

저누설 다이오드를 사용한 저전력 압전발전기의 효율 개선에 관한 연구

論 文

56-5-19

Energy Conversion Efficiency Improvement of Piezoelectric Micropower Generator Adopting Low Leakage Diodes

金 惠 中* · 姜 聖 默** · 金 鎬 成†
(Hyejoong Kim · Sungmuk Kang · Hoseong Kim)

Abstract - In this paper, we show that, in case of piezoelectric micropower generator, just replacing Schottky diodes in the bridge rectifier with ultra-low reverse leakage current diodes improves the mechanical-to-electrical energy conversion efficiency by more than 100%. Experimental and PSPICE simulation results show that, due to the ultra-low leakage current, the charging speed of the circuit employing PAD1 is higher than that of the circuit employing Schottky diodes and the saturation voltage of the circuit employing PAD1 is also higher. This study suggests that, when the internal impedance of source is very large (a few tens of M Ω) such that maximum charging current is a few microamperes or less, in order to realize literally the energy scavenging system, ultra-low reverse leakage current diodes should be used for efficient energy conversion. Since low-level vibration is ubiquitous in the environment ranging from human movement to large infrastructures and the mechanical-to-electrical energy conversion efficiency is much more critical for use of these vibrations, we believe that the improvement in the efficiency using ultra-low leakage diodes, as found in this work, will widen greatly the application of piezoelectric micropower generator.

Key Words : Piezoelectric, MPG, Energy scavenging, low leakage diode, bridge rectifier

1. 서 론

최근 ubiquitous 무선 센서 네트워크 기술의 발달은 일상 생활에 적용되어 몸에 부착이 가능한 초소형 건강 검진기, 그리고 생태학적 응용 혹은 군사적 목적으로의 응용에 이르기 까지 많은 분야에서 그 가능성을 인정받고 있다. 수초마다 한 번씩 작동하는 이러한 무선 센서들은 저전력 소자의 설계 및 제작기술이 개발되면서 그 구동에 필요한 에너지 수준이 microwatt 정도로 크게 줄어들었으며, 그 결과 자가발전 마이크로 센서 및 통신의 가능성이 크게 증진되었다 [1]. 비록 아직까지는 저가의 소형전지가 무선 센서 네트워크의 동력원으로 주로 이용되고 있지만, 이러한 무선 센서 네트워크의 동력원이 추가적인 유지보수의 번거로움이 없이 그 수명이 획기적으로 연장될 수 있다면 보다 편리한 ubiquitous computing으로의 발전이 가능해 질 것이다 [2]. 이러한 이유로 도처에 산재해 있으나 사용되지 않고 버려지는 에너지를 수집하는 유희에너지 수집(energy scavenging, energy harvesting)기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 무선 시스템 및 임베디드 장치에 독립적으로 전력을 공급하기 위한 장치의 개발에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 이들은 주로 태양열 에너지, 온도의 차이, 그리고

진동 에너지를 포함한 다양한 에너지원의 이용을 기반으로 하고 있다 [3].

그러나 태양전지를 사용한 방법은 어두운 사무실, 또는 빛이 없는 곳에서는 충분한 전력을 제공할 수 없다는 단점을 갖고 있고, 온도 차이를 사용한 방법 역시 조그만 부피 내에서는 소형 무선 센서를 작동시킬만한 충분한 전력을 공급할 수 없다는 단점이 있다 [3]. 이러한 이유로 현재 상당수의 micropower generator(MPG)에 대한 연구들은 압전소자(piezoelectric transducer)의 진동으로부터 전기적 에너지를 얻는 방법의 개발에 주력하고 있다 [4, 5, 6]. 이러한 압전소자는 우리 주변에 흔히 존재하는 작은 진동으로도 작동이 가능할 뿐만 아니라, 높은 electromechanical coupling을 갖고 있고, 외부 전압원이 필요 없으며, MEMS 공정으로 구현이 가능하다는 장점들을 갖고 있기 때문이다 [6]. 따라서 많은 연구들은 이러한 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 에너지 변환효율을 높이기 위해 최적의 electromechanical coupling과 고효율의 정류회로 개발에 노력하고 있으며 [10, 11, 12], 그 결과, 정류회로 및 정전압 출력 회로의 설계에서 많은 성과를 이루고 있다 [3, 7, 8, 9].

