

웨어러블 서비스를 위한 다중 발전소자 기반 에너지 하베스터 플랫폼 구현

박현문* · 김병수 · 김동순**

An multiple energy harvester with an improved Energy Harvesting platform for Self-powered Wearable Device

Hyun-Moon Park* · Byung-Soo Kim · Dong-Sun Kim**

요약

웨어러블 디바이스의 서비스 제공을 위한 지속 가능한 전원에 대한 요구가 높아짐에 따라 에너지 하베스팅의 중요성이 증대되고 있다. 본 연구는 마찰소자를 고려한 다중 에너지 하베스팅 플랫폼인 EH-P를 개발하였다. 높은 전압과 낮은 전류를 가진 하베스팅 소자에 전압을 낮추면서 전류를 높일 수 있는 스위치 회로 제시하였다. PV와 TENG의 상호보완적 구성을 통해 실내 환경에서 짧은 시간동안 MCU가 동작할 수 있는 전압과 전류를 제공할 수 있었다. 결과적으로 제안된 플랫폼을 통해 웨어러블 플랫폼을 동작시키고, 제작된 웨어러블 디바이스에서 전체 소모 전력 요구량의 29%를 제공함으로써 웨어러블 디바이스 사용시간(device life time)을 증가시킬 수 있었다. 이 논문에 제시된 결과는 멀티플 하베스터 플랫폼에서 웨어러블 하베스팅 애플리케이션의 활용을 위한 발전 소자의 가능성을 보여주었다.

ABSTRACT

The importance of energy harvesting technique is increasing due to the elevated level of demand for sustainable power sources for wearable device applications. In this study, we developed an Energy Harvesting wearable Platform(EH-P) architecture which is used in the design of a multi-energy source based on TENG. The proposed switching circuit produces power with higher current at lower voltage from energy harvesting sources with lower current at higher voltage. This can powers microcontrollers for a short period of time by using PV and TENG complementarily placed under hard conditions for the sources such as indoors. As a result, the whole interface circuit is completely self-powered with this makes it possible to run of sensing on a Wearable device platform. It was possible to increase the wearable device life time by supplying more than 29% of the power consumption to wearable devices. The results presented in this paper show the potential of multi-energy harvesting platform for use in wearable harvesting applications, provide a means of choosing the energy harvesting source.

키워드

Energy Harvesting, Multi-Source Energy, Energy Harvesting Platform, IoT Device, TENG
에너지 하베스팅, 다중 소스 에너지, 에너지 하베스팅 플랫폼, IoT 디바이스, 마찰 소자

* 한국전자부품 연구원(kimagu@keti.re.kr)

** 교신저자 : 전자부품연구원 SoC센터

• 접수일 : 2017. 12. 20

• 수정완료일 : 2018. 01. 17

• 게재확정일 : 2018. 02. 15

• Received : Dec. 20, 2017, Revised : Jan. 17, 2018, Accepted : Feb. 15, 2018

• Corresponding Author : Dong-Sun Kim

Dept. SoC Platform Research Center, Korea Electronics Technology Institute

Email : dskim@keti.ac.kr

1. 서론

반도체의 미세공정으로 웨어러블 디바이스의 MCU, RF 모듈이 수 mW로 저 전력화되고, MEMS 센서들에 nW수준의 전력소비로 이들 부품으로 구성되는 웨어러블 디바이스들의 소비전원이 수십 mW 내외로 줄어들어 따라 디바이스의 사용시간이 비약적으로 증대되고 있다. 하지만 사용자들은 다양한 형태의 웨어러블 디바이스들의 잦은 충전으로 인한 불편함을 호소하고 있다. 최근 배터리 교체나 충전이 어려운 디바이스들의 사용시간 증가를 위해 에너지 하베스팅(Energy Harvesting)을 이용한 전원 공급 방안을 주목하고 있다. 이에 따라 많은 팹리스 회사와 기업, 학교들은 에너지 다양한 형태의 하베스팅 IC를 연구·개발하고 있다[1-4]. 하지만 현실에서는 에너지 하베스팅과 웨어러블 혹은 IoT 디바이스가 융합된 서비스가 매우 제약적으로 활용되고 있으며, 태양열 기반의 하베스팅을 이용한 제품을 제외하고는 상용화에 미미하다. 또한 마찰(TEG, Triboelectric Energy Harvesting)이나 피에조(Piezo), 초음파(ultrasound), 열전(Thermoelectric) 등 다양한 발전 소자를 이용한 발전 및 저장 방안이 활발하게 연구되고 있으나 논문과 시제품 단계에 머무르고 있다[1-3]. 이러한 다양한 발전 소자들의 상용화를 저렘하면서도 소자 특성을 고려한 에너지 발전량의 저장과 변환에 대한 PMIC(Power Management IC) 이외에도 고효율 회로 연구가 필요하다. 하지만 대부분의 하베스팅 IC 연구는 단일 발전 소자의 발전방안에 집중되거나 일정한 전류(Current)가 제공되는 피에조와 태양전지를 중심에 연구가 대부분으로 본 연구에서 제안하는 마찰력과 태양전지기반의 AC, DC가 혼합된 다중 에너지 융합 연구는 미흡하다.

