

스마트 센서의 에너지 하베스팅 전원 공급부 설계 방안 연구

장호덕*

Investigation on the Design Method of a Energy Harvesting Power Supply for a Smart Sensor

Ho-Deok Jang*

요약 스마트 센서는 IoT (Internet of Things) 서비스 구현을 위한 단말장치 역할의 핵심 구성요소이다. 본 논문에서는 스마트 센서의 전원 공급부를 에너지 하베스팅 장치를 이용하여 설계하는 방안을 연구하였다. 대표적인 에너지 하베스팅 장치인 태양전지와 압전소자를 적용하여 전원 공급부의 성능을 확인하고, 스마트 센서의 동작에 따른 전원 공급부 최적화 방안을 분석하였다. 또한 보조 전원장치인 배터리의 수명을 증가시킬 수 있는 방안을 제안하였다.

Abstract A smart sensor is the key element to implement IoT (Internet of Things) service, as a terminal equipment. This paper investigated the design method of a power supply using energy harvesting technique for a smart sensor. the performance of a power supply using a solar cell and a piezoelectric transducer as a energy harvesting device was verified and the method to optimize a power supply was analyzed depending on the operating condition of a smart sensor. Also the method to increase a battery life cycle as a auxiliary power supply was proposed.

Key Words : Energy Harvesting, IoT, Piezoelectric, Sensor, Solar Cell

1. 서론

스마트 센서는 기존 센서에 SoC (System on Chip), 통신 모듈이 결합되어 데이터처리 및 정보 전달, 액츄에이터 (모터, LED, 부저 등) 제어 기능이 가능한 고기능 센서를 의미한다. 초연결시대를 대표하는 IoT (Internet of Things)를 구현하는 시스템 영역에서는 단말장치 역할을 수행하며, 스마트 홈/빌딩/시티/팜/헬스케어 등의 응용분야에 따라서 다양한 센서가 사용되고 있다. 스마트 센서는 사람, 사물, 공간을 포함한 연결 대상의 확대로 디바이스, 개체, 공간의 스마트화라는 새로운 가치를 창조하는데 기여하고 있다. 구체적으로 화재, 온도, 습도 측정을 비롯한 환경 감시, 교량과 빌딩의 재해 및 안전 모니터링, 자동문 및

조명 자동제어 등의 실생활 편의기능, 혈당 및 혈압 등의 생체 정보를 모니터링 하는 헬스케어, 제조 생산성 및 효율성 향상을 목적으로 하는 등 다양한 분야에 스마트 센서의 채택이 증가하고 있다. 하지만 다양한 IoT 응용 분야에 사용되고 있는 스마트 센서는 상시 전원공급을 할 수 없고, 배터리로 동작하기 때문에 배터리나 장치를 주기적으로 교체해야 하므로 유지보수 비용이 발생하게 된다.

에너지 하베스팅 (energy harvesting)은 빛/태양광, 진동, 열, RF (Radio Frequency) 무선 신호 등과 같이 주위의 에너지원으로부터 발생하는 에너지를 전기에너지로 전환시켜 필요한 전력을 수확하는 기술이다. 자연적인 에너지원으로부터 발생하는 에너지를 전기에너지로 전환하는 방식이며, 대표적으로 빛/태양광

This Paper was supported by research Fund of Dongyang Mirae University in 2022.

*Department of Information & Communication Engineering, Dongyang Mirae University

Received January 06, 2023

Revised January 18, 2023

Accepted January 26, 2023

을 이용한 태양전지 (solar cell)[1],[2], 압전체에 가해지는 진동과 충격으로 인한 기계적 변형을 이용하여 전기에너지를 발생시키는 압전소자 (piezoelectric transducer)[3], 무선 RF 신호를 에너지원으로 사용하는 무선전력전송시스템[4],[5]이 있다.

