

열가소성 폴리우레탄과 벡-부스트 컨버터를 이용한 마이크로 에너지 포집시스템 설계

논문
60-3-14

Design of Micro Energy Harvesting System using Thermoplastic Polyurethane and Buck-boost Converter

손영대[†] · 김규현^{*}
(Young-Dae Son · Gue-Hyun Kim)

Abstract - This paper proposes the design of micro energy harvesting system by using thermoplastic polyurethane(TPU), which harvests electric energy from the kinetic energy of pedestrian and drives the desired load, and applied it to the self-generating shoes. Also, we designed the buck-boost converter in discontinuous conduction mode(DCM) which functions as a resistor emulator(RE) such that converter's average input current is proportional to input voltage, and it results in transfer of maximum power to buck-boost converter according to control behavior that converter's input resistance is matched with TPU's internal resistance. Therefore, this paper confirms the validity of proposed control scheme and possibility of application for self-generating shoes, from the obtained characteristic of designed micro energy harvesting system by using a TPU and buck-boost converter in DCM.

Key Words : TPU, Buck-boost Converter, MPT(Maximum Power Transfer), Self-generating Shoes

1. 서론

최근, 화석연료의 고갈과 환경오염 문제에 직면하여 자연 환경에서 손쉽게 얻을 수 있는 다양한 에너지원을 찾는 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있으며 특히, 진동, 압력, 빛, 열, 전자파 등 우리 주변에서 흔히 버려지는 미소 에너지를 효과적으로 포집하여 현실화 가능한 에너지원으로 활용하는 개념이 큰 주목을 받고 있다. 또한, 최근의 전자회로 기술의 발전에 의해 마이크로 와트대의 저전력으로 동작 가능한 집적회로의 상용화에 따라 미소 에너지원으로도 전자부품과 회로시스템 동작이 가능하게 되어 구현의 까다로움과 많은 제작비용에도 불구하고 전체적인 비용면에서 이득이 되므로 교통 인프라, 무선 의료장비, 타이어 압력감지, 빌딩 자동화 시스템, 무선 센서노드와 같은 원격 모니터링 시스템에 다양한 에너지 포집기술이 적용되고 있다. 그 중 가장 활발히 연구되어 왔던 압전소자[1]는 기계적 진동에너지와 전기에너지 사이의 가역성과 반영구적 수명 등의 장점으로 인해 각종 센서 및 액추에이터, 에너지 포집 등 다양한 응용분야로 적용되는 추세에 있으나, 높은 제작비용과 복잡한 제작공정 및 내구성 문제로 인해 환경발전 시스템을 구성하는데 까다로운 단점이 있어 가공이 편리하고 내구성이 좋은 새로운 대체 소재개발 및 적용연구가 진행되고 있다 [2],[4],[6]. 한편, 열가소성 폴리우레탄(TPU; Thermoplastic Polyurethane)[9]은 분자구조상 하드 세그먼트와 소프트 세그먼트의 조합으로 인해 탄성을 갖는 고무성질 및 강도를 갖는 플라스틱 성질이 공존하는 고분자 화합물로서 내한성과 내마모성이 우수하며 기존의 압전소자에 비해 공정이 간단하고 원하는 모양과 크기로 쉽게 제작할 수 있으며, 낮은

제작단가 및 높은 내구성을 가지는 첨단 신소재이므로 보다 다양한 환경발전 시스템에 접목가능하고 대량 생산에 유리하다. 즉, 일정한 폴링(poling) 작업만 거치면 압전소자와 유사한 전기적 특성을 보이며 기존의 제품에 비해 저렴하며 분자구조의 조절에 의한 내구성 조절이 가능하여 높은 내구성을 필요로 하는 분야에도 접목이 가능하다. 또한, 환경발전 시스템에서 발전된 전기에너지는 $\mu W \sim mW$ 급의 미소 전력이고 간헐적이므로 전력 연속성을 보장하고 실제 활용을 위해서는 재충전 배터리나 슈퍼 커패시터에 에너지를 축적해야 한다. 그러나, 이러한 에너지 축적 셀에 환경발전 시스템의 출력을 직접 연결하면 원하는 최적 전력발생을 보장할 수 없을 뿐만 아니라 에너지 포집 자체가 불가능해 질 수 있다. 이 문제는 다양한 형태의 DC-DC 컨버터[3]를 적용하여 해결할 수 있으나, 본 논문에서 추구하는 환경발전 시스템의 입출력 전압의 변동범위와 최대 전력발생, 제어회로의 간소화 및 회로손실 최소화 등을 고려한다면 불연속 모드에서 동작하는 벡-부스트 컨버터가 이상적이며, 저항 에뮬레이터로서의 벡-부스트 동작이 필수적이다. 따라서, 본 논문에서는 폴링 작업을 거친 TPU에서 발생한 전기에너지를 불연속 모드로 동작하는 벡-부스트 컨버터를 통해 최대 전력 발생과 충전을 추구하였고 이를 신발 내부 뒤축 부분에 장착하여 서있거나 보행시에도 전기에너지를 포집하는 자가발전 시스템을 구현하였으며, 실험적 특성 분석을 통해 제한한 환경발전 시스템의 타당성을 확인하고 자가발전 신발을 위한 적용가능성을 확인하였다. 또한 충전된 에너지로부터 ATtiny13V 원칩 마이크로컨트롤러와 부스트 LED 구동회로의 동작을 통해 신발 외부의 LED를 구동시켜 충전된 에너지의 실제 활용을 모색하였다.

