

MPPT 제어기능을 갖는 마이크로 빛에너지 하베스팅 회로

(A Micro Solar Energy Harvesting Circuit with MPPT Control)

윤은정¹, 양민재¹, 유중근^{1,a}

¹ 인천대학교 전자공학과

Eun-Jung Yoon¹, Min-Jae Yang¹, Chong-Gun Yu^{1,a}

¹ Department of Electronics Engineering, Incheon National University

E-mail : unyuj@inu.ac.kr

요약 - 본 논문에서는 0.5V 이하의 낮은 전압을 출력하는 초소형 PV(photovoltaic) 셀을 이용한 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어 기능을 갖는 마이크로 빛에너지 하베스팅 시스템을 제안한다. MPPT 제어는 PV 셀의 개방전압과 MPP(Maximum Power Point) 전압간의 비례관계를 이용하여, 파일럿(pilot) PV 셀로 하여금 주(main) PV 셀의 MPP를 실시간 추적할 수 있도록 설계하였다. 제안된 회로는 0.18um CMOS 공정으로 설계되었으며, 칩 면적은 부하단 전하펌프와 패드를 포함하여 900um×1370um이다. 제작된 칩을 측정된 결과 설계된 회로가 빛 세기의 변화에 따른 MPP 전압 변화를 실시간 트래킹하는 것을 확인하였다. 또한 MPPT 제어기능을 적용했을 때 부하가 큰 경우에도 MPP 근처의 전압을 부하에 공급함으로써 MPPT 제어기능을 적용하지 않았을 때에 비해 더 많은 전력을 부하로 공급하는 것을 확인하였다. 기존의 마이크로 빛에너지 하베스팅 회로에 비해 제안된 회로는 제어회로 구동을 위해 미리 충전된 배터리가 필요하지 않기 때문에 배터리를 사용하지 않는 초소형 자가발전 시스템에 적합하다.

Abstract - In this paper a micro solar energy harvesting system with MPPT(Maximum Power Point Tracking) control using a miniature PV(photovoltaic) cell of which the output is less than 0.5 V is proposed. The MPPT control is implemented using linear relationship between the open-circuit voltage of a PV cell and its MPP(Maximum Power Point) voltage such that a pilot PV cell can track the MPP of the main PV cell in real time. The proposed circuit is designed in 0.18 um CMOS process. The designed chip area is 900 um×1370 um including a load charge pump and pads. Measured results show that the designed system can track the MPP voltage changes with variations of light intensity. The designed circuit with MPPT control delivers MPP voltages to load even though the load is heavy such that it can supply more power when the MPPT control is applied. The proposed circuit does not require any precharged battery resulting in more suitability for miniaturized self-powered systems compared to the existing works.

a. Corresponding author; chong@inu.ac.kr

Copyright ©2015 IDEC All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

최근 무선 네트워킹을 통해 사람과 사물간의 통신 뿐만 아니라 사물과 사물간의 통신까지 정보흐름의 영역을 확대하기 위한 USN(Ubiquitous Sensor Network) 기술 개발이 활발히 진행되고 있다. USN 구현의 핵심 블록인 센서노드의 구동을 위해서는 센서 노드 규격에 적합한 초소형, 초경량, 장수명성을 가지는 전원소자를 사용하여 완전히 독립된 자체 전원을 확보하는 것이 중요하다. 센서노드의 경우에는 반영구적으로 일정 부위에 부착되어 상시 모니터링 및 상호 통신기능을 수행하는 장치이기 때문에 교체가 어려운 일차전지보다는 지속적으로 사용 가능한 2차전지가 적합하다. 그러나 센서노드는 보통의 경우 유선 충전이 불가능한 곳에 위치하기 때문에 무선충전이나 자가발전(self-powered) 기능이 필요하며, 자가발전 또는 배터리 대용으로 사용될 수 있는 기술이 에너지 하베스팅(energy harvesting) 기술이다 [1~3].

빛에너지는 태양, 조명등에서 가장 쉽게 얻을 수 있는 에너지이며 상대적으로 변환 효율이 높기 때문에 오래전부터 연구 개발이 진행되어 왔다. 빛에너지를 전기에너지로 변환하기 위해서는 광전효과를 이용한 PV(photovoltaic) 셀이 필요하다. 초소형 빛 에너지 하베스팅 시스템을 구현하기 위해서는 초소형 PV 셀이나 다른 회로와 함께 집적되는 ISC(integrated solar cell)를 사용해야 한다. 그러나 초소형 PV 셀이나 ISC에서 출력되는 전압은 0.5보다 작은 전압이기 때문에, 시스템을 직접 구동할 수 없으며 전압을 키우기 위한 전압부스터(voltage booster)가 필요하다.

PV 셀에서 얻을 수 있는 에너지의 양은 환경변

화에 따라 변한다. 각 셀마다 최대 전력점 (MPP: Maximum Power Point)이 존재하며, 이 MPP는 빛의 세기에 따라 변한다. PV셀로부터 최대 전력을 수확하기 위해서는 PV 셀이 항상 MPP 근처에서 동작하도록 하기 위한 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어 기능이 필요하다. 초소형 PV 셀로부터 얻을 수 있는 전력은 수십 μW 이하로 매우 작기 때문에, 초소형 에너지 하베스팅 시스템의 경우 MPPT 기능은 더 필요할 수 있다. 따라서, MPPT 기능을 구현하는데 소모되는 추가적인 전력소모는 최소화하면서 PV 셀로부터 가능한 최대 전력을 끄집어내는 것이 관건이다.