발생된 전력의 실질적인 이용을 위해서는 안정화된 직류 전압이 필요하지만 진동하는 압전소자에서는 교류전압이 발생되므로, 대부분의 연구에서는 정류회로와 저장커패시터를 사용하여 직류 전압을 얻고 있다. 이때 압전소자는 보통 낮은 주파수 대역(10~100 Hz)으로 전압을 발생하게 되는데, 이 과정에서 bridge 정류회로에는 순방향 전압 강하가 적은 Schottky 다이오드가 주로 쓰이고 있다 [6]. 하지만 이와 같은 낮은 주파수 대역에서는 압전소자 자체의 내부임피던스가 대단히 커지므로(수 십 M Ω , Sect.2.2에서 설명) 커패시터

* 學生會員 : 中央大 電子電氣工學部 碩士

** 學生會員 : 中央大 電子電氣工學部 碩士

† 교신저자, 正會員 : 中央大 工大 電子電氣工學部 教授 · 工博

E-mail : hkim@cau.ac.kr

接受日字 : 2007年 3月 26日

最終完了 : 2007年 4月 10日

가 충전될 때에 수 μA 이하의 매우 작은 전류가 흐르게 된다[13]. 그런데 커패시터에 충전된 전압이 입력전압보다 크게 되는 시간 동안에는 다이오드에 역방향 전압이 걸리게 되므로 정류회로 다이오드의 역방향 누설전류 특성이 순방향 전압강하 특성보다 충전효율에 더욱 큰 영향을 끼치게 된다. 따라서 본 논문에서는 역방향 누설전류가 매우 작은 다이오드를 bridge 정류회로에 사용하는 것이 Schottky 다이오드를 사용한 것보다 충전 속도가 더욱 빠를 뿐만 아니라, 기계적 에너지에서 전기적 에너지로의 에너지 변환효율도 획기적으로 높일 수 있다는 사실을 실험과 PSPICE 시뮬레이션을 통하여 증명하였다.

2. 본 론

2.1 실험결과

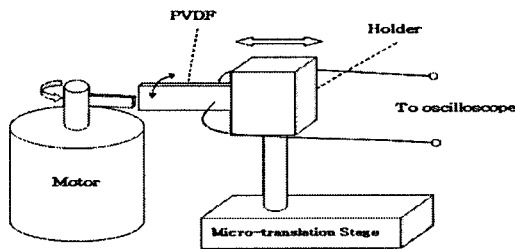


그림 1 진동하는 PVDF의 출력전압 측정실험
Fig. 1 Setup for the measurement of terminal output voltage of vibrating PVDF

진동하는 압전소자(PVDF, Polyvinylidene Fluoride)의 출력 전압을 그림 1과 같은 방법으로 측정하였다. 실험에 사용된 PVDF 외팔보(Cantilever)는 그 크기가 $5\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 90\mu\text{m}$ 이며 micro-translation stage위에 고정되어 있다. 직류모터의 회전축에 부착된 핀이 회전을 하며 주기적으로 외팔보를 가격하면 외팔보는 그 다음 가격까지 고유진동 수로 감쇠진동하게 되며, 이 감쇠진동 하나의 지속시간은 직류모터의 회전속도로 조절하였다. 또한 이때 진동의 크기는 그림 1과 같이 외팔보와 직류모터의 축에 고정된 핀 사이의 거리를 micro-translation stage로 가변하며 조절하였다. 진동하는 PVDF 외팔보로부터 출력 전압은 입력임피던스가 $1\text{ M}\Omega$ 인 오실로스코프로 측정하였으며 그 결과는 그림 2와 같다.