[†] 교신저자, 정회원 : 동서대학교 전자공학과 부교수

E-mail : ydson@gdsu.dongseo.ac.kr

^{*} 비회원 : 동서대학교 에너지/생명공학부 부교수

접수일자 : 2011년 1월 20일

최종완료 : 2011년 2월 21일

2. TPU를 활용한 환경발전 시스템 구현

2.1 열가소성 폴리우레탄의 분극 및 발전 시험

본 논문에서 적용한 TPU에 압전특성을 부여하기 위해

분극(Poling)과정을 거치게 되는데, 분극이란 TPU의 도메인을 일정한 방향으로 배향시키는 과정이며, 인가 전압(전계), 온도, 분극 시간과 같은 분극조건에 따라 분극 상황이 달라진다[7]. 즉, 분극조건과 출력특성에 대한 실험적 분석과 시행착오가 필요하다. 본 논문에서는 최적 분극조건을 찾기 위해 그림 1과 같은 분극장치와 TPU 재료를 마련하여 실험 특성을 도출하였다. TPU는 155[°C]~160[°C]에서 성형하여 신발 장착을 고려한 표 1에 제시한 크기로 제작하였으며, 양면에는 도전성 점착제가 도포된 구리 테이프 전극과 리드선을 설치하여 분극이나 발전시 모두에 사용될 수 있도록 하여 공정을 간략하게 하였다. 그림 1(b)에 나타난 가변 직류전원을 이용한 255 [V/mm]의 전계를 발생하여 TPU를 분극하였다.

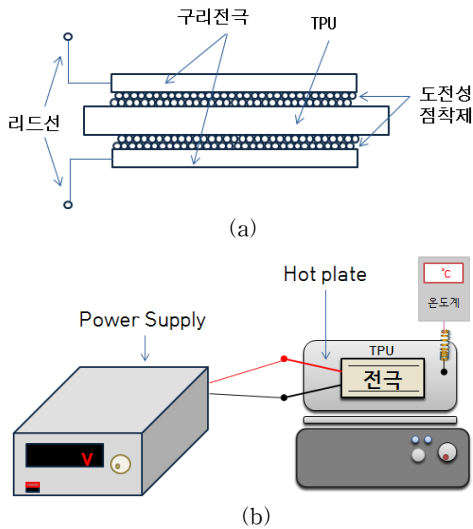


그림 1 TPU 소재 단면도와 분극발생 장치
Fig. 1 Schematic cross-section of TPU and experimental setup for poling

표 1에서 알 수 있듯이 전계인가(분극) 시간은 총 120분으로서, 분극용 직류전원 및 가열판(Hot plate) 전원을 동시에 인가하여 전계 및 100[°C] 온도를 100분간 유지하고 100분 경과 후 부터는 가열판 전원을 차단하여 자연 냉각을 통해 상온에 이르게 되며 약 20분이 경과한 이 시점에 분극용 직류전원을 추가로 차단하였다. 이는, 100분 경과 후 분극용 직류전원과 가열판 전원을 동시에 차단하는 것 보다 가열상태의 분극 배열을 상온으로 냉각 될 때 까지 유지하게 되어 분극효과가 높아지도록 하기 위함이다. 분극이 완료된 TPU의 최대 출력점을 알아보기 위해 그림 2와 같이 쇼트키 다이오드와 커패시터로 구성된 정류회로를 부하저항과 연결한 시험회로를 구성하고 이를 신발의 미드솔과 인솔 사이에 설치한 TPU에 연결하여 실험하였으며, 65kg의 남자가 인솔하부 TPU장착 신발을 착용하여 서 있는 일정압력 상태에서 오실로스코프로 파형을 측정하여 그 평균값을 그림 3에 나타내었다. 즉, 긴장한 남자의 몸무게로 가해지는 일정압력 상태에서 부하저항 R_L 에 대한 정류된 출력전압 측정값과 그때의 연산된 출력전력값을 그래프로 나타내었다. 부하저항은 40[k Ω]~130[M Ω] 범위에서 변화시켰으며, 부하저항이 60[k Ω] 이하에서는 출력전압과 전력이 모두 0이고 약 80[k Ω]일 때의 1.13[V]에서 출발하여 전압이 증가하며 30[M Ω]이상 부터는 5.3[V]의 일정한 전압을 출력한다. 이 데이터로부터 약 200[k Ω]의 부하저항에서 2.15[V]의 출력전압 및 23.1[μ

W]의 최대 전력을 얻었으며, 이 때 TPU는 이 부하저항과 같은 내부저항을 가짐을 알 수 있다. 즉, TPU에서 최대 전력을 추출하기 위해서는 부하저항이 전원의 내부저항과 같아야 하기 때문이다.