다양한 MPPT 방법들[4] 중에 hill-climbing 방법과 FOC(fractional open-circuit) 방법이 초소형 빛에너지 하베스팅 시스템에 주로 사용되어 왔다. Hill-climbing 방법은 MPP에 도달할 때까지 전력변환기(power converter)의 스위칭 주파수나 듀티 사이클(duty cycle)을 지속적으로 변화시키는 반복탐색 방식이다. 기존의 hill-climbing 방식[9-11]에서는 순간 출력 전력을 계산하기 위해 마이크로컨트롤러를 사용하였기 때문에, 초소형 마이크로 에너지 하베스팅 시스템에는 적합하지 않다. 참고문헌 [7]에서는 PV 셀의 전압과 전하펌프의 스위칭 주파수간의 관계를 이용한 간단한 MPPT 회로를 통해 MPPT 제어 기능을 구현하였다. 그러나 MPPT 제어 회로를 구동하기 위해 미리 충전된 배터리 (precharged battery)가 필요하며, 따라서 배터리를 사용하지 않는 자가발전 시스템에는 적합하지 않다.

FOC 방법은 PV 셀의 MPP 전압과 개방회로 전압 사이에는 선형적 관계가 존재하며, 비례상수는 거의 일정한 값을 갖는다는 사실에 근거한다. 따라서, PV 셀을 주기적으로 부하로의 연결을 차단하여 개방회로 전압을 측정함으로써 MPP 전압을 쉽게 얻을 수 있다. 이 방법은 hill-climbing 방법에서처럼 많은 계산을 요구하지는 않지만, 에너지 하베스팅 모드와 개방회로전압 감지 모드의 반복 수행에 필요한 하드웨어 비용과 추가적인 전력소모가 관건이 될 수 있다. 좀 더 적은 비용과 저전력으로 FOC 방법을 구현하기 위해, 참고문헌 [6]에서 LRCM (Linear Reoriented Coordinate Method)을 제안하였으며, 전력소모를 줄이기 위해 sub-threshold 및 floating-gate 설계를 적용하였다. 주 에너지원으로 ISC (CMOS photodiodes)를 사용하였으며, 제어회로 구동을 위해

보조 ISC (auxiliary photodiode array)를 사용하였다. 이 방법은 ISC를 사용하였기 때문에 초소형 자가발전 시스템을 위한 에너지 하베스팅 회로로 적합하다. 그러나 내부 회로 구동을 위해 p-diff/n-well 다이오드의 직렬연결을 사용하였으며, 기판의 기생 다이오드에서의 누설 전류를 반영하지 않은 상태로 모의실험을 하였기 때문에 실제 구현시 문제가 될 수 있다.

본 논문에서는 배터리를 사용하지 않는 초소형 자가발전 시스템을 위한 마이크로 빛 에너지 하베스팅 시스템을 제안한다. 시스템의 크기를 최소화하기 위해 목표로 하는 빛에너지 변환 소자는 초소형 PV 셀(0.14 cm^2) 또는 ISC이다. MPPT 구현에 FOC 방법을 이용하였으나, 파일럿(pilot) PV 셀(0.07 cm^2)을 이용하여 주(main) PV 셀의 개방회로 전압을 좀 더 간단히 예측하는 방법을 사용하였다. MPPT 제어 회로의 구동은 간단한 승압회로를 사용하여 주 PV 셀의 출력 전압을 승압하여 사용하기 때문에 미리 충전된 배터리가 필요하지 않다. 따라서, 제안된 회로는 배터리를 사용하지 않는 초소형 자가발전 시스템에 적합하다. 제안된 회로의 설계, 구현 및 측정결과에 대해 차례로 언급한다.

II. 회로 설계

그림 1은 본 논문에서 제안하는 MPPT 제어기능을 갖는 마이크로 빛에너지 하베스팅 회로이다. 제안된 회로는 주 PV 셀, VB(voltage booster), SEMC(Solar Energy MPPT Control) 회로, 전력 스위치(power switch) 그리고 부하단 전하펌프(charge pump)로 구성되어있다. PV 셀은 빛에너지를 전기에너지로 변환하는 역할을 하며, 본 논문에서 사용된 초소형 PV 셀의 출력 전압은 0.5 V 보다 작기 때문에, SEMC 회로를 구동하기에는 어려움이 있다. VB는 PV 셀의 낮은 출력 전압을 SEMC 회로를 구동하는데 필요한 전압 (약 1 V)으로 승압하는 역할을 한다. SEMC는 주 PV 셀과 부하단 사이에 연결된 전력스위치(pMOS 트랜지스터)를 제어하여 주 PV 셀의 출력전압이 항상 MPP 근처에서 동작하도록 하는 역할을 한다. 따라서 제안된 회로에서는 부하단 전력공급의 듀티 사이클 제어를 통해 MPPT기능을 수행한다. 부하단 전하펌프는 전력변환기 역할을 수행한다.

1. Photovoltaic (PV) cell

시스템의 크기를 최소화하기 위해 본 논문에서 목표로 하는 빛에너지 변환 소자는 초소형 PV 셀 또는 ISC이다. 설계에 사용된 주 PV 셀은 그림 2의 초소형 SCPD 소자[12]로 0.14 cm²의 면적과 0.5 V 이하의 매우 낮은 출력전압 특성을 갖는다. 이 소자는 CMOS 공정으로 집적화된 ISC와 유사한 크기와 출력전압 특성을 보인다.