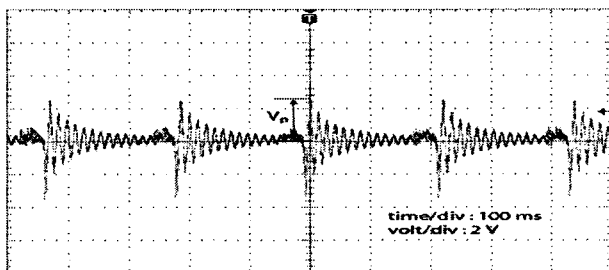


그림 2 진동하는 PVDF의 출력전압(가격주기 : 230 ms)
Fig. 2 Terminal output voltage of vibrating PVDF (impact interval : 230 ms)

외팔보의 최대 출력 전압(V_p)을 $0.1 \sim 2.5\text{ V}$ 로 조정하면서 측정하였으며 그림 2에서 보는 바와 같이 230 ms의 주기로 핀이 충돌할 때 발생하는 전압은 고유 주파수가 약 72Hz인 감쇠진동임을 알 수 있다. PVDF 외팔보의 내부 임피던스는 수십 $\text{M}\Omega$ 에 이르므로(Sect.2.2에서 설명), Thevenin 등가회로에 의한 전원의 출력 전압은 그림 2의 V_p 보다 훨씬 크다고 가정 할 수 있다.

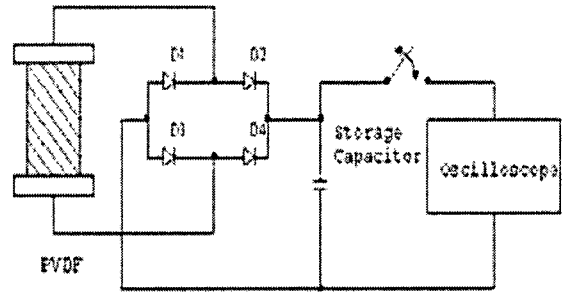


그림 3 커패시터 충전실험
Fig. 3 Setup for the measurement of storage capacitor voltage

그림 3에 bridge 정류회로와 storage 커패시터를 이용한 충전 속도 측정 회로를 도시하였다. 커패시터가 충전되는 동안 입력임피던스가 $1\text{ M}\Omega$ 인 오실로스코프를 통해 흐르는 전류 때문에 충전 속도가 느려지는 것을 방지하기 위하여 스위치를 사용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 Bridge 정류회로는 4개의 다이오드로 구성 되었으며, 본 실험에서는 100 nF 의 커패시터에 전기에너지를 충전하였다. 이때 이 커패시터의 용량이 너무 크면 충전시간이 너무 길어지며 또 반대로 커패시터의 용량이 너무 작으면 부하를 구동할 수 있을 정도의 충분한 에너지를 충전할 수 없게 된다. 첫 번째로 STMicroelectronics®의 1N5711 small-signal Schottky 다이오드를 선택하여 실험하였는데, 이는 고주파 특성이 우수하고 약 0.2 V 의 매우 낮은 순방향 전압강하 특성을 갖기 때문에 많은 MPG 연구에서 사용되고 있기 때문이다[2]. 다음으로는 비록 Schottky 다이오드에 비해 순방향 전압 강하는 크지만(0.8 V 정도), 본 연구에서 조사한 바로는 역방향 누설 전류가 가장 작은 Linear Systems의 PAD1 다이오드를 선택하여 실험하였다. 실제로 역방향 전압이 20 V 일 때 1N5711의 누설 전류는 30 nA 인 반면 PAD1의 누설 전류는 1 pA 로 Schottky 다이오드의 $1/30,000$ 정도이다. 한편, 약 72 Hz 정도의 고유 주파수로 진동하는 외팔보의 내부 임피던스는 수십 $\text{M}\Omega$ 에 달하므로 (Sect.2.2에서 설명) 커패시터 충전에 사용되는 전류는 20 V 를 기준으로 μA 수준이 될 것이다. 그러므로 이렇게 작은 충전전류를 위에 언급한 다이오드의 역방향 누설전류와 비교해보면, PAD1 다이오드가 Schottky 다이오드보다 충전성능이 훨씬 좋을 것으로 예상 할 수 있다.