표 1 분극 조건과 TPU 규격
Table 1 Poling condition and specification of TPU

분극 조건	값	TPU 규격	값
인가 전압	DC 510 [V]	길이	90 [mm]
가열 온도	100 [°C]	폭	55 [mm]
분극 시간	120 [min.]	두께	2 [mm]
전계	255 [V/mm]	전극 길이	90 [mm]
		전극 폭	50 [mm]
인솔 두께	4 [mm]	전극 두께	0.07 [mm]

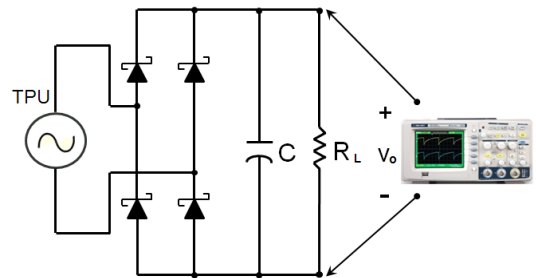


그림 2 출력 측정을 위한 시험회로
Fig. 2 Test circuit diagram for output measurement

그림 4는 인솔을 제거하고 미드솔 상단에 직접 TPU를 장착하여 실험한 TPU 출력특성을 나타낸다. 부하저항은 40[k Ω]~130[M Ω] 범위에서 변화시켰으며, 총 34개의 데이터를 측정하여 출력전압 및 전력의 그래프로 나타내었다. 그림 4에서 알 수 있듯이 부하저항이 40[k Ω]에서 출력전압과 전력이 각각 2.3[V]와 132.3[μ W]이며, 이후 부하저항이 증가하여 20[M Ω]이 될 때부터 약 16[V]의 일정한 전압을 출력한다. 또한, 약 200[k Ω]의 부하저항에서 7.3[V]의 출력전압 및 266.6[μ W]의 최대 전력을 얻었으며, 이 경우에도 TPU의 내부저항값이 200[k Ω]임을 알 수 있다. TPU 상부에 인솔을 설치한 경우와 제거한 경우를 비교해 볼 때, 압력을 더 받는 인솔을 제거한 경우가 훨씬 큰 출력전압 및 전력을 발생함을 알 수 있는데, 최대 출력점에서 3.4배의 출력전압과 11.5 배의 전력을 얻을 수 있었다. 따라서, 인솔 두께의 적절한 설계를 통한 압력의 조절을 통해 TPU의 출력조절도 가능할 것으로 판단된다. 그림 3~그림 4에서 설명한 두 가지 실험 데이터는 신발을 착용한 상태로 서서 일정한 압력을 가하는 상태에서 구한 데이터이나, 실제 보행시에도 지속적으로 전력이 출력되므로, TPU를 이용한 에너지 포집시스템의 구현 가능성을 확인할 수 있다.

그림 5는 인솔을 설치한 상태에서 약 2초 주기로 부드럽게 한쪽발로 제자리 걸음 했을 때의 TPU 출력전압 파형(시간축: 1초/div., 전압축: 2V/div.)이며, 200[k Ω]의 부하저항을 연결하여 최대 출력점 상태에서 실험한 결과이다. 부드럽게 착지하여 압력이 가해지는 시간에서의 출력전압 피크값이 그림 3의 데이터와 마찬가지로 약 2.15[V]가 되며, 서있는 경우와 큰 차이가 없으나 뒷축을 지면에서 떼었을 때의 전압파형 진폭보다는 커짐을 알 수 있다. 그림 6은 인솔을 제거한 상태에서 그림 5와 유사한 제자리 걸음 조건에서의 TPU

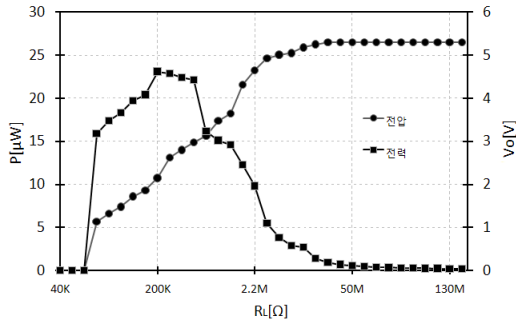


그림 3 부하에 따른 출력전압 및 출력전력(인솔하부에 TPU 장착시)

Fig. 3 Measured output voltage and calculated output power(with insole)

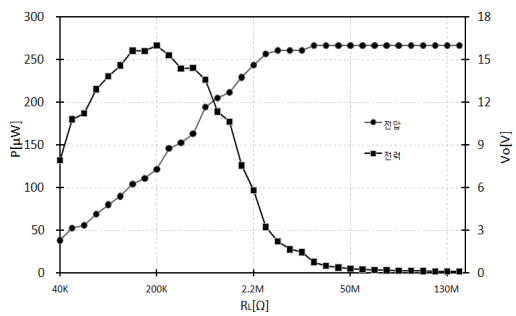


그림 4 부하에 따른 출력전압 및 출력전력(인솔 제거시)

Fig. 4 Measured output voltage and calculated output power(without insole)

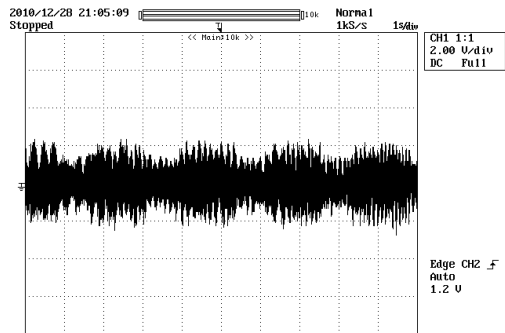


그림 5 TPU 출력전압 파형(인솔 하부에 TPU 장착시)