본 연구는 AC 출력인 마찰기반 소자(Triboelectric Energy Harvesting, TENG)와 DC출력인 태양전지판(Photo Voltaic cell, PV)을 이용해 실내외에서 에너지 저장 및 활용이 가능한 하이브리드 플랫폼을 개발하였다. 발전소자 입력과 저장 회로 그리고 연구원에서 개발된 PMIC를 고려하여 두 곳의 에너지 저장소를 제시하고 동작에 따라 개별 저장소에 에너지를 사용함으로 보다 효율을 높일 수 있었다. 마지막으로 개발된 플랫폼과 연동가능한 웨어러블용 시제품을 협력업

체와 제작함으로써 활용 방안을 제시하였다. 2장은 에너지 발전소자의 특징을 분석하여, 5~60V에서 6~8 μ A가 발생하는 TENG 하베스팅 소자의 전압을 낮추면서 전류를 높일 수 있는 스위치 회로와 두 곳의 에너지 저장소를 3.1절에서 제시하고 3.2절과 4장에서는 제시한 방안을 웨어러블을 고려한 EH-P 보드를 제작하여 검증하였다. 이러한 결과를 바탕으로 상용화를 위한 시제품인 안전/경찰을 위한 LED 발광 조끼를 제작하였다.

II. 발전소자 특징 및 문제점

2.1 에너지 발전소자의 특징

표 1은 참고문헌 [4-7]을 기반으로 정리한 에너지 하베스팅 전력비교이다.

표 1. 에너지 하베스팅 전력 분석
Table 1. Energy Harvesting compare power

Source type		Input	Efficiency (%)	Available Power
TENG Source	Person	20 mW/cm ²	~2%	25 μ W/cm ²
	Industry	10-100 mW/cm ²	~10%	1-10mW/cm ²
Piezo Source	Person	0.5mW @1Hz	~5%	25 μ W/Hz
	Industry	1mW @60Hz	~10%	100 μ W/60Hz
PV Cell	Indoor (200lux)	100 μ W/cm ²	~12%	12 μ W/cm ²
	Outdoor (50klux)	250mW/cm ²	10~20%	50mW/cm ²
RF	2.4GHz (@1m)	1mW/cm ²	~20%	200 μ W/cm ²
	1.7GHz (@1m)	1mW/cm ²	~57%	570 μ W/cm ²

자연 에너지를 이용한 전원 획득에서 가장 활용도가 높은 소자인 태양전지 셀(PV)은 실외용뿐만 아니라 낮은 조도인 70~200lux에서도 cm²당 10 μ A 이상 발전이 가능한 제품[4]이 있다. 하지만 야간에는 사용이 어렵고, 유연한 PV는 효율이 낮아 실내에서 PV만으로는 디바이스 사용시간을 증대하기 어렵다. 이에 따라 추가적인 에너지 획득 방안이 필요하며, 가장 유

효한 방법은 사람의 동작에 따른 발전량 획득 방안이다. 동작에 따른 발전량 확보를 위해서는 신발, 의류와 같은 웨어러블 디바이스기반의 피에조와 마찰식이 유효하다. 압전소자는 일정한 전력을 제공할 수 있지만, 세라믹소재의 내구성과 유지보수 문제를 지니고 있다. 반면, 마찰식 소자는 높은 상대적으로 내구성이나 유지보수 측면에서는 압전 소자에 비해 유리하지만, 전압이 수십에서 수백 볼트의 AC로 발생하여 변환하기 어렵고 전류가 낮은 문제를 가진다.

2.2 마찰소자 및 태양전지 소자 분석

제안된 플랫폼에 맞춰 PV와 TENG의 소자를 중심으로 검증하였다. 앞서 표의 선행연구 분석과 실제 개발되는 시제품과는 특성이 다를 수 있으며, 본 연구에서 사용되는 마찰소자는 그림 1과 같은 스프링기반으로 5Hz로 가진기로 동작할 때의 측정된 특성을 그림 2-3으로 나타낼 수 있다.