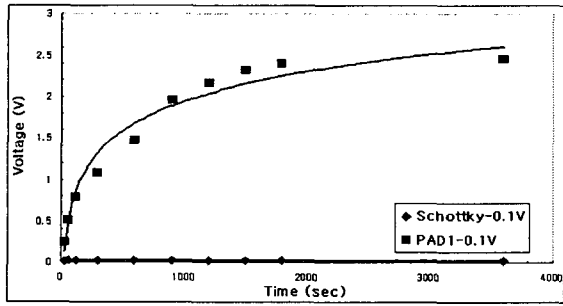


그림 4(a) 시간에 따른 충전전압($V_p=0.1$ V, 실선은 추세선 임)
 Fig. 4(a) Measured storage capacitor voltage($V_p=0.1$ V, solid line : curve fitting)

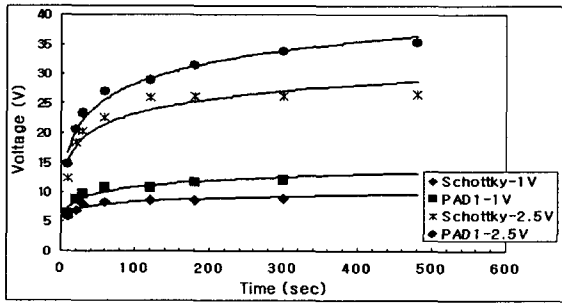


그림 4(b) 시간에 따른 충전전압($V_p=1$ V, 2.5 V, 실선은 추세선 임)
 Fig. 4(b) Measured storage capacitor voltage ($V_p=1$ V, 2.5 V, solid line : curve fitting)

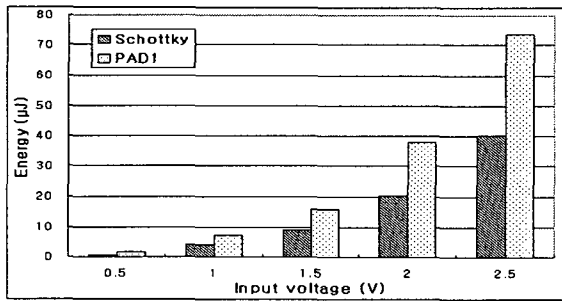


그림 5 PVDF 출력전압에 따른 충전에너지 비교
 Fig. 5 Comparison of stored energy

실제 실험에서 측정된 값을 점으로 표기하고, 이에 따른 단순한 추세선을 추가하여 실험결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4a를 보면 PVDF 출력전압(V_p)이 0.1 V 정도로 매우 낮은 경우에는 Schottky 다이오드를 이용한 회로로는 충전이 불가능 하지만, 역방향누설이 거의 없는 다이오드를 사용하면 충전이 가능함을 알 수 있다. 이는 대단히 중요한 결과로서 진동의 크기가 매우 낮은 조건에서도 실제적인 유흥에너지 수집(energy scavenging, energy harvesting)이 가능함을 보여준다. 또한 실험으로 확인한 모든 시간대에서

PAD1 bridge 정류회로가 Schottky bridge 정류회로보다 더 빨리, 보다 높은 saturation 전압까지 충전이 된다는 사실을 확인하였다. 그림 4에서는 이러한 충전 속도 및 전압의 차이가 크게 보이지 않을 수도 있지만, 그림 5와 같이 커패시터에 충전된 에너지를 계산해보면 그 차이를 확연히 알 수 있다. 즉, PVDF 외팔보의 최대 출력전압 V_p 가 각각 0.5 V, 2.5V인 경우, PAD1을 사용하면 충전된 에너지가 각각 116%, 82%씩 대폭 증가하였다. 즉 Schottky 다이오드를 역방향 전류가 매우 적은 PAD1 다이오드로 바꿈으로써 기계적 에너지에서 전기적 에너지로의 에너지 변환효율을 약 2 배정도, 또는 그 이상으로 증가시킬 수 있었다. 따라서 본 연구에서와 같이 소스의 내부 임피던스가 매우 크고 상대적으로 발생하는 전압이 낮은 경우 즉, 매우 작은 충전전류가 흐르는 PMPG 개발에는 기존에 주로 사용되던 Schottky 다이오드 대신 역방향 누설전류가 작은 PAD1 다이오드를 사용하여 bridge 정류회로를 구성해야 한다는 사실을 확인할 수 있었다.