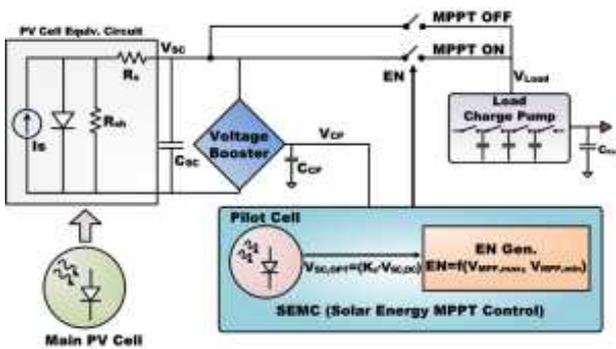


그림 1. 제안된 마이크로 빛에너지 하베스팅 회로
Fig.1. Proposed micro-scale solar energy harvesting circuit



그림 2. 설계에 사용된 PV 셀 (SCPD)
Fig.2. PV cell (SCPD) used in this design

그림 2의 PV 셀 등가회로를 모델링하기 위해 SCPD 소자의 I-V와 P-V 특성을 측정하였다. 그림 3은 10klux의 빛 세기에서 측정한 PV 셀의 I-V와 P-V 특성곡선이다. 측정결과 개방회로전압(VOC)은 350 mV이고, 단락회로전류(ISC)는 147 uA이며, MPP에서의 전압(VMPP)은 266 mV이다. 일반적으로 PV 셀의 출력 동작 전압(VOP)은 아래 식으로 정의될 수 있다.

$$V_{OP} \cong K_{OP} \cdot V_{OC} \tag{1}$$

MPP 조건에서는 비례상수 KOP와 VOP는 각각 KMPP와 VMPP로 표시할 수 있다.

$$V_{MPP} \cong K_{MPP} \cdot V_{OC} \tag{2}$$

보통의 경우 KMPP는 0.6에서 0.8 사이의 값을 갖는다 [4-6]. 본 설계에서 사용된 소자의 KMPP 측정값은 0.75이다.

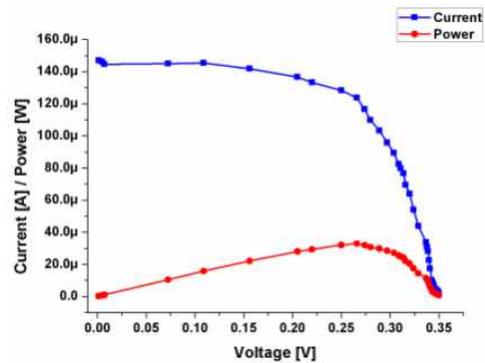


그림 3. 10klux에서 측정된 PV 셀의 I-V & P-V 특성
Fig.3. Measured I-V & P-V characteristics of the PV cell at 10klux

2. Voltage booster (VB)

그림 4의 VB(voltage booster)는 주 PV 셀에서 출력되는 0.5 V 이하의 전압(VSC)을 SEMC가 동작하는데 필요한 1 V의 이상의 전압(VCP)으로 승압하는 역할을 한다. VB는 링 발진기와 전하펌프로 구성되어 있다.

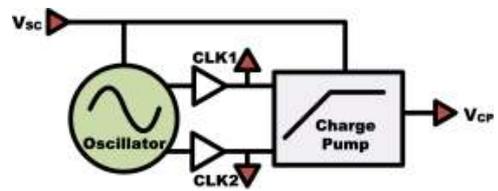


그림 4. 전압 부스터 블록도
Fig.4. Block diagram of voltage booster

그림 5의 링 발진기는 3단으로 구성하였으며, 버퍼는 4단 버퍼단으로 설계하여 비교적 크기가 큰 전하 펌프의 단(stage) 커패시터들을 구동하도록 하였다. 각

단의 크기는 4배씩 증가하여 구동능력을 키웠다. 모의 실험 결과 Vsc가 250 mV일 때 CLK1과 CLK2가 1.7 MHz의 주파수로 중첩되지 않는 클록을 출력하는 것을 확인하였다.

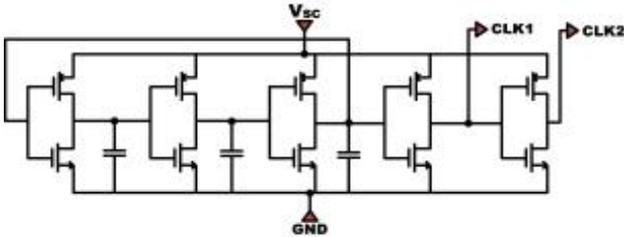


그림 5. 링 오실레이터
Fig.5. Ring Oscillator

그림 6의 전하펌프는 간단한 Dickson 구조를 사용하였다. 전하펌프의 단수는 8이며, 각 단에 사용된 커패시터(Cstage)의 값은 10 pF이다. 다이오드로 사용된 nMOS 트랜지스터는 뒷단으로 갈수록 body effect의 영향으로 문턱전압이 증가하게 된다. 따라서 작은 입력 전압으로부터 전하펌핑 능력을 증가시키기 위해 본 설계에서는 사용된 공정에서 제공하는 native nMOSFET 소자를 이용하여 전하펌프를 구현하였다.