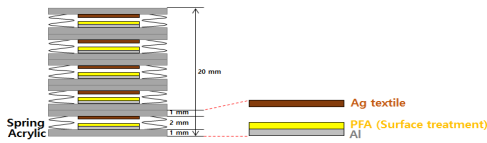


그림 1. 스프링기반의 마찰소자 플랫폼
Fig. 1 Spring-based on TENG platform

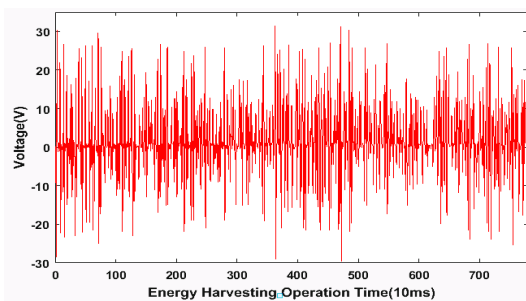


그림 2. 사용되는 마찰소자 플랫폼의 AC 전압 값
Fig. 2 An AC Voltage value generated in the TENG platform

스프링 기반의 TENG 발전소자는 일정한 값보다는 변화가 큰 전류와 전압을 범위를 지닌다. AC 전압 $\pm 30V$ 와 전류는 $2\sim 100\mu A$ 가 발생하지만 실효값(RMS,

Root Mean Square)값은 전류는 $6\mu A$ 로 매우 낮으며, 60초간의 RMS에서 평균 $320\mu W$ 의 출력을 가진다.

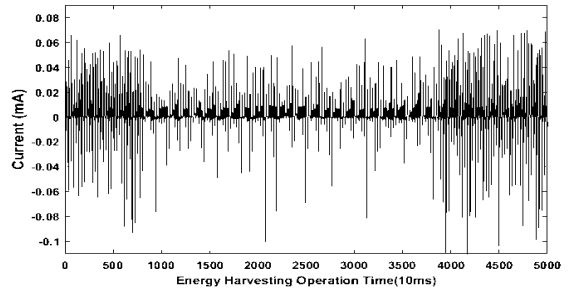


그림 3. 사용되는 마찰소자 플랫폼의 AC 전류 값
Fig. 3 An AC Current value generated in the TENG platform

그림 4-5는 $83\times 68\times 2mm$ 의 PV에 약 $500\sim 550$ Lux 일 때 나타낸 측정값이다.

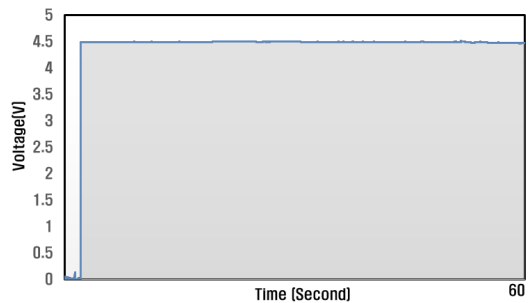


그림 4. 태양전지의 DC 전압 값
Fig. 4 An DC Voltage value generated in PV Cell

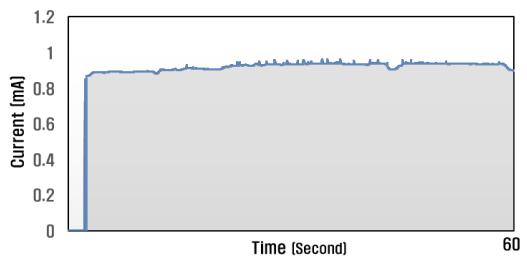


그림 5. 태양전지의 DC 전류 값
Fig. 5 An DC Current value generated in PV Cell

실내 허용 조도인 $350\sim 375Lux$ 로 측정할 때 본 연구에 사용된 PV는 그림 4-5 같이 $4.45V$, $0.85mA$ 발전이 지속적으로 발생한다. 하지만 그림 6과 같이

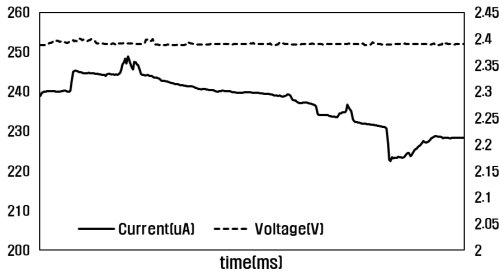


그림 6. 낮은 조도에서 PV의 전류와 전압 값
Fig. 6 Current and voltage values at low Lux on the PV

100Lux 수준의 낮은 실내 환경에는 2.4V, 200 μ A 로 플랫폼에서 활용하기 위한 에너지를 제공하기 어렵다. 따라서 본 제안과 같이 TENG와 융합하여 발전한다면, 실내나 옥내 환경에서 필요한 전원을 부분적으로 저장 혹은 제공할 수 있다.