2.2 Equivalent Circuits and PSPICE simulation

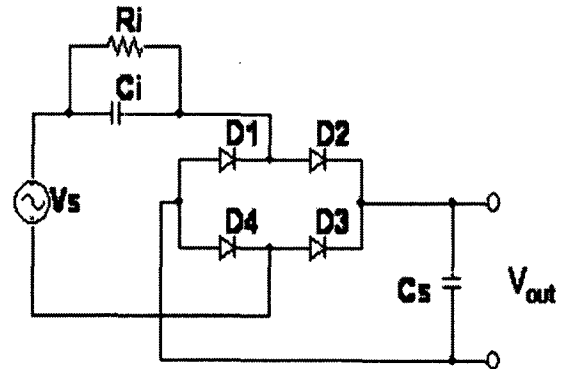


그림 6 충전회로의 등가회로
 Fig. 6 Equivalent circuit of charging circuit

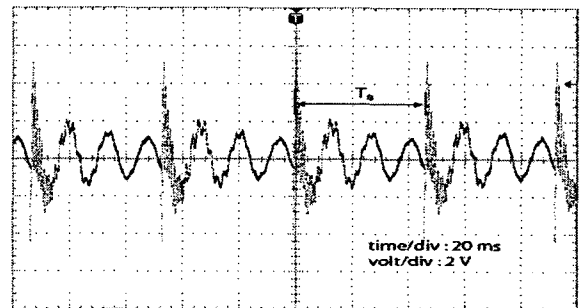


그림 7 진동하는 PVDF의 출력전압($T_s = 50$ ms)
 Fig. 7 Terminal output voltage of vibrating PVDF ($T_s = 50$ ms)

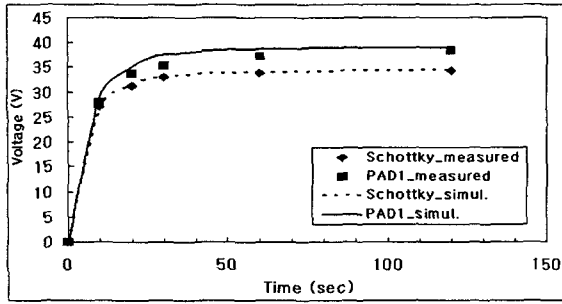


그림 8 시간에 따른 충전전압의 측정결과와 시뮬레이션 결과($T_s = 50$ ms)

Fig. 8 Measured and simulated storage capacitor voltage($T_s = 50$ ms)

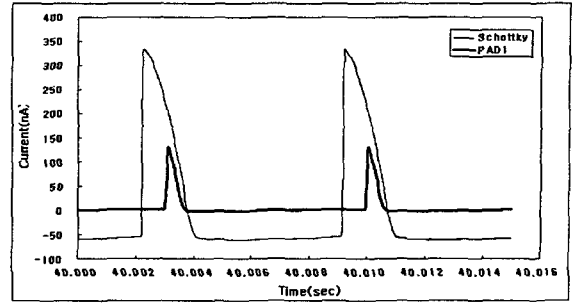


그림 10 PSPICE에 의한 충전말기의 커패시터로 흘러가는 전류

Fig. 10 Simulated current flowing into the storage capacitor in saturation charging state

