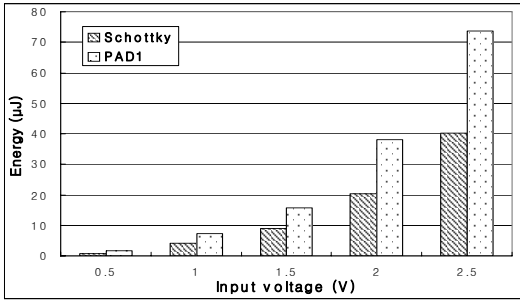
첫 번째로 고주파 특성이 우수하고 약 0.2 V의 매우 낮은 순방향 전압강하의 특성으로 많은 MPG연구에서 사용되는 STMicroelectronics®의 1N5711 Small-signal Schottky 다이오드를 선택하여 실험하였다. 다음으로는 Linear Systems의 PAD1 다이오드를 선택하여 실험하였는데, PAD1 다이오드는 비록 Schottky 다이오드에 비해 순방향 전압강하는 크지만(0.8 V 정도), 역방향 누설전류가 대단히 작다는 것이 특징이다. 실제로 역방향 전압이 20 V일때 1N5711의 누설전류는 30 nA인 반면 PAD1의 누설전류는 1 pA로 Schottky 다이오드의 1/30,000 정도가 된다. 즉, PVDF 외팔보 자체의 특성으로 수 μA 정도의 매우 작은 충전전류가 사용되는 점(Sect. 2.2에서 설명)을 고려해보면 PAD1 다이오드의 충전능력이 Schottky 다이오드를 사용한 것에 비해 훨씬 좋을 것으로 예상할 수 있으며, 그 실험결과를 아래에 도시하였다.



〈그림 3a〉 시간에 따른 충전전압($V_p=0.1$ V, 실선은 추세선 임)



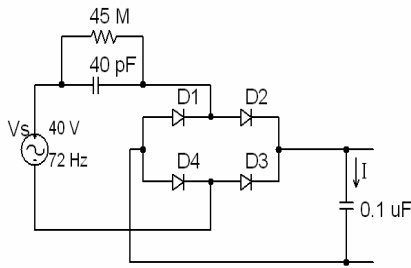
〈그림 3b〉 시간에 따른 충전전압($V_p=1$ V, 2.5 V, 실선은 추세선 임)



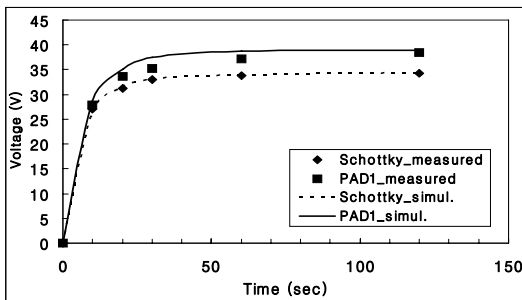
〈그림 4〉 PVDF 출력전압에 따른 충전에너지 비교

실험으로 측정된 값을 점으로 표기하고, 이에 따른 단순한 추세선을 추가하여 그림 3에 나타내었다. 특히 그림 3a를 보면 PVDF 출력전압 (V_p)이 0.1 V 정도로 아주 낮은 경우에는 Schottky 다이오드로는 충전이 불가능하지만, 역방향누설이 거의 없는 PAD1 다이오드를 사용하면 충전이 가능함을 알 수 있다. 즉, 실생활에 존재하는 미세한 진동을 이용한 전기에너지의 충전이 가능함을 의미하는 것이다. 또한 출력전압이 큰 경우에도 그림 3b에 보인바와 같이 실험으로 확인한 모든 시간대에서 PAD1 다이오드의 충전효율이 Schottky 다이오드보다 좋다는 사실을 확인하였으며, 그에 따른 충전에너지를 그림 4에 그래프로 비교하였다. 그래프를 살펴보면 에너지 변환효율이 크게는 2배 이상 증가하였음을 알 수 있고, 이를 통해 매우 작은 충전전류를 이용한 PMPG에는 역방향 누설전류가 작은 PAD1과 같은 다이오드를 사용해야 함을 확인하였다.