Fig. 5 Measured output voltage waveform of TPU(with insole)

출력전압 파형(시간축: 1초/div., 전압축: 5V/div.)이며, 200[kΩ]의 부하저항을 연결하여 최대 출력점 상태에서 실험한 결과이다. 뒷축이 지면에 닿아서 TPU에 압력이 가해지는 시간 동안 약 7.3[V]의 출력전압 피크값이 나타나며 지면에서 뒷축이 떨어져서 압력이 가해지지 않는 경우의 출력전압보다 그 크기 차이가 확연해지며 또한, 인솔을 장착한 그림 5의 결과에 비해 그 차이 정도가 커짐을 알 수 있다. 따라서, 앞서 언급했듯이 인솔을 제거하여 TPU에 직접 족부의 압력이 가해지는 경우가 훨씬 더 출력전압이 증가하게 되며, 최대 출력점에서의 출력전력도 증가하게 된다. 상기의 결과로부터, 시스템 구형의 목표가 원하는 특정 출력전압이든 최대 전력점이든 관계없이 신발 인솔의 두께 조절을 통해 그 최적값에 해당하는 부하저항의 값을 실험적으로 찾아낼 수 있다.

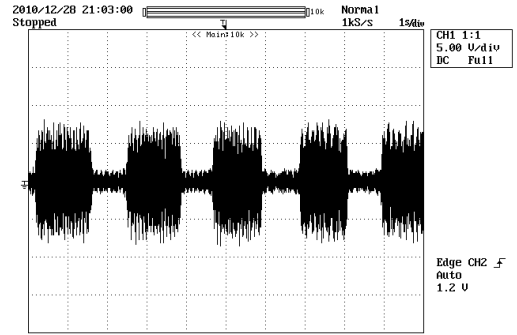


그림 6 TPU 출력전압 파형(인솔 제거시)

Fig. 6 Measured output voltage waveform of TPU(without insole)

2.2 에너지 포집을 위한 벅-부스트 컨버터의 설계

최근, 태양전지, 압전소자, 열전소자 등을 이용한 환경발전 시스템에서 최대 출력을 얻기 위해 다양한 알고리즘[5]이 제시되어 적용되고 있으나, 대부분 전압 또는 전류의 검출값에 그 기반을 두거나 복잡한 연산을 담당하는 CPU를 채택하므로 회로 자체의 전력 부담이 커지게 되어 본 논문의 마이크로 전력 에너지 포집시스템 설계에는 적합하지 않다. 즉, 수~수백 [μW] 단위의 미소 전력만을 발생하는 본 논문의 에너지 포집시스템에서는 가급적 추가적인 검출회로와 복잡한 연산회로부를 제거하여 전력손실을 줄이는 회로 설계가 필요하다. 또한, 서론에서도 언급했듯이 환경발전부의 정류기 출력단에 직접 에너지 축적셀을 연결하면 원하는 최대전력 발생을 보장할 수 없으며, 본 논문에서 사용한 TPU는 일정 압력에 대한 부하저항의 값에 따라 발생 전압의 변화폭이 0~16[V]에 이르며, 다른 종류의 압전소자도 그 출력전압 변화폭이 클 수 있으므로 이를 승압 또는 강압하여 사용할 필요가 있다. 따라서, 최대전력 출력 보장과 승압 또는 강압의 필요성, 회로의 단순화 등을 고려하여 불연속 모드에서 동작하는 벅-부스트 컨버터를 제시하여 이를 TPU/정류부와 배터리셀 사이에 설치하여 안정된 에너지 포집시스템을 구성하였다. 또한, 설계된 벅-부스트 컨버터를 불연속 도통모드에서 동작시키면, 연속모드 동작시 발생하는 다이오드 역회복 손실을 저감할 수 있으며 스위치 온시에 발생하는 다이오드 쇼트회로로 인한 스위치 피크전류 부담을 덜 수 있으므로[8] 본 논문의 마이크로 전력 에너지 포집시스템에 적합할 뿐만 아니라, 컨버터 입력전류의 평균값은 입력전압에 비례하게 되어 평균 입력전류는 입력전압에 대해 선형관계가 형성되는 저항 에미터로서 동작하게 된다. 즉, 벅-부스트 컨버터의 평균 전압/전류비를 TPU의 내부저항과 같도록 제어한다면 최대 전력점 추종이 가능하게 된다. 그림 7과 그림 8은 다이오드, 스위치, 인덕터가 이상적일 때 불연속 도통모드시의 벅-부스트 컨버터 회로 및 스위치 S 온오프시의 회로동작 파형을 나타낸다. 여기서, D 와 T_{sw} , f_{sw} 는 각각 듀티비와 스위칭 주기 및 스위칭 주파수를, D_1 은 스위치 오프후 인덕터 전류가 영이 될 때 까지의 시간 듀티, V_o 로 표시된 출력전압 부분은 축전지의 양단전압을 나타낸다. 벅-부스트 컨버터의 불연속 동작시 입출력 전압 전달비는 듀티비 D 와 선형관계가 되며, 같은 D 에 대해 연속동작시보다 불연속 동작시에 입출력 전압 전달비가 더 커지는 특징이 있다. 그림 8의 두 번째 그림에서 알 수 있듯이 스위치 온시에 컨버터 입력전류의 최대값은 다음 식과 같다.