그림 3의 충전회로를 PSPICE 시뮬레이션 하기위해 본 논문에서는 진동하는 PVDF 외팔보를 그림 6과 같이 교류 전압원과 내부임피던스 이루어진 Thevenin 등가회로로 대체하였다[6]. 이때 외팔보의 감쇠진동 고유 주파수는 일정하게 유지되지만 감쇠정도는 부하의 저항에 따라 큰 차이를 보이게 되므로, 이를 시뮬레이션으로 완벽하게 재현하는 데에는 많은 어려움이 있다[14]. 따라서 이와 같은 전압감쇠의 영향을 줄이기 위해 그림 7과 같이 가격주기(T_s)를 50 ms 정도로 작게 하여 그림 3과 같은 방법으로 Schottky, PAD1 다이오드를 사용한 회로의 시간에 따른 충전전압을 측정하였고, 이를 시뮬레이션 결과와 비교하였다. RLC meter로 측정된 외팔보의 정지상태 커패시턴스 및 누설 저항성분을 초기값으로 하여 PSPICE 시뮬레이션결과와 측정값 사이의 오차가 최소가 되도록 반복 시뮬레이션 하였으며 그 결과, 그림 6의 PVDF 등가발생전압(V_i)으로 40 V, 등가 내부커패시턴스(C_i)로 40 pF, 그리고 등가 내부저항(R_i)으로 45 M Ω 을 구하였다. 그림 8에 시간에 따른 충전전압의 측정결과와 시뮬레이션 결과를 도시하였다. 비록 감쇠진동을 일정한 크기의 정현파 전압원으로 근사하였지만 시뮬레이션 결과는 실험결과와 거의 일치하였으며, 이를 근거로 소스 임피던스가 수십 M Ω 정도이고 충전 전압이 수 μ A 정도라는 앞서의 가정이 옳음을 확인하였다 ($|40 \text{ pF} \parallel 45 \text{ M}\Omega| = 34.8 \text{ M}\Omega @72 \text{ Hz}$, $40 \text{ V}/34.8 \text{ M}\Omega = 1.15 \mu\text{A}$).

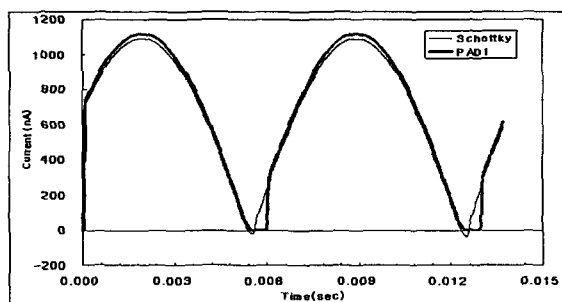


그림 9 PSPICE에 의한 충전초기의 커패시터로 흘러가는 전류
Fig. 9 Simulated current flowing into the storage capacitor in initial charging state

그림 9, 10에 PSPICE를 사용하여 계산한 초기의 충전전류와 saturation상태의 충전 전류를 도시하였다. 그림 9에서 충전이 시작되는 초기의 충전 전류를 자세히 보면, 순방향 전압 강하가 작은 Schottky 다이오드의 충전 전류가 PAD1 보다 먼저 흐르는 것을 볼 수 있고, 이미 Schottky 다이오드의 경우 작기는 하나 누설전류가 흐르는 것을 볼 수 있다 (0.006초 부근). 충전 초기의 최대전류는 1.15 μ A 정도가 되며 커패시터의 전압은 급속도로 증가하게 된다. 하지만 커패시터에 충전된 전압이 점점 높아짐에 따라 다이오드에 역방향으로 걸리는 전압도 높아지게 되고 이로 인해 역방향 누설 전류도 역시 커지면서 충전 속도가 느려지게 된다. 그러므로 Schottky 다이오드를 사용하여 bridge 정류회로를 구성한 경우, 언젠가는 하나의 충전주기 동안에 누설된 전류의 총합(누설전하)과 주입된 전류의 총합(주입전하)이 같아져서 더 이상 충전전압이 증가하지 않는 saturation상태에 이르게 된다. 그림 10을 보면 C_s 로 흘러 들어가는 (+)전류의 면적(주입전하)과 C_s 에서 역방향으로 흘러나오는 (-)전류의 면적(누설전하)이 같아진 상태를 확인할 수 있다. 이 (-)전류는 누설전류로서 Schottky 다이오드를 역방향으로 통과하여 흐르며 결과적으로 이 기간 동안 C_s 는 방전이 됨을 의미한다. 한편, PAD1 다이오드를 사용한 bridge 정류회로의 경우 Schottky 다이오드와 비교해 너무나 작은 역방향 누설 전류 (1 pA/30 nA)가 흐르므로 그림 10에서는 0으로 표시되며 이 누설 전류를 무시하면 충전만 된다는 것을 의미하므로, 결국 전압원의 최대전압까지 커패시터가 계속 충전되게 된다. 따라서 이러한 시뮬레이션 및 실험 결과를 정리해보면 충전효율에 있어서 PAD1 다이오드가 Schottky 다이오드보다 훨씬 우수하다는 결론을 얻을 수 있다.