태양전지를 사용한 에너지 하베스팅 방식의 경우 게시 주기 (advertising interval)가 0.8초이고, 출력 전력이 0dBm인 BLE (Bluetooth Low Energy) 비콘에 대한 연구 결과가 있다[6]. 압전소자는 PZT-5H를 압전체로 사용하는 경우 진동자의 가속 진폭과 주파수에 따라서 1.1Vrms에서 최대17.3Vrms의 전압을 생산할 수 있다[7]. 자동차 내연기관에서 발생하는 비틀림진동 (torsional vibration)을 에너지원으로 활용한 압전 에너지 하베스터 관련 연구에 따르면 회전축에 소형의 외팔보 (cantilever beam)를 부착하여 무선 센서 노드에 전원을 공급할 수 있다[3]. 무선전력전송 시스템은 무선 전력 송신기와 수신기 사이의 거리 기준으로 근거리 전송 방식과 원거리 전송 방식이 있다. 무선으로 전력을 전달하는 기술 방식은 전자기파, 전기장, 자기장 방식으로 구분된다. 짧은 거리에서 효율을 유지할 수 있는 자기장 방식은 스마트폰을 무선으로 충전하는 분야에 적용되고 있다. 원거리 무선 전력 전송을 위해 RF 신호를 이용한 연구가 진행되고 있지만, 전송 거리와 전력 전송 효율을 증가시켜야 하는 과제를 가지고 있다. RF 신호를 이용한 무선전력전송시스템의 경우 송신기와 수신기 사이의 거리가 증가하면 수신 전력이 급격하게 감소하는 것을 보완하기 위해서 이득을 조절할 수 있는 전력 증폭기를 활용한 연구 결과가 있다[5]. RF 주파수 대역은 915MHz를 사용하였고, 전력 증폭기를 안테나와 RF-DC 변환기 사이에 넣어서 무선전력전송시스템 수신기를 설계하였다. 915MHz RF 신호의 전송 거리에 따라서 수신 전력을 수치 해석한 결과, 전송 거리가 5m일 때 전력 증폭기의 이득을 13.98dB로 조정하면 전송 거리가 1m일 때의 수신 전력을 가질 수 있다는 것을 확인하였다.

본 논문에서는 스마트 센서의 전원 공급부를 에너지 하베스팅 기술을 활용하여 설계하는 방안을 연구한다. 다양한 IoT 응용 서비스에 사용되는 스마트 센서의 전원 공급부 성능을 확인하기 위해서 에너지 하베

스팅 장치로 태양전지와 압전소자를 선택하여 전원 공급부의 출력 전압을 확인한다. 또한 스마트 센서의 동작 조건에 따른 전원 공급부 출력을 분석하여 전원 공급부 최적화를 위한 방안을 도출한다.

2. 에너지 하베스팅 스마트 센서 설계

스마트 센서는 다양한 입력 정보를 전기신호로 변환하는 기존 센서의 기능에 IoT 서비스를 제공하기 위해 정보를 처리하고 상위단으로 데이터를 전송하는 통신 기능이 추가된 IoT 단말장치이다. 그림 1에서와 같이 스마트 센서의 하드웨어는 센서부, 마이크로프로세서 신호처리부, 무선통신 인터페이스, 전원 공급부로 구분된다. 전원 공급부는 에너지 하베스팅 장치, 보조 전원으로 사용한 3V 리튬 코인 배터리, 축전을 위한 캐패시터 (capacitor), 전력 관리를 위한 PMIC (Power Management IC)로 구성된다. 스마트 센서의 무선통신 인터페이스는 IoT 시스템의 게이트웨이와 통신을 하기 위한 것으로 저전력으로 동작하고, 단거리 무선통신에 적합한 BLE를 적용하여 설계하였다.