본 연구에 사용된 하베스팅 소자는 60V 넓은 범위에 전압 차를 갖지만, μ A급의 낮은 전류를 지닌다. 때문에 피에조나 태양전지에서 에너지 고효율을 위해 활용되는 MPPT(Maximum Power Point Tracking)[8] IC나 IP 블록은 수 μ A를 소모하여 TENG 소자를 이용한 하베스팅 플랫폼의 적용에 어려움이 있다. 선행연구[8-10]에서 TENG와 유사한 피에조 기반의 높은 AC 전압 능동형 다이오드[9]연구와 전하펌프(charge pump)[10]가 있었지만, 고전압에는 전하펌프가 비효율적이며, DC-DC 벽이나 전하펌프에서 활용되는 LDO나 OP-AMP를 통해 전압을 낮추는 방법은 수십 μ W의 변환손실로 변환 효율이 낮다[13]. 또한, 부스트 인덕터 구성은 인덕터의 ESR(Effective Series Resistor)로 인해 출력 전압을 입력 전압의 수배 이상 높이기 어렵다. 대부분의 DC-DC기반의 하베스팅을 위한 PMIC가 최대 20V[11-12, 14]이고 주요 핵심서비스인 IoT 및 웨어러블 디바이스에 활용되는 MCU는 대부분 1.8~3.7V의 범위를 전압을 사용한다. 따라서 MCU 동작이 가능한 에너지하베스팅 소자를 고려한 플랫폼의 전력공급방안이 필요하다.

III. 제안된 다중 하베스팅 플랫폼

3.1 제안된 하베스팅 플랫폼 구조

그림 7은 TENG와 PV기반의 하베스팅 에너지를 융합하여, 안정적인 출력을 제공 위한 회로이다. 에너지 발생부와 변환 및 하베스팅을 위한 저장과 발전방법을 나타냈다. 'A'는 DC와 AC 에너지를 입력받는 곳이며, 'B'는 AC를 DC로 변환하는 브리지정류기(bridge rectifier)이다. 'C'는 TENG에 발생 전원을 저장하는 1차 저장소 역할을 한다. 또한 'D' 영역은 PMIC에 VSTORE와 연결된 2차 에너지 저장소이다. 제안된 저장소의 이원화는 두 가지 목적을 갖는다. 첫째, PMIC의 동작전류 공급과 TNEG의 높은 전압을 낮추는 역할을 하게 된다. 둘째, PMIC에서 2차 에너지 저장을 최대화하여 초경량·초저전력의 IoT나 웨어러블 디바이스에 제공할 수 있다. 두 가지에 대한 제안된 회로와 성능을 3.2와 4장의 개발된 플랫폼을 통해 검증하였다.

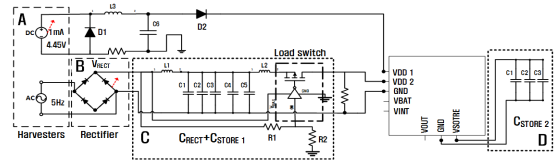


그림 7. 제안된 하베스팅 저장 및 발전 기본 회로
Fig. 7 The proposed harvesting storage and power generation basic model

3.2 변환 및 저장을 위한 회로 설계

그림 8에 'B'는 순방향 입력전압(Instantaneous Forward Voltage)이 낮고 역회복시간(Reverse recovery time)이 빠른 높은 변환 효율의 브리지정류기(bridge rectifier)를 선택하였다.

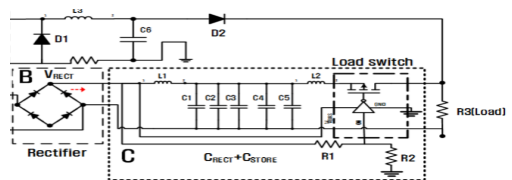


그림 8. 제안된 하베스팅 변환부
Fig 8. Proposed Multi-full Energy Harvesting Conversion

그림 8의 'C'는 TENG의 높은 전압을 낮추면서, 발생 에너지 주파수에 맞춰 LPF(Low Pass Filter) 로 설계하였다. 'C'회로는 세 가지 목적을 지닌다. 첫째, Load Switch를 통해 $\pm 30V$ 까지 발생하는 전압을 낮은 만큼 넓은 변화를 하는 낮은 전류를 증가시킬 수 있다. 둘째, PMIC의 동작전류(Quiescent Current)인 $1\sim 4\mu A$ 사이 전원소모를 Load switch를 통해 on/off를 제약하는 동시에 PMIC가 저장할 수 있는 수준까지 전압과 전류를 조정한다. 셋째, IoT 플랫폼의 MCU가 전류를 지속해서 요구할 때 공급 전류 부족으로 PMIC의 에너지변환 부족 현상을 회로 측면에서 최소화하고자 하였다. 로드스위치(Load switch)는 일정 전압까지 off를 했다가 전압이 16v를 넘으면 on하여 PMIC의 2차 저장소 저장하게 된다. 따라서 1차 저장소가 16V 이상의 전압이 증가될 수 없게 함으로써 일정한 전압을 확보하고 PMIC에서 동작 가능한 전류를 지속적으로 제공 수 있게 된다.