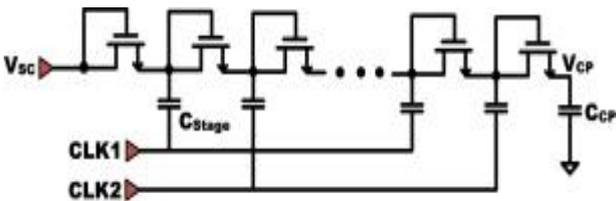


그림 6. 디슨 전하 펌프
Fig.6. Dickson Charge Pump

그림 7은 Dickson 전하펌프의 PVT 모의실험 결과를 출력한 그래프이다. 모의실험 시 입력전압은 250 mV를 입력하고 1.7 MHz의 주파수를 갖는 중첩되지 않는 클록을 인가하였으며 출력 커패시터(CCP)는 1 nF로 설정하였다. 그 결과, 전하펌프의 부하저항이 100 kΩ이 일 때, 전하펌프의 출력전압(VCP)은 194 mV이지만, 부하저항이 2 MΩ일 때, VCP는 1.2 V로 SEMC 블록이 사용 가능한 전압을 출력하는 것을 확인하였다.

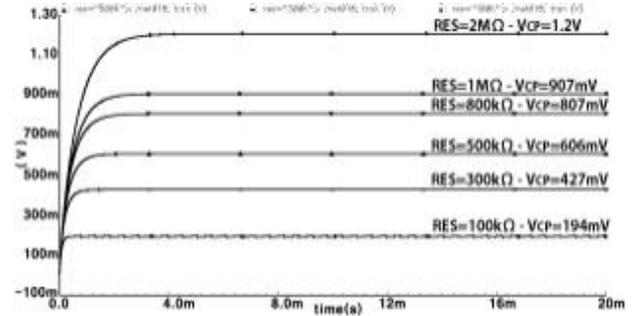


그림 7. 부하 저항에 따른 전하 펌프 출력
Fig.7. Output of charge pump with variable load resistance

3. SEMC(Solar Energy MPPT Control)

그림 8은 본 논문에서 제안된 MPPT 기능을 수행하는 SEMC의 블록도이다. SEMC 회로는 파일럿 PV 셀, 저항 분주기, 비교기, 그리고 래치로 구성된다. 파일럿 PV 셀은 출력에 연결된 저항 분주기를 통해 MPP 전압에 해당하는 기준전압(VMPP,max, VMPP,min)을 비교기에 공급하는 역할을 한다. 두 개의 비교기는 파일럿 PV 셀에서 공급된 기준전압을 주 PV 셀의 출력인 Vsc와 비교하여 Vsc가 VMPP,max 또는 VMPP,min에 도달했는지를 감지한다. 비교기가 감지한 신호를 기반으로 래치는 ‘EN’ 신호(VEN)를 발생시켜서, 부하에 전력을 공급하기 위한 전력 스위치(그림 1 참조)의 on/off 상태를 결정하게 된다.

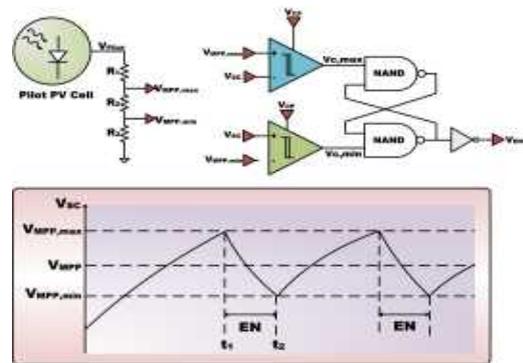


그림 8. SEMC 블록도 및 동작원리
Fig.8. Block diagram of SEMC and its operational principles

- SEMC의 MPPT 제어 동작원리는 다음과 같다.
- ① 먼저 시스템이 빛에너지를 받게 되면 주 PV 셀의 출력 커패시터 Csc가 충전되어 출력전압 Vsc가 증가한다. (충전 단계)

- ② VSC가 미리 설정된 MPP 전압 상한 값 ($V_{MPP,max}$)에 도달하면($t=t_1$), SEMC가 'EN' 신호를 발생시켜서 전력 스위치를 'on'시키고 부하에 전력을 공급하게 된다.
- ③ 보통의 경우 PV 셀에서 발생하는 전력은 부하에서 소모되는 전력 보다 작기 때문에, 전력 스위치가 'on'되어 있는 동안에는 VSC가 감소하게 된다. (방전 단계)
- ④ VSC가 미리 설정된 MPP 전압 하한 값 ($V_{MPP,min}$)까지 감소하게 되면($t=t_2$), SEMC가 전력 스위치를 'off'시키고 부하에 전력 공급을 차단하게 되어 VSC는 다시 증가하게 된다.
- ⑤ 이와 같은 충전/방전 과정은 계속 반복되고 주 PV 셀은 항상 기 설정된 MPP 범위($V_{MPP,min} \sim V_{MPP,max}$)에서 동작하게 된다.

본 설계에서는 파일럿 PV 셀을 이용하여 주 PV 셀의 MPP를 실시간 추적할 수 있도록 하였다. 파일럿 PV 셀은 주 PV 셀보다 면적은 작지만 같은 소자이고, 같은 환경에서 같은 빛의 세기를 받게 되기 때문에 두 셀의 MPP는 일치한다고 가정할 수 있다. PV 셀의 MPP 전압 V_{MPP} 와 개방회로 전압 V_{OC} 는 식 (2)의 비례관계가 성립한다. 또한, 참고문헌 [1]에 따르면 비례상수 K_{MPP} 는 빛의 세기에 따라 변하지만, K_{MPP} 가 고정됐다고 가정해도 V_{MPP} 예측의 오차는 5%이내임을 측정결과로 보여주었다. 따라서 본 설계에서는 PV 셀의 측정된 데이터($V_{OC}=350\text{ mV}$, $V_{MPP}=266\text{ mV}$ @10 klux)를 이용하여, K_{MPP} 값을 0.75로 설정하였다.