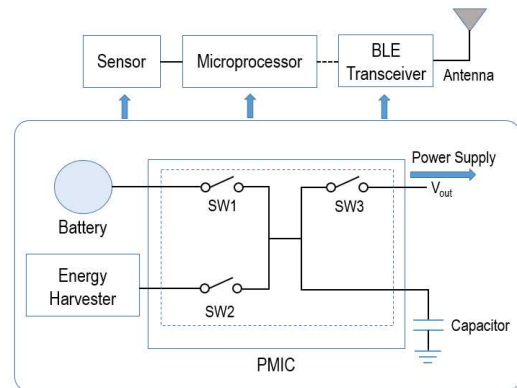


그림 1. 에너지 하베스팅 스마트 센서

Fig. 1. Smart sensor powered by energy harvester

PMIC는 에너지 하베스팅 장치의 출력이 1.55V 이상이면 전원으로 사용하고, 1.45V 이하이면 3V 리튬 코인 배터리를 전원으로 사용한다. 그림 1에서 에너지 하베스팅 장치의 출력 전압이 1.55V 이상이면 SW2가 닫히게 되며, 에너지 하베스팅 장치와 축전 캐패시터가 연결되어 충전되기 시작한다. 축전 캐패시터의 전

압이 상한 임계값(3.27V) 이상되면 SW2는 열리게 되고, SW3이 PMIC의 출력 핀과 축전 캐패시터를 연결하여 방전되기 시작한다. 축전 캐패시터의 전압이 하한 임계값(1.93V) 이하로 떨어질 때까지 SW3은 닫힌 상태를 유지한다. 축전 캐패시터의 전압이 상한 임계값의 95% 아래로 떨어지면 SW2가 닫히게 되며, 에너지 하베스팅 장치와 연결되어 축전 캐패시터는 다시 충전을 시작한다. 따라서 축전 캐패시터는 충전과 방전을 반복하면서 상한 임계값의 95% 이상 범위로 유지하게 된다.

3. 에너지 하베스팅 장치 성능 분석

3.1 태양전지

그림 1의 에너지 하베스팅 장치로 태양전지를 사용하여 300~600lx의 일반적인 사무실 환경에서 측정된 PMIC 출력 전압은 그림 2와 같다. 태양전지는 Panasonic AM-1801 제품을 사용하였고, 200lx 기준으로 5V의 출력 전압을 제공한다[8]. 태양전지의 출력전압이 임계치인 1.55V 이상이면 PMIC는 태양전지를 전원으로 사용하며, 1.45V 이하로 떨어지면 리튬 코인 배터리를 사용하게 된다.

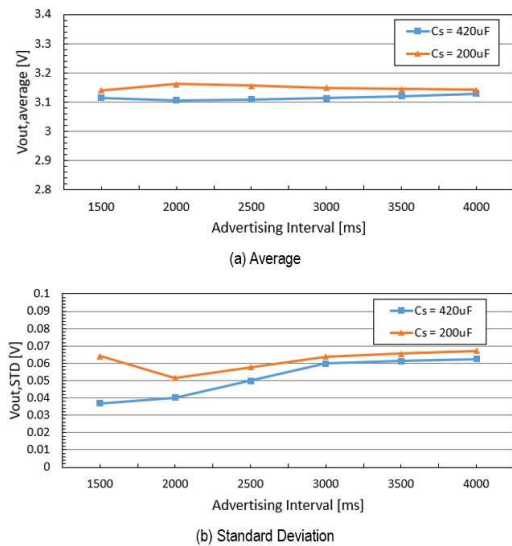


그림 2. 태양광 에너지 하베스팅 스마트 센서의 출력 전압
Fig. 2. Output voltage of smart sensor powered by solar cell

태양전지를 사용한 에너지 하베스팅 전원공급부에서 축전 캐패시터의 용량 (C_s)이 출력 전압에 미치는 영향을 분석하기 위해서 200 μ F, 420 μ F 일 때 PMIC 출력 전압을 측정하여 비교하였다. BLE 게시 주기는 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000ms이다. 상위단의 게이트웨이로 정보를 전달하는 과정에서 BLE 게시 주기마다 패킷을 전송하게 되며, 게시 주기가 증가할수록 축전 캐패시터의 충전과 방전을 되풀이하는 주기는 증가하게 된다. PMIC 출력 전압의 평균값은 축전 캐패시터의 용량이 200 μ F일 때 게시 주기에 따라서 3.14~3.16V이며, 420 μ F일 때 3.1~3.13V로 거의 일정한 값을 가진다.