$$I_{max} = \frac{V_i}{L}DT_{SW} \quad (1)$$

또한, 한 주기 동안의 평균 입력전류는

$$I_{s,avg} = \frac{I_{max}}{2}D = \frac{V_i D^2 T_{SW}}{2L} \quad (2)$$

가 되므로, 벡-부스트 컨버터의 입력저항은 다음 식과 같다.

$$R_i = \frac{2L}{D^2 T_{SW}} = \frac{2Lf_{SW}}{D^2} \quad (3)$$

즉, 식 (2)와 식 (3)으로 부터, 불연속 도통모드 벡-부스트 컨버터의 평균 입력전류는 축전지(부하)측 전압이나 전류와는 무관함을 알 수 있으며, 듀티비와 스위칭 주파수가 일정할 때 컨버터의 평균 입력전류는 입력전압에 대해 선형 관계임을 알 수 있다. 즉, 주어진 회로 파라미터와 제어변수에 대해 컨버터의 입력저항이 일정한 상수가 되므로, 부가적인 피드백 회로가 없더라도 TPU의 내부저항과 같도록 컨버터 입력저항을 조정하면 최대전력 전달이 가능하게 된다. 또한, 그림 8의 i_D 파형에서 알 수 있듯이 스위치 턴오프시 인덕터 전류는 부하로 방전되며 그 방전시간은 다음 식과 같다.

$$D_1 T_{SW} = \frac{I_{max}}{V_o/L} = \frac{V_i}{V_o}DT_{SW} \quad (4)$$

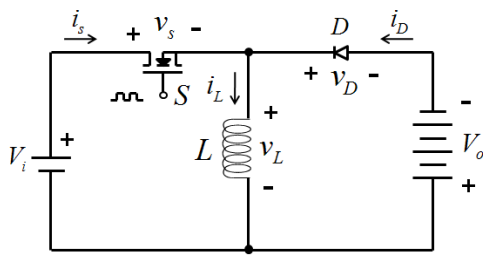


그림 7 벡-부스트 컨버터 회로
Fig. 7 Buck-boost converter circuit

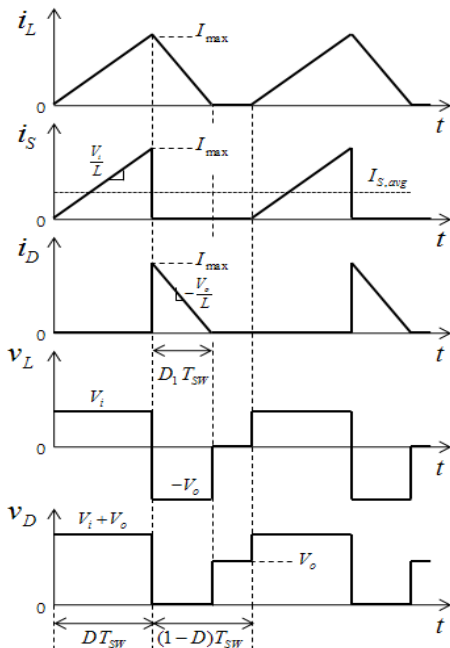


그림 8 벡-부스트 컨버터 회로의 동작 파형
Fig. 8 Operating waveforms of buck-boost converter

따라서, 벡-부스트 컨버터가 불연속 모드 동작을 하기 위해서는 식(4) $(1-D)T_{SW}$ 가 되어야 하므로, 다음 식과 같은 불연속 모드 동작을 위한 전압조건 식을 구할 수 있다.

$$V_i < \frac{1-D}{D} V_o \quad (5)$$

이상에서 알 수 있듯이, 식 (3)으로부터 듀티비와 스위칭 주파수, 인덕터 L 값을 조정하여 컨버터 입력저항을 조정할 수 있으며, 변동하는 입력전압의 최대값과 축전지 전압을 안다면 불연속 동작을 위한 듀티비의 값을 식 (5)로부터 구할 수 있다.