MPP 동작범위를 결정하는 기준전압 $V_{MPP,max}$ 와 $V_{MPP,min}$ 은 V_{MPP} 에서 오차가 $\pm 10\%$ 이내가 되도록, 파일럿 PV 셀의 출력에 연결되어 있는 저항 분주기의 저항 값을 설정하였다. 저항 분주기에 사용된 저항 값의 합은 $2\text{ M}\Omega$ 으로 비교적 큰 값을 사용하였다. 따라서 기준전압 $V_{MPP,max}$ 와 $V_{MPP,min}$ 은 파일럿 PV 셀의 개방회로 전압에 비례하는 값이 된다.

SEMC에 사용된 비교기는 그림 9의 잡음에 대한 민감도를 낮추기 위한 히스테리시스(hysteresis) 기능을 갖는 구조로 설계하였고, 전류소모를 줄이기 위해 R1과 M7을 추가하였다. SEMC의 비교기의 경우 voltage booster로부터 승압된 1 V를 통해 동작하게 된다. 따라서 SEMC의 비교기를 설계 시 VDD는 1 V로 설정하여 설계하였다. SEMC의 비교기는 빛을 받는 곳에서 동작하기 때문에 온도에 따른 동작이 중요하다. 표 1에

SEMC의 비교기의 온도에 따른 검증을 정리하였다. 이때 VDD는 1 V, process는 typical로 설정하여 모의실험 하였다.

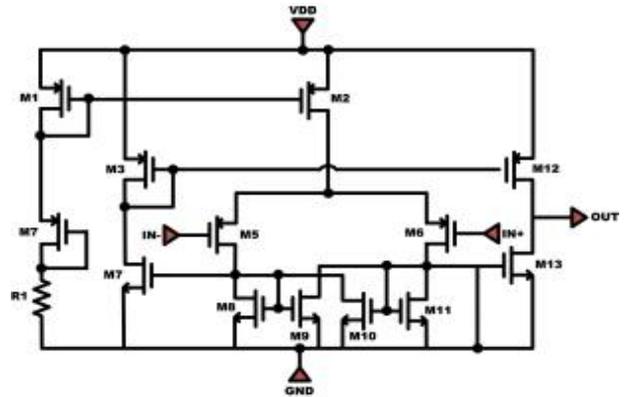


그림 9. 히스테리시스를 갖는 비교기
Fig.9. Comparator with hysteresis

4. 모의실험

마이크로 빛에너지 하베스팅 회로의 전체 모의실험은 그림 2의 PV 셀 등가모델을 이용하고 10 klux의 조도 조건이라 가정하여 모의실험을 하였다. 이때 그림 1의 CSC는 100nF, CCP는 1nF, CSTO는 1mF으로 설정하였다.

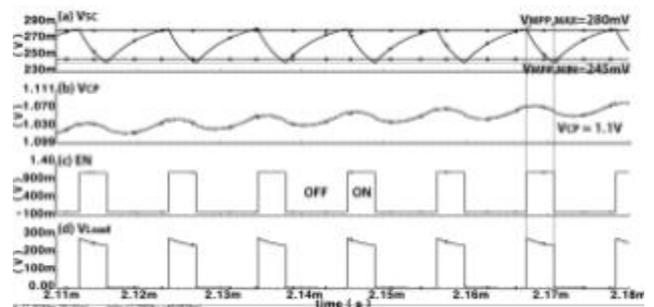


그림 10. 빛 에너지 하베스팅 회로의 전체 모의실험
Fig.10.Total simulation of solar energy harvesting circuit

그림 10은 전체 모의실험 결과이다. 첫 번째 파형은 VSC와 MPP 기준전압($V_{MPP,Max}$, $V_{MPP,Min}$)으로 VSC를 통해 PV 셀 등가모델의 V_{MPP} 인 266 mV를 기준으로 $V_{MPP,Max}$ 는 280 mV, $V_{MPP,Min}$ 는 245 mV로 동작한다. 이때 SEMC의 전원 전압으로 공급되는 VCP는 1.1 V로 출력되었고, 세 번째와 네 번째 파형

표 1. 비교기 성능요약(@1 V& Typical-Typical)

Table 1. Performance summary of Comparator (@1 V& Typical-Typical)

$V_{DD} = 1V$		$-20^{\circ}C$	$27^{\circ}C$	$80^{\circ}C$
Gain(dB)		81.9	82	82
Band Width(kHz)		48.7	45.5	41.3
UGF(MHz)		25	22.9	20.8
Hysteresis(mV)		3	3	3
ICMR(V)		0 ~ 0.4	0 ~ 0.4	0 ~ 0.45
PSRR(dB)	+	82.4	82.6	82
	-	113.8	112.3	111.9
CMRR(dB)		110	113.8	118.9
Current Consumption(nA)		567	584.8	597.5

제 파형을 통해 VSC가 VMPP,Max이 되면 ‘EN’ 신호가 ‘1’이 되어 부하로 에너지를 공급하고, VSC가 VMPP,Min이 되면 ‘EN’ 신호가 ‘0’이 되어 부하로의 에너지 공급을 차단한다.