PMIC 출력 전압의 변화량을 확인하기 위한 표준편차는 축전 캐패시터의 용량이 200 μ F일 때 게시 주기에 따라서 0.052~0.067V이며, 420 μ F일 때 0.037~0.063V이다. 축전 캐패시터의 용량을 200 μ F에서 420 μ F로 대략 2배 증가시키면 PMIC 출력 전압의 표준편차가 감소하는데, 시정수 ($\tau=RC$)의 증가로 인해서 축전 캐패시터가 방전되는 시간이 길어지기 때문이다. 게시 주기가 1500ms인 경우 캐패시터 용량이 200 μ F일 때 표준편차가 0.064V이며, 420 μ F일 때 0.037V로 0.027V 감소한다. 게시 주기가 증가할수록 축전 캐패시터의 충전과 방전을 되풀이하는 주기가 증가하기 때문에 시정수 증가로 인한 표준편차 감소폭은 줄어들게 된다.

표 1은 BLE 게시 주기 (T_{ad})에 따른 에너지 하베스팅 스마트 센서의 평균 전류 소비량 ($I_{average}$)을 보여준다. 게시 주기가 100ms일 때 평균 전류는 173.2 μ A이고, 1000ms로 증가하면 19 μ A로 급격하게 감소하게 된다. 2000ms에서는 11.8 μ A이며, 평균 전류 소비량의 감소폭이 완만하게 감소하는 경향을 가지게 된다. 표 2는 용량 ($C_{battery}$)이 165mAh인 3V 리튬 코인 배터리의 하루 사용 시간 (T_h)에 따른 수명을 보여준다. 배터리 수명($L_{battery}$)은 아래 수식으로 계산할 수 있다.

$$L_{battery} = \frac{C_{battery}}{T_h \times I_{average}} \quad (1)$$

표 1. 에너지 하베스팅 스마트 센서의 평균 전류 소비량
Table 1. Average current consumption of energy harvesting smart sensor

Advertising Interval [ms]	Average Current [μ A]
100	173.2
200	87.9
300	58.8
400	44.6
500	36.2
600	30.5
700	26.4
800	23.2
900	20.9
1000	19.0
1500	14.6
2000	11.8
2500	9.9
3000	8.5
3500	7.2
4000	6.2

표 2. 165mAh 3V 리튬 코인 배터리의 수명 예측값
Table 2. Estimated life cycle of 165mAh 3V lithium coin battery

T_h [hour]	$L_{battery}$		
	$T_{ad}=100$	$T_{ad}=1000$	$T_{ad}=2000$
0.2	4763.3	43352.6	69915.3
0.4	2381.6	21676.3	34957.6
0.6	1587.8	14450.9	23305.1
0.8	1190.8	10838.2	17478.8
1.0	952.7	8670.5	13983.1
1.2	793.9	7225.4	11652.5
1.4	680.5	6193.2	9987.9
1.6	595.4	5419.1	8739.4
1.8	529.3	4817.0	7768.4
2.0	476.3	4335.3	6991.5

스마트 센서가 설치되는 장소에 따라서 태양전지의 출력이 1.45V 이하로 떨어지는 시간이 결정되며, 배터리의 하루 사용 시간이 0.2시간 (12분)인 경우의 배터리 수명은 게시 주기가 100ms 일 때 4763.3시간 (198.4 일), 1000ms 일 때 43352.6시간 (1806.3일), 2000ms 일 때 69915.3시간 (2913.1일)으로 증가하는 것을 알 수 있다. 배터리의 하루 사용 시간이 2시간