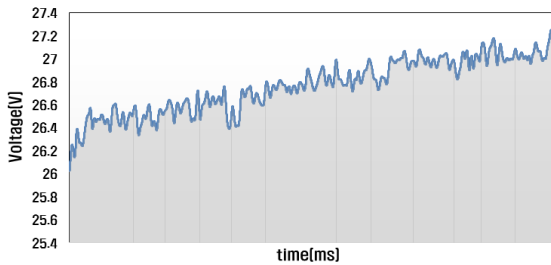


그림 9. TENG의 하베스팅 DC 전압 값
Fig. 9 An DC Voltage value generated in TENG

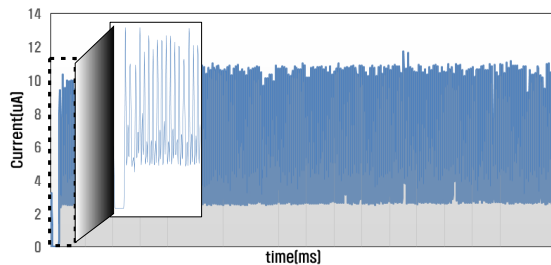


그림 10. TENG의 하베스팅 DC 전류 값
Fig. 10 An DC Current value generated in TENG

그림 9, 10는 개발된 하베스팅 플랫폼에서 TENG 소자의 비주적인 5~6Hz에서 발생하는 'B'의 DC 전압과 전류를 나타내었다. 하베스팅 변환부인 'B'에서

측정된 결과는 비주적인 발생에도 일정하게 전압이 5% 증가한다. 이것은 소자의 특성이기도 하지만 브리지정류기의 커패시터 영향으로 증가하며, 소자의 특성상 불연속적이면서 2-11 μA 편차를 가지며 RMS로 4.7 $\mu A/s$ 발생 범위에 비해 낮은 전류가 발생한다.

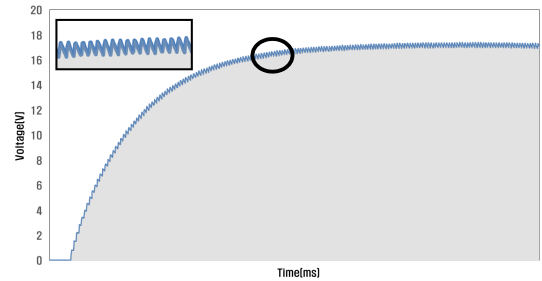


그림 11. 'C' 블록에서의 TENG에 DC 전압 값
Fig. 11 DC Voltage value at TENG in the 'C' block

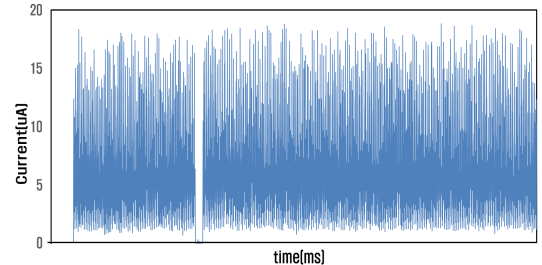


그림 12. 'C' 블록에서의 TENG에 DC 전류 값
Fig. 12 DC Current value at TENG in the 'C' block

제안된 플랫폼의 'C' 블록 Load Switch는 그림 11-12와 같이 TENG 'B' 출력의 53.5~56.5%인 약 15.5-16.1v 사이의 DC 전압을 일정하게 유지하면서, 상대적으로 높은 전류 6~24 μA 로 RMS로 약 7.8 $\mu A/s$ 를 제공한다. 일정한 전압 손실(약 47%) 만큼 전력을 높이고 상대적으로 높은 RMS 제공으로써 TENG 기반의 PMIC 변환 효율을 보다 높일 수 있다.

IV. 에너지 하베스팅 플랫폼(EH-P)의 검증

4.1 하베스팅 플랫폼의 에너지 저장과 검증

그림 13은 계측 환경과 개발된 플랫폼의 사진을 나타내었다. 개발된 플랫폼은 4층의 양면으로 제작되

었다. 다만, 뒷면의 부분은 일부 지체권문제로 부분적으로 지웠다.