한편, storage 커패시터의 용량이 1 μ F 이상으로 커지게 되면 커패시터의 충전전압 증가속도가 상대적으로 느려지게 되므로, 순방향 전압 강하의 특성이 더 많이 작용하는 구간이 길어지게 된다. 즉, 그림 11과 같이 충전이 시작되는 초반에는 Schottky 다이오드의 충전 속도가 PAD1보다 빠르게 나타나게 된다. 하지만, 커패시터의 전압이 점차 증가함에 따라 역방향 누설 전류의 특성이 커패시터의 충전에 더욱 큰 영향을 끼치게 되고, 결국 saturation전압은 PAD1 다이오드를 사용한 경우에 역시 더 커지게 된다.

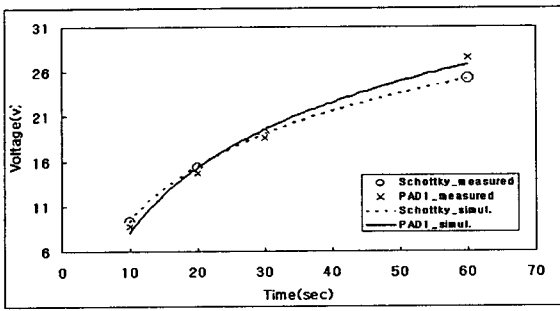


그림 11 2.2 μF 저장커패시터에 대한 시간에 따른 충전전압의 측정결과와 시뮬레이션 결과

Fig. 11 Measured and simulated storage capacitor voltage ($C_s=2.2 \mu\text{F}$)

3. 결론

본 논문에서는 piezoelectric micropower generator (PMPG)의 연구에서 기존에 주로 사용되던 bridge 정류회로의 Schottky 다이오드를 역방향 누설 전류가 1 pA 이하로 매우 작은 PAD1 다이오드로 바꿈으로써 기계적 에너지로부터 전기적 에너지로의 에너지 변환 효율을 두 배 이상 증가시킬 수 있다는 사실을 확인했다. 즉 발생전압의 주파수가 500 Hz 이하로 낮고 전압원의 내부 임피던스가 매우 커서 최대 충전전류가 수 μA 이하인 경우, 보다 효율적인 유틸리티 수집 장치를 구현하기 위해서는 역방향 누설전류가 아주 작은 다이오드를 사용해야 함을 확인하였다. 이러한 이론을 증명하기 위해 PSPICE 시뮬레이션 및 실험을 통해 PAD1을 이용한 회로가 충전 속도 특성과 saturation 전압 특성에 있어서 Schottky 다이오드를 이용한 회로보다 월등히 우수하다는 사실을 확인 하였다. 또한 Schottky 다이오드를 사용하여 커패시터가 일정 전압으로 saturation 되었을 때, 충전 전류를 통해 충전되는 전하의 총 합이 역방향 누설 전류를 통해 빠져 나가는 전하의 총 합과 같아진다는 사실을 PSPICE 시뮬레이션을 이용해 밝혔다.