(120분)인 경우의 배터리 수명은 게시 주기가 100ms 일 때 476.3시간 (19.8일), 1000ms 일 때 4335.3시간 (180일), 2000ms 일 때 6991.5시간 (291일)으로 10 배 감소하게 된다. 따라서 에너지 하베스팅 장치로 태양전지를 사용하는 경우에는 설치 장소에 따라서 BLE 게시 주기를 설정해야 배터리의 수명을 늘릴 수 있다.

3.2 압전소자

압전소자는 진동이나 충격으로 인해서 압전체에 기계적 변형이 발생했을 때 전기에너지를 생산하게 된다. 진동 에너지원으로 duty cycle이 25%인 PWM (Pulse Width Modulation) 신호로 동작하는 모터를 활용하여 V_{out} 핀의 전압을 측정된 결과는 그림 3과 같다. 압전소자는 MIDE PPA-1001 제품을 사용하였다. PZT-5H를 압전체로 사용하였고, 압전소자는 진동자의 가속 진폭과 주파수에 따라서 생산되는 전압이 결정된다. 진동 주파수가 60Hz이고, 가속 진폭이 0.5g 이면 3.3Vrms 전압이 발생하게 된다 [7]. 압전소자의 출력 전압이 1.55V 이상이 되면 PMIC는 압전소자를 전원으로 사용하며, 출력 전압이 1.45V 이하로 떨어지면 리튬 코인 배터리를 사용하게 된다.

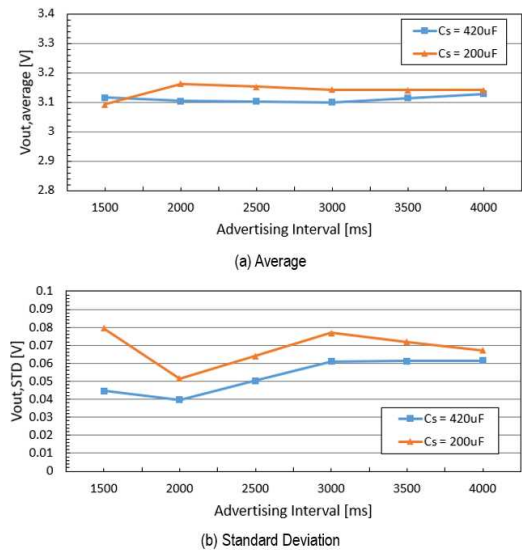


그림 3. 압전 에너지 하베스팅 스마트 센서의 출력 전압
Fig. 3. Output voltage of smart sensor powered by piezoelectric transducer

PMIC 출력 전압의 평균값은 축전 캐패시터의 용량이 200 μ F일 때 게시 주기에 따라서 3.09~3.16V 이며, 420 μ F일 때 3.1~3.13V로 거의 일정한 값을 가진다. PMIC 출력 전압의 변화량을 확인하기 위한 표준편차는 축전 캐패시터의 용량이 200 μ F일 때 게시 주기에 따라서 0.052~0.079V 이며, 420 μ F일 때 0.04~0.062V 이다. 축전 캐패시터의 용량을 200 μ F에서 420 μ F로 증가시키면 시정수의 증가로 인해 PMIC 출력 전압의 표준편차가 감소하게 된다.

압전소자를 에너지 하베스팅 장치로 사용한 경우의 배터리 수명은 표 2의 결과와 동일하다. 압전소자의 진동자 가속 진폭과 주파수가 임계 전압 이상의 출력을 발생시키지 못하는 조건을 가지는 시간에 따라서 배터리 수명이 결정되게 된다. 따라서 스마트 센서 설치 환경에 맞게 BLE 게시 주기를 설정해야 배터리 수명을 늘릴 수 있다.