3. 실험결과 및 검토

본 논문의 실험을 위해 표 1의 제원으로 제작된 TPU는 신발의 압력구조상 뒤축 부분에서 가장 높은 전압이 출력[4]되므로 신발 뒤축 미드솔 상부에 장착하여 기본적인 발전시험과 충전시험 및 축적된 에너지를 이용한 LED 점등시험을 행하고, 이를 통해 설계/제작한 TPU 및 벡-부스트 컨버터가 마이크로 에너지 포집시스템에 적용될 수 있음을 확인한다. 그림 2의 TPU 출력 정류회로와 그림 7의 벡-부스트 컨버터 회로를 기초로 그림 9와 같은 실험 시스템 회로를 구성하였다. 또한 충전된 에너지로부터 ATtiny13V 원칩 마이크로컨트롤러와 부스트 LED 구동회로의 동작을 통해 신발 외부의 LED를 0.5초 주기로 점멸시키도록 프로그래밍 하여 충전된 에너지의 실제 활용을 모색하였으며, 그림 10에 그 회로도도 나타내었다. 그림 11은 설계/제작된 전체 시스템의 외관을 나타내며 회로부와 시스템 장착 신발을 나타낸다. 그림 3의 TPU 출력특성 곡선에서 나타난 최대 출력을 얻기 위해 컨버터 입력저항을 식 (3)에 대입하여 이 값에 해당하는 듀티비와 스위칭 주파수 및 인덕턴스 값을 구할 수 있는데, 듀티비와 스위칭 주파수가 고정된 상용 저전력 클럭 오실레이터(OV-7604-C7)를 사용하였으므로 실제 컨버터 입력저항을 결정하는 것은 인덕턴스 값이다. 또한, 회로손실을 줄이기 위해 게이트 구동회로 없이 직접 오실레이터 출력을 스위치의 게이트 신호로 사용하였으며, 오실레이터 공급전원 범위는 1.2~5.5[V]이므로 그림 3에 제시된 TPU의 출력전압 범위는 물론 그림 4에 제시된 최대 출력점의 발생전압에 대해서도 오실레이터 자체의 로딩효과를 고려한다면 그 동작에는 별 무리없이 적절하다.

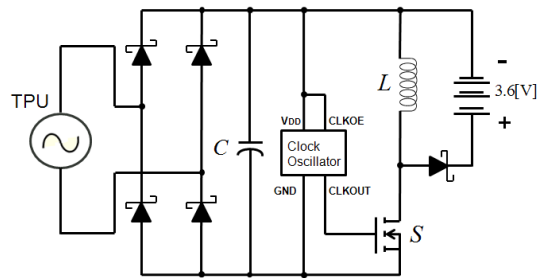


그림 9 에너지 포집시스템의 실험 회로
Fig. 9 Experimental circuit of energy harvesting system

따라서, 벡-부스트 컨버터 회로 스위치의 게이트 구동회로의 단순성과 비용 및 회로손실 저감을 위해 그림 7의 회로구조를 그림 9의 회로구조로 변환하여 적용하였으며, 실험회로의 전체적인 회로 파라미터를 표 2에 나타내었다. 본 실험의 고정된 듀티비 값이 약 0.5이고 축전지의 전압은 3.6[V]이므로 벡-부스트 컨버터가 불연속 모드로 동작하기

위한 입력전압의 최대값은 식 (5)로부터 3.6[V]가 되는데, 오실레이터와 스위치 및 인덕터의 회로손실, 그리고 최대전력 전달을 감안한다면 항상 3.6[V] 이하에서 동작하므로 컨버터는 불연속모드로 동작하게 된다.

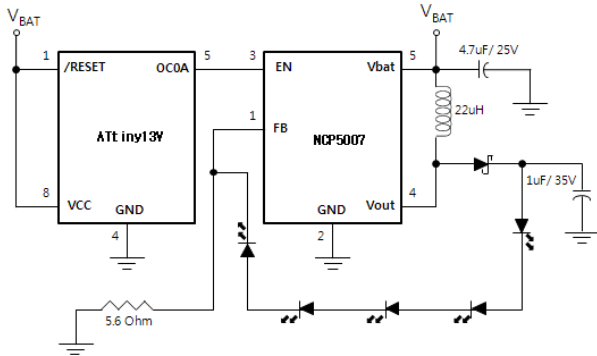
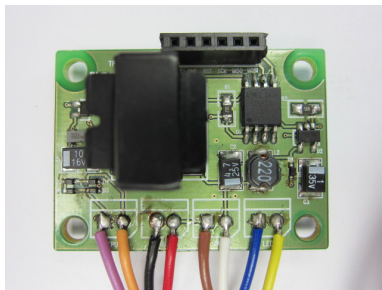
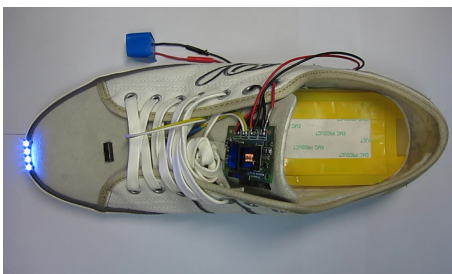


그림 10 원칩 마이크로컨트롤러 및 LED 구동회로
Fig. 10 One-chip microcontroller and LED drive circuits



(a)



(b)

그림 11 제안한 시스템의 외관
[(a) 회로시스템, (b) 시스템장착 신발]

Fig. 11 External appearance of the proposed system
[(a) Circuit system, (b) Shoes installed with proposed system]

표 2 회로 파라미터 및 규격

Table 2 Circuit parameters and specifications

파라미터	값 또는 규격	비고
f_{SW}	32.768 [kHz]	스위칭 주파수
D	0.5	듀티비
L	40[mH]	인덕턴스
S	30[V]/270[mA]	MOSFET
C	10 [μ F]	칩탄탈
Diode	30[V]/200[mA]	Schottky
배터리	3.6[V]/100[mAh]	NiMH