우리 일상생활에는 기계적 에너지로부터 전기적 에너지로의 변환이 가능한 작은 진동들이 항상 존재하고 있다. 또 이러한 진동들로부터 전기적 에너지를 수집 및 사용할 때 가장 크게 고려해야 할 점이 바로 에너지 변환 효율이다. 본 논문에서 보인바와 같이 역방향 누설 전류가 아주 작은 다이오드를 이용한다면 PMPG의 성능을 크게 향상시킬 수 있음은 물론이고, 이를 통해 추후 더욱 많은 분야에서 PMPG가 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2005년도 중앙대 교내 학술 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] Chandrakasan A, Amirtharajah R, Goodman J and Rabiner W, 1998 Trends in low power digital signal processing *Int. Symp. Circuits Syst.* 4 604 - 7
- [2] R. Amirtharajah and A. Chandrakasan, "Self-powered signal processing using vibration based power generation," *IEEE J. Solid-State Circuits*, **33**, pp. 687-695, 1998.
- [3] S. Roundry, P. K. Wright, and J. Rabaey, 2003, A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes Elsevier Computer Communications, 26, 1131-1144.
- [4] H.W Kim, A. Batra, S. Priya, K. Uchino, D. Markley, R.E. Newnham, H.F. Hofmann, "Energy harvesting using a piezoelectric "cymbal" transducer in dynamic environment" *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 43, No. 9A, 2004, pp. 6178-6183.
- [5] M. Ericka, D. Vasicl, F. Costa, and G. Poulain, 2005, Predictive energy Harvesting from mechanical vibration using a circular piezoelectric membrane, *IEEE Ultrasonic Symp.* 946 - 949
- [6] Y.B. Jeon, R. Sood, J.-h. Jeong, S.-G. Kim, 2005, MEMS power generator with transverse mode thin film PTZ, *Sensors and actuators, A, Physical* 122:11, 16-22
- [7] Y C Shu and I C Lien, 2006, Efficiency of energy conversion for a piezoelectric power harvesting system, *J. Micromech. Microeng.*, **16**, 2429 - 2438
- [8] C. D Richards, M. J Anderson, D. F Bahr, and R. F Richards, 2004, Efficiency of energy conversion for devices containing a piezoelectric component, *J. Micromech. Microeng.* 14 717 - 721
- [9] G. K. Ottman, H. F. Hofmann, and G. A. Lesieutre, 2003, Optimized Piezoelectric Energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode, *IEEE Trans. Power Electronics*, VOL. 18, NO. 2, 696-730
- [10] Cho J, Anderson M, Richards R, Bahr D and Richards C 2005 Optimization of electro-mechanical coupling for a thin-film PZT membrane: I. Modeling *J. Micromech. Microeng.* **15** 1797 - 803
- [11] Shu Y C and Lien I C 2006 Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems *Smart Mater. Struct.* **15** 1499 - 512
- [12] Richards C D, Anderson M J, Bahr D F and Richards R F 2004 Efficiency of energy conversion for devices containing a piezoelectric component *J. Micromech. Microeng.* **14** 717 - 21
- [13] Chul H. Park, 2001, On the Circuit Model of Piezoceramics, *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 12, 515 -522
- [14] H. A. Sodano, D. J. Inman, and G. Park, 2004, A review of Power Harvesting from vibration using piezoelectric materials, *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 36, No. 3, 197 - 205

저 자 소 개



김 혜 중 (金 惠 中)

1982년 8월 24일생. 2006년 중앙대학교
전자전기공학부 학사. 2006년 3월-현재
중앙대학교 전자전기공학부 석사과정



강 성 목 (姜 聖 默)

1984년 3월 3일생. 2007년 중앙대학교 전
자전기공학부 학사. 2007년 3월-현재 중
앙대학교 전자전기공학부 석사과정



김 호 성 (金 鎬 成)

1957년 10월 11일생. 1980년 서울공대 전
기 공학과 학사 1982년 동 대학원 전기
공학과 석사. 1992년 SUNY aybuffalo
전기공학과 박사. 1983년 9월-1986년 8월
금성 전기 기술연구소 주임 연구원.
1993년 3월-현재 중앙대학교 전자전기공
학부 교수

Tel : 02-820-5292

Fax : 02-825-9210

E-mail : hkim@cau.ac.kr