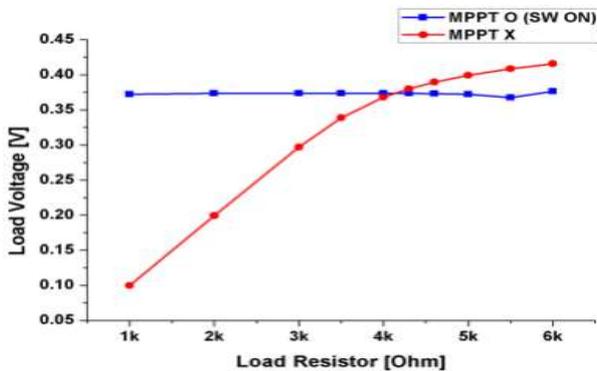


그림 11. MPPT 제어기능 유무에 따른 RLoad에 따른 부하 전압 비교

Fig. 11. Comparison of the load voltages vs RLoad as a function of MPPT control

그림 11은 SEMC 블록을 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우, 즉 MPPT 제어를 하는 경우와 하지 않는 경우에 대해 부하 저항 값을 바꿔가며 부하에 공급되는 전압을 측정한 결과이다. MPPT 제어를 적용하는 경우에는 부하 저항 값에 따라 부하에 공급되는 전압의 변화가 심하지만, MPPT 제어를 적용한 경우에는 거의 일정한 전압(MPP 근처의 전압)이 부하에 공급되는 것을 알 수 있다. 따라서 부하가 큰 경우(부하 저항이 작은 경우)에도 제한된 SEMC 블록을 사용하는 경우에는 주 PV 셀이 부하에 MPP 전압을 공급하여 부하 회로를 정상동작 시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

III. IC 제작 및 측정 결과

설계된 마이크로 빛에너지 하베스팅 회로는 0.18 μm CMOS 공정으로 제작 되었다. 그림 12는 설계된 회로의 칩 사진이며, 면적은 패드를 포함하여 1370 $\mu m \times 900 \mu m$ 이다. 그림 13은 제작된 칩의 성능을 검증하기 위해 제작한 PCB 보드와 측정환경 사진이다. 주 PV 셀과 파일럿 PV 셀은 2장에서 소개한 ‘SCPD’ 소자를 이용하였으며, 조명등을 사용하여 빛을 공급하였다. 빛의 세기는 조도계를 이용하여 측정하였으며, 조명등의 거리를 조절하여 원하는 조도를 맞추었다.

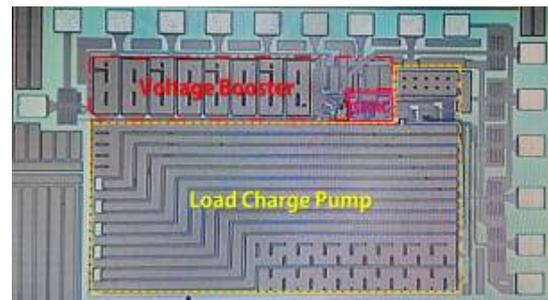


그림 12. 제작된 빛에너지 하베스팅 회로 칩 사진
Fig.12. Chip photograph of the designed micro solar energy harvesting circuit

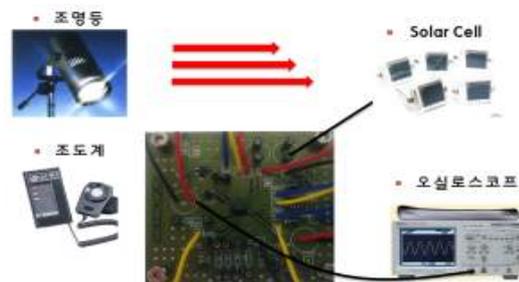
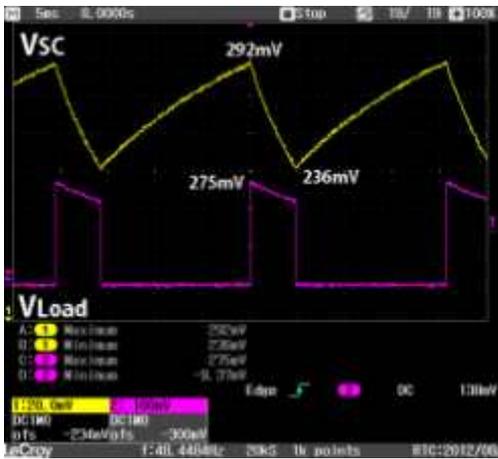
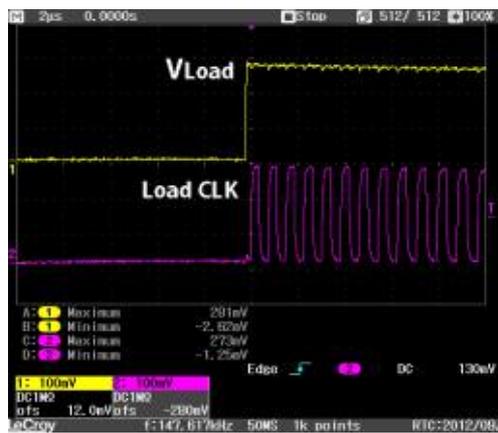


그림 13. 테스트 보드 및 측정환경
Fig.13. Test board and measurement setup

그림 14는 제작된 빛에너지 하베스팅 회로를 10 klux의 조도에서 측정한 결과이다. 그림 14의 (a)는 부하단 (VLoad)에 부하 전하펌프 대신 650 Ω의 저항이 연결되었을 때의 측정 파형이다. 측정결과 VMPP,max는 292 mV이고, VMPP,min은 236 mV이다. 따라서, 주 PV 셀의 출력 VSC가 VMPP(266 mV)의 ±11% 이내에서 MPPT 제어되는 것을 확인할 수 있다. 방전 단계 (전력 스위치가 on되었을 때)에서는 주 PV 셀로부터 수확된 전력이 부하 저항으로 공급되는 것을 VLoad 파형에서 확인할 수 있다. 그림 14의 (b)는 부하단 (VLoad)에 부하 전하펌프가 연결되었을 때의 측정 파형이다. 부하 전하펌프의 링 발진기가 부하에 전력이 공급되는 방전 단계에서만 동작하는 것을 확인할 수 있다. 링 발진기에서 출력되는 클럭의 초기 주파수는 1.37 MHz이다.