그림 12는 그림 9의 실험회로에 사용된 스위치인 MOSFET S 의 동작파형을 나타내며, TPU에 일정한 압력이 주어져서 약 2[V]의 출력이 발생된 상태이다. 상단 파형은 오실레이터에서 듀티비 0.5로 발생되는 게이트 구동신호 (v_{GS})이며, 하단 파형은 스위치의 드레인-소스(v_{DS}) 파형이다. TPU 출력전압 2[V]는 그림 4에 나타난 TPU 출력시험 그래프에서 40[k Ω]의 부하보다 조금 더 큰 부하가 걸린 상태의 전압을 의미하며, 최대 출력점과는 차이가 있다. 이는 컨버터에 적용한 인덕터 L 값은 식 (3)으로 정의되는 컨버터 입력저항을 최대 출력값으로 만드는 값이 아니고, 또한 오실레이터 및 파형측정 오실로스코프의 부하효과로 인해 부가적인 부하가 걸리기 때문이다. 즉, 최대출력을 얻기 위한 입력저항 산출에 적용되는 L 값과 컨버터의 불연속 모드는 상충하는 관계이므로 회로동작 범위내에서 현실적으로 적용가능한 값을 선택하였기 때문이다. 이 문제는 듀티비와 주파수 조정이 가능한 저전력 오실레이터를 적용할 수 있다면 가능하다. 그림 13은 회로에 적용한 인덕터와 쇼트키 다이오드 양단의 전압(상단)과 확대한 파형(하단)을 나타낸다. 그림 8에 제시한 벡-부스터 컨버터의 이론적 동작 파형과 실제 회로구현시의 실험파형과는 조금 차이가 있는데, 특히 스위치 오프후 인덕터와 다이오드 및 스위치의 전류가 영이 되는 불연속 동작구간에서 스위치와 다이오드의 기생 커패시턴스 성분으로 인해 공진을 발생하게 되어 지속적으로 진동을 유발하므로 이 구간의 전압파형은 일관된 형태를 얻기 어렵다. 그림 13 상단의 첫 번째 파형은 인덕터 전압(v_L), 두 번째는 다이오드 파형(v_D)을 나타내는데 스위치 오프 시간 동안 공진에 기인한 진동파형을 확인할 수 있으나, 충전 전류가 축전지에 공급되어 v_D 가 영이되는 구간도 지속적으로 발생하고 있으므로 충전에는 큰 문제가 없다. 그림 14는 축전지를 제거한 상태의 컨버터 출력전압(부동전압)을 나타내며, 약 8.3[V]의 평균값에서 스위칭 주파수와 동기된 맥동을 보인다. 이는, 벡-부스터 컨버터가 불연속 모드로 동작하여 입력전압 대비 약 4배 이상 증폭되었음을 나타내며 3.6[V] 축전지에 인가되어 충전동작을 수행하게 된다. 본 논문의 실험결과, 회로의 각부에 흐르는 전류값은 μ A 단위의 미소전류이므로 그 측정에 어려움이 있어 측정파형을 제시하지 않았다. 그림 15는 본 시스템의 축전지 충전상태를 나타내며, 초기전압이 3.09[V]인 NiMH 축전지를 사용하여 TPU를 장착한 신발을 착용한 상태에서 충전특성을 확인하였다. 충전전압은 5분 간격으로 측정하였으며 초기 10분간은 3.35[V]로 증가했다가 110분이 경과한 시점에서 3.6[V]로, 125분 경과후 부터 15분간 3.6[V]에 수렴하였다. 따라서, 하루 중 신발착용 시간을 감안한다면 간헐적인 LED 구동을 위한 전력은 충분하다고 판단된다.

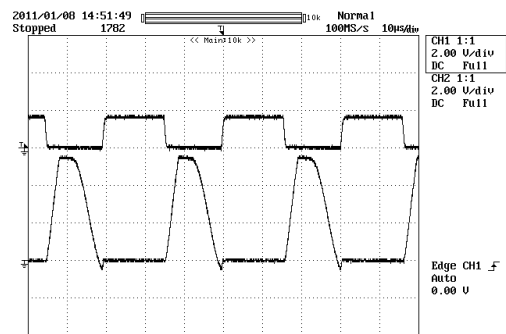


그림 12 스위치 전압파형(상단: v_{GS} , 하단: v_{DS})
Fig. 12 Switch voltage waveforms(Upper: v_{GS} , Lower: v_{DS})

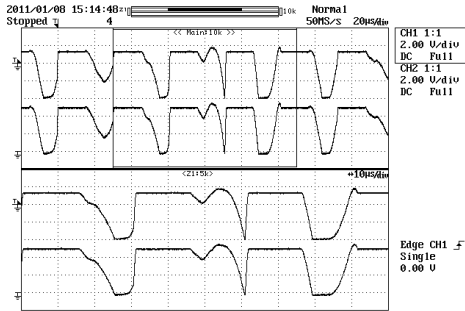


그림 13 인덕터 전압(v_L) 및 다이오드 전압(v_D)
 Fig. 13 Inductor voltage(v_L) and diode voltage(v_D)