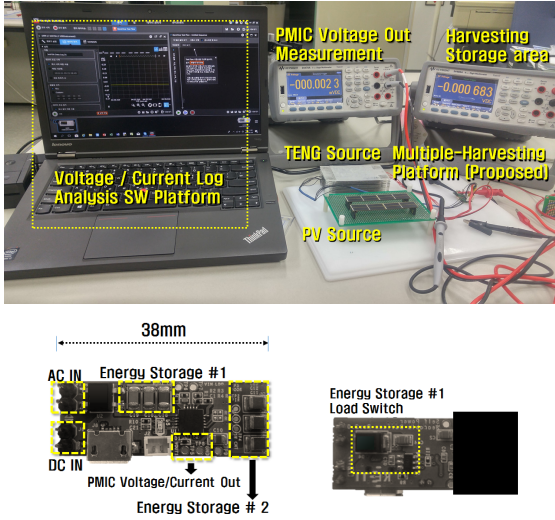


그림 13. 개발한 EH-P의 검증 환경
Fig. 13 Verification environment of developed EH-P

그림 13의 개발된 플랫폼에서 Energy Storage #2의 $C_{STORE\ 2}$ 에 저장되는 전류의 변화를 측정하였다. 그림 13, 14과 같이 2차 저장소에 저장되는 에너지는 환경에 따라 일정 시간이 지나면 저장과 방전을 반복하는 것으로 나타내며, 2차 저장소에 저장된 에너지는 변화가 쉽고 저장되는 Energy Storage #2가 5.1~5.3V로 PMIC에 사용가능한 전류범위를 갖는다.

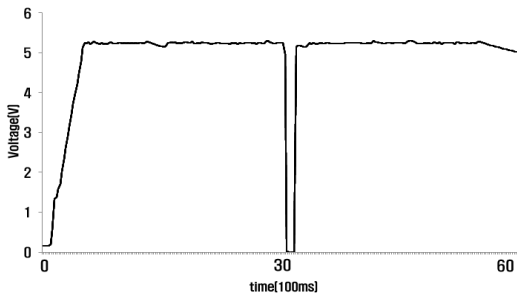


그림 14. 'D' 블록에서의 TENG에 DC 전류 값
Fig. 14 DC Voltage value at TENG in the 'D' block

그림 14와 같이 $C_{STORE\ 2}$ 의 에너지 저장 공간은 하베스팅 특성상 전류 감소와 증가가 매우 빠르게 이루

어진다. 저장되는 문턱전류는 수백 ms내에 $C_{STORE\ 1}$ 로 인해 100mV에서 1500mV로 빠르게 증가되는 것을 볼 수 있다.

앞서 'C' 블록은 발생에너지를 1차 저장하고 이를 통해 PMIC의 동작을 보장한다면, 앞서 'D' 블록은 실제 연동플랫폼에 동작을 위한 에너지를 공급하는 역할을 한다. 따라서 'C'블록은 PMIC에서 소모하는 nA의 전원 제공을 위해 수십 μ F으로 구성되지만 'D' 블록은 시스템 구동에 필요한 전원을 제공하기 위해 최소 수백 μ F의 커패시터로 구성된다. 서비스를 위한 커패시터 용량은 아래와 같이 계산될 수 있다. 전압에 따른 에너지(E)와 시간상수(RC)를 고려했을 때 시간상수(RC)는 정전용량(C)과 부하 저항(R)으로 계산되며, 커패시터에 저장 에너지(J)는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$J = V \times C \times R \quad (1)$$

또한, 커패시터에 저장된 에너지(J)는 W로 변환되기 때문에, 서비스에 필요한 총 커패시터 량은 PMIC의 변환효율(Conversion Efficiency, E_C)을 고려하여 아래와 같이 계산된다.

$$W = V \times C \times R \times E_C \quad (2)$$

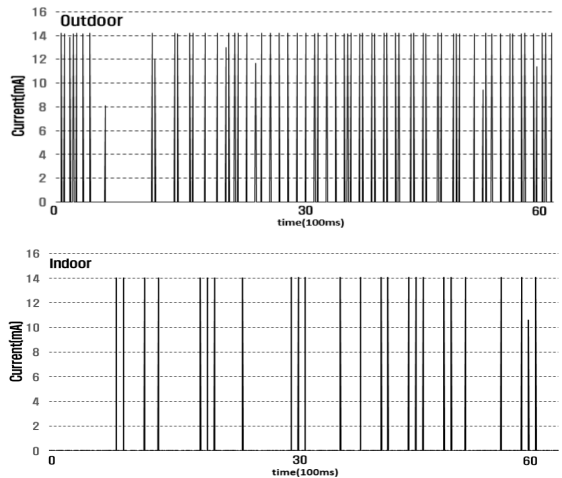


그림 15. 실내/외 환경에 따른 EH-P의 출력 전류
Fig. 15 The EH-P output current of environment according to indoor and outdoor

C_{STORE 2} 구성된 부하저항은 10MΩ이고, 그림 8의 'C'에서 약 16V를 공급하기 때문에 C_{STORE 2}는 500μF을 갖는다. 따라서 PMIC 변환효율인 90% 일 때 약 3.6초 동안 51.2mW를 지속해서 제공할 수 있다. 그림 14는 EH-P를 이용한 출력 전류의 값을 나타낸 것으로 본 연구된 플랫폼은 지속적인 에너지공급보다는 수백ms 내의 동안 에너지가 필요한 디바이스에 50~70mW의 에너지를 공급하고 휴지기 동안 다시 에너지를 수집하는 공급과 수집이 반복되는 순환 사이클의 에너지를 제공한다. 그림 16과 같이 실외 환경에서 측정된 결과는 PV로 낮고, 많은 전원을 제공하는 것으로 나타나며, 그림 6과 같이 실내의 낮은 조도에서 태양전지의 부족한 에너지를 TENG가 PV를 보완하여 실내의 하베스팅 문제를 극복할 수 있다.