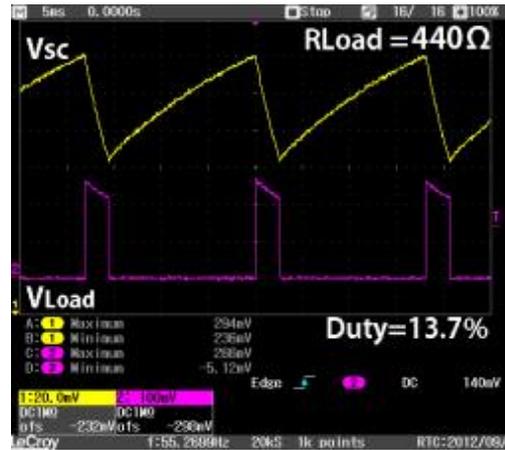
(a)



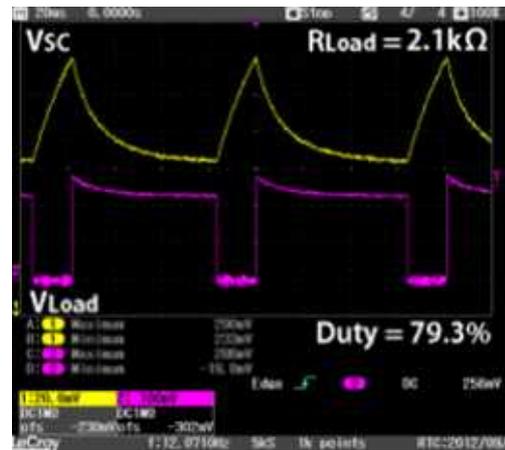
(b)

그림 14. 제작된 빛에너지 하베스팅 회로의 측정 파형 (a) VSC 와 VLoad (b) VLoad와 부하단 전하펌프 클럭
Fig.14. Experimental responses (a) VSC and VLoad (b) VLoad and load charge pump clock

그림 15는 10 klux의 빛 세기에서 부하 저항 변화에 따른 VSC와 VLoad 파형이다. 부하저항이 440 Ω과 2.1 kΩ일 때 듀티 사이클은 각각 13.7%와 79.3%이다. 부하저항이 증가하면 부하에서 소모되는 전력이 감소하기 때문에 듀티 사이클은 증가하게 된다. 측정결과 부하저항이 2.2 kΩ일 때 듀티 사이클은 100%가 된다.



(a)



(b)

그림 15. 부하저항에 따른 듀티 사이클 측정결과 (a) RLoad=443Ω (b) RLoad=2.1kΩ

Fig.15. Measured duty cycles at different load resistances (a) RLoad=443Ω (b) RLoad=2.1kΩ

그림 16은 빛의 세기가 6.7 klux에서 4.2 klux로 감소했을 때, VSC의 파형 변화를 측정한 결과이다. 빛의 세기가 감소하면 PV 셀의 개방회로 전압(VOC)도 감소한다. 따라서, MPP 전압(VMPP)도 감소하며, 이에 비례하여 MPP 기준전압인 VMPP,max와 VMPP,min도 함께 감소하게 된다. 이 측정결과로부터 설계된 회로는 빛의 세기 변화에 따른 MPP 전압 변화를 실시간

추적하고 있음을 확인할 수 있다.

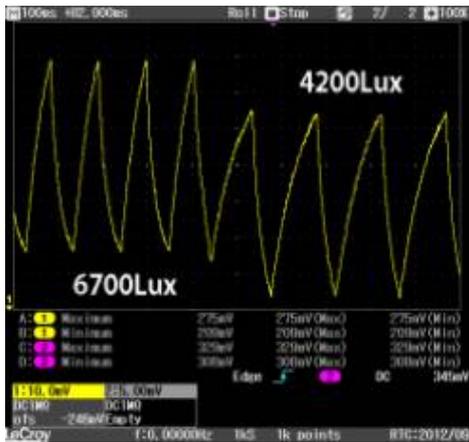


그림 16. 빛의 세기 변화에 따른 MPPT 제어 과정
Fig.16. MPPT control process with the variation of light intensity

그림 17은 빛의 세기에 따른 KOP 변화를 측정된 결과이다. MPPT 제어를 적용한 경우, 측정된 KOP 값의 범위는 0.7~0.8이며, 이는 KMPP가 0.75이므로 MPP 전압 범위 안에 포함된다. 따라서 설계된 회로는 다양한 빛의 세기에서 MPP 범위내의 전력을 부하로 공급하는 것을 알 수 있다. MPPT 제어를 적용하지 않은 경우에는 측정된 KOP 값의 범위는 0.5~0.75이다. 이는 빛의 세기 범위의 상당부분(특히 낮은 빛의 세기)에서 MPP 범위를 벗어나는 것을 알 수 있다.