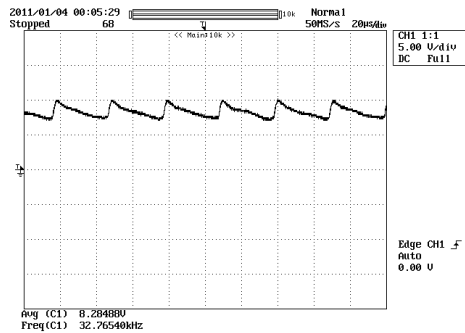


그림 14 컨버터 출력전압 파형(축전지 제거시)
 Fig. 14 Waveform of converter output voltage(without battery)

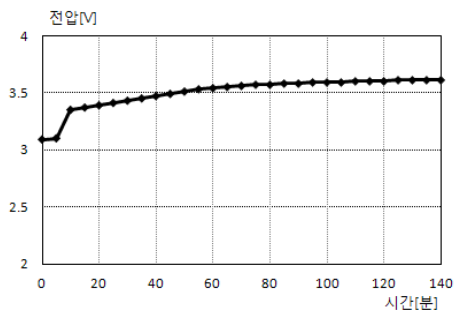


그림 15 축전지 충전상태
 Fig. 15 Battery charging status

4. 결 론

본 논문에서는 전계로 분극시킨 TPU를 이용한 마이크로 에너지 포집 시스템을 설계하여 신발의 자가발전 시스템 구현에 주력하였다. 이는 보행자의 운동에너지로부터 전기에너지를 포집하여 축전지에 저장한 뒤 필요시 원하는 부하를 구동하는 시스템이며, 간헐적 또는 지속적인 압력이 발생하는 다양한 분야에 응용될 것으로 생각된다. 또한, TPU에서 발생된 최대 전력전달을 보충하기 위해 불연속 도통 모드에서 동작하는 벡-부스트 컨버터를 설계하여 축전지의 충전시스템으로 동작시켰으며, 이를 통해 평균 입력전류가 입력전압에 비례하도록 컨버터를 제어함으로써 컨버터 입력저항과 TPU 내부저항이 매칭되어 최대 전력전달이 가능하게 되고, 기존의 전압 또는 전류검출을 위한 센서의 적용이 불필요해져 회로의 간소화 및 손실저감이 가능하게 되므로, 이러한 원칙에 입각하여 회로설계를 하게 되면 100% 최대전력 전달이 아니라도 현실적으로 가능한 범위에서 최적의 에너

지 포집 시스템 구현이 가능하게 된다. 차후, TPU와 컨버터의 저감매칭을 위해 사용된 인덕터값의 저감과 전체 시스템의 소형화를 위해서는 스위칭 주파수의 증가 또는 듀티비의 감소가 요구되므로 이것이 가능한 저전력 소자의 사용이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 불연속 도통모드로 동작하는 벡-부스트 컨버터와 TPU를 이용한 마이크로 에너지 포집 시스템을 설계하여 실험적 특성 분석을 통해 그 타당성을 확인하고 자가발전 신발을 위한 적용가능성을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] N.S.Shenck, J.A.Paradiso, "Energy Scavenging with Shoe-mounted Piezoelectrics," *IEEE Micro.*, Vol.21, Issue.3, pp.30~42, May/June. 2001.
- [2] E.Klimiec, W.Zaraska, K.Zaraska, K.P.Gasiorski, T.-Sadowski, M.Pajda, "Piezoelectric polymer films as power converters for human powered electronics," *Microelectronics Reliability*, Vol.48, pp.897~901, 2008.
- [3] S.Dwari, R.Dayal, L.Parsa, "A Novel Direct AC/DC Converter for Efficient Low Voltage Energy Harvesting," *IECON*, pp.484~488, 2008.
- [4] D.Han and V.Kaajakari, "Microstructured Polymer For Shoe Power Generation," *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, pp.1393~1396, 2009.
- [5] H.Shao, C-Y. Tsui and W-H Ki, "Maximizing the Harvested Energy for Micro-power Applications through Efficient MPPT and PMU Design," *Design Automation Conference (ASP-DAC), 2010 15th Asia and South Pacific*, pp.75~80, 2010.
- [6] J.G.Rocha, L.M.Goncalves, P.F.Rocha, M.P.Silva and S.Lanceros-Mendez, "Energy Harvesting From Piezoelectric Materials Fully Integrated in Footwear," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol.57, No.3, pp.813~819, March 2010.
- [7] Y-H. Kim, "Poling Effect on Piezoelectric Ceramics for Air Medium," *Journal of KIEEME*, Vol.23, No.6, pp.464~470, June 2010.
- [8] C.P.Basso, *Switch-mode Power Supplies*, McGrawHill, 2008.
- [9] N.R.Legge, G.Hodlen, H.E.Schroeder, *Thermoplastic Elastomers*, Hanser Publishers, Munich, 1987.

저 자 소 개



손영대 (孫永大)

1985년 한양대 전기공학과 졸업(학사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003년~2004년 미국 Univ. of South Carolina 전기공학과 방문연구교수. 현재, 동서대학교 전자공학과 부교수.



김규현 (金奎賢)

1992년 부산대 고분자공학과 졸업(학사). 1996년 동 대학원 고분자공학과 졸업(석사). 2001년 미국 Univ. of Akron Polymer Science 졸업(박사). 2001년~2002년 미국 코넬대 박사후 과정. 현재 동서대학교 에너지/생명공학부 부교수.