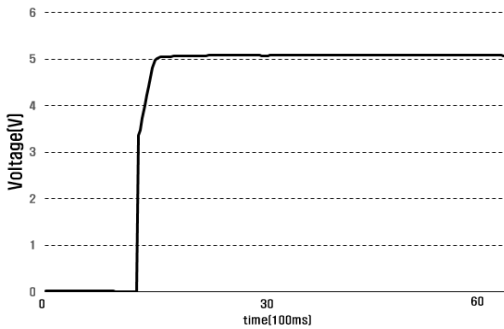


그림 16. 실내/외 환경에 따른 EH-P의 출력 전압
Fig. 16 The EH-P output voltage of environment according to indoor and outdoor

4.2 시제품 연동과 검증

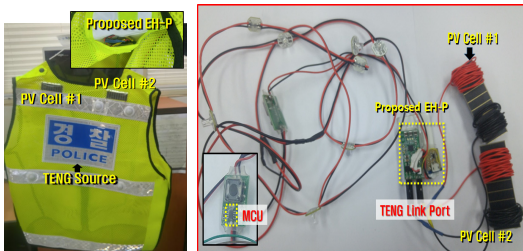


그림 17. 안전/경찰조끼를 위한 EH-P 시제품
Fig. 17 The EH-P Prototype for safety and police vests

앞서 3장과 4.1에 검증을 통해 실내외에서 PV와 TENG가 상호보완적 구성으로 에너지 저장과 활용의

가능성 검증하였다. 이를 바탕으로 관련 서비스 기관과 협업하여 시제품 플랫폼을 개발하였다. 전체 플랫폼의 지속적인 전력소모는 110mW로 MCU와 스위치로 LED제어를 하며, Atmel사의 attiny13를 0.1MHz로 저속 구동을 통해 100μW 이내로 전원소모를 줄였다. 또한, LED 점멸은 표 2과 같이 간헐 점멸은 1초마다, 빠른 점멸은 0.5초마다 LED가 ON/ OFF되는 2가지 상태로 제어한다. 시작품인 경찰/안전 조끼는 대부분이 빠른, 간헐적 점멸로만 사용되기 때문에 소모량은 26.3-41.4mW/s로 볼 수 있으며, 본 제안된 멀티 에너지 하베스팅 플랫폼 같이 70-100mW를 내외의 전원을 사용하는 저전력 플랫폼에는 매우 적합한 분야다. 3장과 4장 1절의 선행 측정결과를 고려한다면 빠른 점멸을 약 10초, 간헐 점멸은 약 20초까지 제공할 수 있다.

표 2. 시제품의 동작 모드에 따른 전력 소모
Table 2. Power consumption on the prototype operation mode

Mode	Persistent blink	Fast blink	Intermittent blink
Power Consumption (mW/s)	110	41.4	26.3

본 제시한 결과를 기반으로 검증기관인 KRL을 통해 실내외의 일반적 상황에서 제시한 플랫폼의 배터리 대체율을 검증·의뢰한 결과, 표2와 같이 29.46%임을 확인하여 관련 인증서를 획득하였다. 예를 들어 만약 10일을 사용할 수 있는 배터리 환경에서 약 30%인 3일을 에너지 하베스팅이 배터리를 대체하고 서비스 플랫폼에 전원을 공급함으로써 서비스 플랫폼의 전체 사용시간을 증대시키는 결과를 도출하였다.

표 3. 시제품에서 에너지 하베스터의 배터리 대체율
Table 3. Replacement rate of battery with energy harvester in prototype device

Battery replacement rate (%)	29.46
------------------------------	-------

Quality System certificate Number : KR30171121D

V. 결론

과거 선행연구에서 에너지 발전소자인 PV, TENG를 융합하거나 이를 위한 PMIC 연구가 있었으며, PV의 경우 다양한 서비스에 알맞은 PMIC가 판매되고 있다. 하지만 이렇게 두 개의 발전소재를 이용한 시제품을 위한 에너지하베스팅 플랫폼은 국내에 발표된 적이 없으며 국내의 경우는 TENG를 위한 PMIC 연구 또한 초기 단계라 할 수 있다. 또한, 실용화 측면에서 PMIC의 효율을 극대화하고, 본 제안과 같은 이중화된 저장과 스위치방안은 피에조, TENG와 같이 PV보다 상대적으로 전력이 낮고 수십 배로 높은 전압의 갖는 발전소재를 활용할 수 있는 방안을 제시하였다. 제안된 시스템은 임의적인 환경보다는 인증기관의 평가를 통해 기존 웨어러블 조끼 플랫폼의 사용시간을 약 30% 증가시킴으로써 제품화 가능성을 제시할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 2017년도 산업통상자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT)의 '웨어러블 디바이스용 플랫폼 전원공급 모듈 및 장치 개발 지원 사업'으로 수행되었음('10065730')