4. 결론

스마트 센서는 IoT 서비스를 위한 정보를 제공하기 위해서 주변 환경에서 데이터를 수집하는 단말 장치로서 무수히 많은 다양한 종류의 스마트 센서가 실내외 주변 환경에 설치되고 있다. 하지만 배터리 수명과 관리 이슈를 해결하기 위한 방안이 필요하며, 이를 위해 본 논문에서는 에너지 하베스팅 기술을 활용한 전원 공급부 설계 및 최적화 방안을 연구하였다. 에너지 하베스팅 장치로 태양전지와 압전소자를 사용하여 스마트 센서 동작을 위한 평균 출력 전압을 측정하고, 축전을 위한 캐패시터 용량을 높이면 전원 공급부의 출력 전압 변화량이 감소하는 것을 확인하였다. 태양전지의 경우 게시 주기가 1500ms일 때 캐패시터 용량을 200 μ F에서 420 μ F로 증가시키면 출력 전압의 표준편차가 0.064V에서 0.037V로 0.027V 감소한다. 압전소자는 게시 주기가 1500ms일 때 캐패시터 용량을 200 μ F에서 420 μ F로 증가시키면 출력 전압의 표준편차가 0.079V에서 0.045V로 0.034V 감소한다. 보조 전원으로 사용한 배터리의 수명은 에너지 하베스팅 장치의 출력 전압이 임계치 보다 작아지는 조건을 가지는 시간에 반비례하게 된다. 따라서 스마트 센서의 설치 환

경에 따라서 BLE 게시 주기를 적절한 값으로 설정하는 것을 제안한다.

REFERENCES

- [1] P. Spachos, Andrew Mackey, "Energy efficiency and accuracy of solar powered BLE beacons," *Comput. Commun.*, vol. 119, pp. 94-100. Dec. 2017.
- [2] K. Jeon, James She, Jason Xue, Sangha Kim, Soochang Park, "luXbeacon-A Batteryless Beacon for Green IoT: Design, Modeling, and Field Tests," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, pp. 5001-5012. Jan. 2019.
- [3] G. W. Kim, "Piezoelectric Energy Harvesting from Torsional Vibration in Internal Combustion Engines," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 16, no. 4, pp. 645-651. Aug. 2015.
- [4] Aziz Arif Abdul, Tribudi Dimas, Ginting Lorenz, Rosyady Phisca Aditya, Setiawan Dedi, Choi Kae Won, "RF energy transfer testbed based on off-the-shelf components for IoT application," *J. KICS*, vol. 40, no. 10, pp. 1912-1921, Oct. 2015.
- [5] H. D. Jang, "Study on Design Method of RF Energy Harvesting WPTS Receiver", *J. KICS*, vol. 45, no. 2, pp. 364-367, Feb. 2020.
- [6] Kang Eun Jeon, Tommy Tong, James She, "Preliminary design for sustainable BLE beacons powered by solar panels" *2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pp. 103-109, San Francisco, CA, USA, April 2016.
- [7] Mide, PPA-1001 product datasheet & user manual(2016), Retrieved Dec., 23, 2022, from <https://www.mide.com>.
- [8] Panasonic, amorphous silicon solar cell, Retrieved Nov., 12, 2022, from <https://panasonic.net>.

저자약력

장 호 덕 (Ho-Deok Jang)

[정회원]



- 2002년 2월: 고려대학교 전파공학과 전파공학(공학 석사)
- 2006년 8월: 고려대학교 전파공학과 초고주파및광파공학 (공학 박사)
- 2006년 9월 ~ 2014년 9월: LS 전선
- 2015년 4월 ~ 2016년 2월: 한국디지털케이블연구원
- 2016년 3월 ~ 현재: 동양미래대학교 정보통신공학과 교수

〈관심분야〉 스마트센서, IoT, 에너지 하베스팅