2.2 PSPICE 시뮬레이션과 등가회로

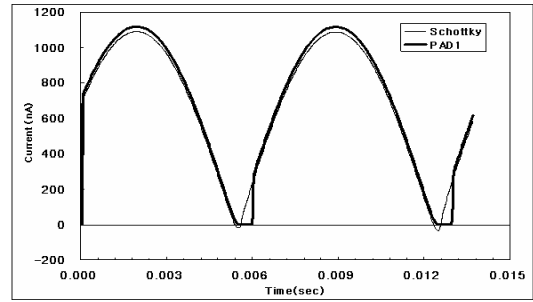


〈그림 5〉 충전회로의 등가회로

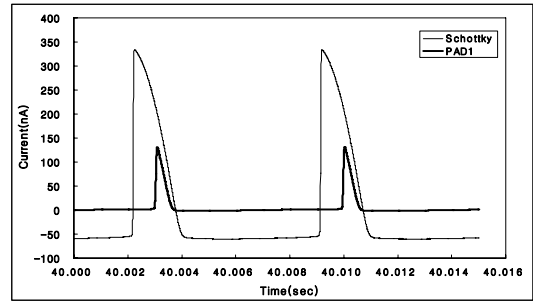


〈그림 6〉 시간에 따른 충전전압의 측정결과와 시뮬레이션 결과

커패시터의 충전량 비교실험을 PSPICE 시뮬레이션 하기위해 본 논문에서는 PVDF 외팔보를 그림 5와 같이 Thevenin 등가회로로 대체하였다. 이때 부하의 저항에 따라 감쇠정도가 달라지는 문제점을 해결하기 위해 PVDF 외팔보의 가격주기를 줄여서 교류전압원의 출력과 유사하게 하였으며, RLC meter로 측정된 외팔보의 정지상태 커패시턴스 및 누설 저항성분을 초기값으로 하여 시뮬레이션결과와 측정값 사이의 오차가 최소가 되도록 반복 시뮬레이션 하였다. 그 결과, 그림 5와 같이 PVDF 등가발생전압으로 40 V, 등가 내부커패시턴스와 내부저항으로 각각 40 pF과 45 MΩ을 구하였으며, 그림 6에 시간에 따른 충전전압의 측정결과와 시뮬레이션 결과를 도시하였다. 비록 감쇠진동을 일정한 크기의 정현파 전압원으로 근사하였지만 시뮬레이션결과와 실험결과와 거의 일치하였으며, 이를 근거로 소스 임피던스가 수십 MΩ 정도이고 충전전류가 수 μ A 정도라는 앞서의 가정이 옳음을 확인하였다 ($|40 \text{ pF} \parallel 45 \text{ M}\Omega| = 34.8 \text{ M}\Omega @72 \text{ Hz}$, $40 \text{ V}/34.8 \text{ M}\Omega = 1.15 \text{ }\mu\text{A}$).



〈그림 7〉 PSPICE에 의한 충전초기 커패시터로 흘러가는 전류



〈그림 8〉 PSPICE에 의한 충전말기 커패시터로 흘러가는 전류

그림 7,8에 PISPICE를 사용하여 계산한 초기의 충전전류와 saturation 상태의 충전전류를 도시하였다. 그림 7을 자세히 보면 이미 Schottky 다이오드는 작기는 하나 누설전류가 흐르는 것을 볼 수 있고, 이때 최대 전류는 1.15 μ A 정도로 커패시터의 전압을 급속도로 증가시킨다. 이때 점차 충전전압이 높아짐에 따라 Schottky 다이오드를 사용한 정류회로의 누설전류는 점차 커지게 되고 결국에는 그림 8과 같이 하나의 충전 주기 동안 누설된 전류의 총합(누설전하)과 주입된 전류의 총합(주입전하)이 같아져서 더 이상 충전전압이 증가하지 않는 saturation상태에 이르게 된다. 한편, 이러한 상황에서도 PAD1 다이오드를 사용한 정류회로에서는 충전이 계속 되고 있음을 그림을 통해 확인할 수 있고, 따라서 충전효율에 있어서 PAD1 다이오드가 Schottky 다이오드에 비해 훨씬 우수한 성능을 갖고 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 piezoelectric micropower generator (PMPG)의 연구에서 기존에 주로 사용되던 Schottky 다이오드를 역방향 누설전류가 1 μ A 이하로 매우 작은 PAD1 다이오드로 바꿈으로써 기계적 에너지로부터 전기적 에너지로의 에너지 변환 효율을 두 배 이상 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 즉 발생전압의 주파수가 500 Hz 이하로 낮고 전압원의 내부 임피던스가 매우 커서 최대 충전전류가 수 μ A 이하인 경우, 보다 효율적인 유휴에너지 수집 장치를 구현하기 위해서는 역방향 누설전류가 아주 작은 다이오드를 사용해야 함을 확인하였다.

우리 일상생활에는 기계적 에너지로부터 전기적 에너지로의 변환이 가능한 미세한 진동들이 항상 존재하고 있다. 또 이러한 진동들로부터 전기적 에너지를 수집 및 사용할 때 가장 크게 고려해야 할 점이 바로 에너지 변환효율이다. 본 논문에서 보인바와 같이 역방향 누설 전류가 아주 작은 다이오드를 이용하여 유휴에너지를 수집한다면 PMPG의 성능이 크게 향상됨은 물론이고, 이를 통해 향후에는 더욱 다양한 분야에서 PMPG가 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Amirtharajah and A. Chandrakasan, "Self-powered signal processing using vibration based power generation," *IEEE J. Solid-State Circuits*, **33**, pp. 687-695, 1998.
- [2] Y C Shu and I C Lien, "Efficiency of energy conversion for a piezoelectric power harvesting system", *J. Micromech. Microeng.*, **16**, 2429-2438, 2006.
- [3] Y.B. Jeon, R. Sood, J.-h. Jeong, S.-G. Kim, "MEMS power generator with transverse mode thin film PTZ", *Sensors and actuators, A, Physical* 122:11, 16-22, 2005.