References

- [1] G. Yu, K. Chew, K. W. R., Z. Sun, H. Tang, and L. Siek, "A 400 nW single-inductor dual-input - tri-output DC - DC buck - boost converter with maximum power point tracking for indoor photovoltaic energy harvesting," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol 50, no. 11, 2015. pp. 2758-2772.
- [2] C. Bowen, H. Kim, P. Weaver, and S. Dunn, "Piezoelectric and ferroelectric material -s and structures for energy harvesting applications," *Energy & Environmental Science*, vol 7, no. 1, 2014, pp. 25-44.
- [3] Y. Zi, L. Lin, J. Wang, S. Wang, J. Chen, X Fan, P. Yang, F. Yi and Z. Wang, "Triboelectric - Pyroelectric - Piezoelectric Hybrid Cell for High Efficiency Energy Harvesting and Self Powered Sensing," *Advanced Materials*, vol. 27, no. 14, 2015, pp. 2340-2347.
- [4] Panasonic Eco Solutions Amorton Co.,Ltd, *Technical Report, Amorphous Silicon Solar Cells-Indoors*, Panasonic: Jan. 2016, pp. 1-10.
- [5] L. Dhakar, *Overview of Energy Harvesting Technologies-In Triboelectric Devices for Power Generation and Self-Powered Sensing Applications*, Springer Nature Singapore : 2017, pp.9-37,
- [6] ALTADEVICES Inc., *Technical Report, Solar Power Energy Harvesting Electrical Integration*, ALTADEVICES : Dec. 2017, pp. 1-10.
- [7] J. Zhang, Y. Huang, and P. Cao, "An Investigation of Wideband Rectennas for Wireless Energy Harvesting," *Wireless Engineering and Technology*, vol. 5, no. 04, 2014, pp. 107-113.
- [8] H. Zhang and C. Shuying,, "A new MPPT algorithm based on ANN in solar PV systems," *Advances in Computer, Communication, Control and Automation*, vol. 121, 2011, pp. 77-84.
- [9] J. McCullagh, "An Active Diode Full-Wave Charge Pump for Low Acceleration Infrastructure-Based Non-Periodic Vibration Energy Harvesting," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*. vol. PP, no. 99, 2017, pp. 1-13.
- [10] J. Kim, J. Kim and C. Kim, "charge pump with a low-power integrated optimum power point tracking algorithm for indoor solar energy harvesting," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*. vol. 58, no. 12, 2017, pp. 802-806.
- [11] R. Caliò, U. Rongala, D. Camboni, D., M. Milazzo, C. Stefanini, G. Petris and C. Oddo, "Piezoelectric energy harvesting solutions," *Sensors*, vol 14, no. 3, 2014, pp. 4755-4790.
- [12] LINER Technology Inc, *Manual, 20V High Efficiency Nanopower Step-Down Regulator 2016*, LINER Inc: Jun. 2016, pp. 1-22.
- [13] D. Rhee and S. Kim, "Study on a Laser Wireless Power Charge Technology," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*,

vol. 12, no. 12, Dec. 2016, pp. 1219- 1224.

- [14] J. Park, J. Shin, S. Ahn, H. Lim, and Y. Ko, "Design and Making of a Buck Converter For Smart Phone Wireless Charging," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 12, no. 4, Aug. 2017, pp. 607-613.

저자 소개



박헌문(Hyun-Moon Park)

2006년 국민대학교 전자통신학과 졸업(공학석사)

2010년 국민대학교 BIT학과 졸업(이학박사)

2010년~2013년 한국전자통신연구원

2014년~현재 전자통신연구원 SoC플랫폼센터 책임연구원

※ 관심분야 : IoT시스템, 에너지하베스팅, 엣지컴퓨팅



김병수(Byung-Soo Kim)

2008년 인하대학교 정보통신공학과 졸업(공학석사)

2013년 인하대학교 정보통신공학과 졸업(공학박사)

2013년~현재 전자부품연구원 SoC플랫폼연구센터

※ 관심분야 : 임베디드 하드웨어, Spike Neural Network, Machine Learning



김동순(Dong-Sun Kim)

1997년 인하대학교 전자재료공학과 (공학석사)

2013년 인하대학교 전자재료공학과 미디어시스템(공학박사)

1999년~현재 전자부품연구원 SoC플랫폼센터 센터장

※ 관심분야 : 임베디드 하드웨어, 멀티미디어 SoC Design