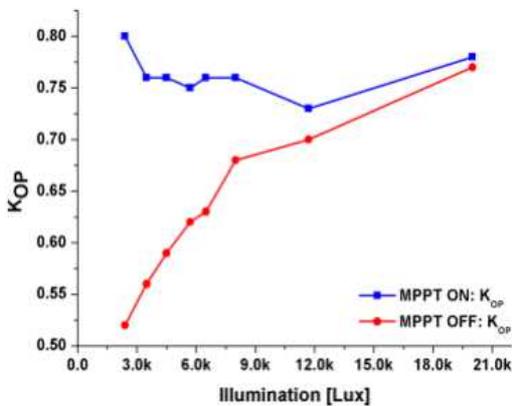


그림 17. 빛의 세기에 따른 KOP 변화
Fig.17. KOP versus light intensity

그림 18은 부하 저항에 따른 주 PV 셀의 출력 동작전압(VOP)을 측정된 결과이다. MPPT 제어를 적용한 경우에 측정된 VOP 값의 범위는 240 mV~260 mV로 안정적인 특성을 보인다. 특히, 듀티 사이클이

100%가 되는 부하저항 값인 2.2 kΩ보다 작은 부하저항 범위에서는 VOP 값이 260 mV로 거의 일정한 특성을 보인다. MPPT 제어를 적용하지 않은 경우에는 부하에 따라 VOP 값의 변화가 0~250 mV로 매우 크다. 특히, 부하저항이 작을 때(부하가 클 때) VOP 값은 매우 작아지며, 따라서 부하 단 구동이 더욱 어려워진다.

부하저항 변화에 따른 부하에 공급되는 전력을 그림 19에 보였다. MPPT 제어를 적용한 경우가 적용하지 않은 경우에 비해 더 많은 전력이 부하에 공급되는 것을 확인할 수 있다. 특히, 부하저항이 작은 경우 MPPT 제어의 효과가 더 큰 것을 알 수 있다. 측정된 최대 부하 전력은 2.1 kΩ 부하에서 25.7 uW이다.

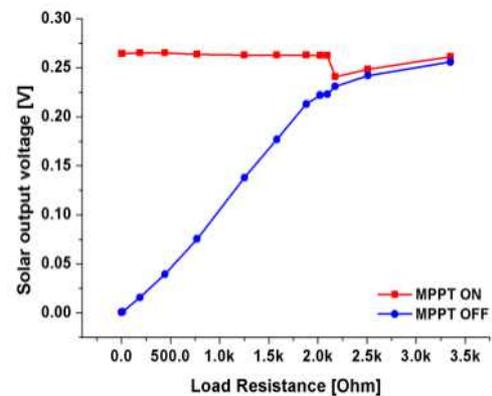


그림 18. 부하 저항에 따른 PV 셀의 동작전압 (VOP)
Fig.18. VOP versus load resistances

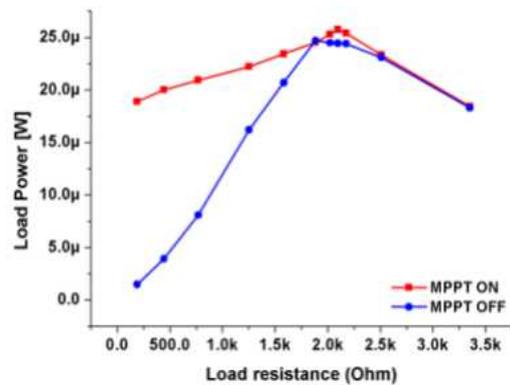


그림 19. 부하저항에 따른 부하 전력
Fig.19. Load power versus load resistances

그림 20은 MPPT 제어를 적용한 경우의 전력효율 그래프이다. 전력효율은 부하에 전달된 전력과 주 PV 셀의 최대가용전력의 비로 계산하였다. 측정된 전력효율의 최대 값은 78%이다. MPPT 동작이 이루어지는 범위 (즉 듀티 사이클이 100% 미만인 경우)에서 부하저항이 작아질

수록(즉 부하가 커질수록) 부하에 공급되는 전력이 다소 감소하며, 따라서 전력효율도 감소한다. 이는 부하저항이 작아질수록 전력스위치의 on 저항이 상대적으로 커져서 전력스위치에서의 전압 강하가 커지기 때문이다. 이 문제를 개선하기 위해서는 전력스위치의 크기를 키워서 on 저항을 더욱 줄일 필요가 있다.

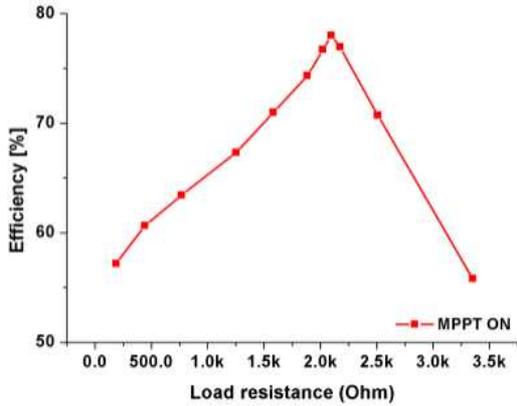


그림 20. MPPT가 적용 되었을 때의 전력 효율
Fig.20. Power efficiency when MPPT is on

표 2에 최근에 발표된 마이크로 빛에너지 하베스팅 시스템들과 본 논문에서 제안된 회로를 비교하였다. 참고문헌 [7]에서 제안된 방법은 제어회로 시동을 위해 미리 충전된 배터리가 필요하기 때문에 배터리를 사용하지 않는 자가발전 시스템에는 적합하지 않다. 참고문헌 [8]은 ISC를 이용하여 빛에너지 하베스팅을 하지만 MPPT가 적용되지 않았고, 제어 회로를 복합 프로그래머블 논리 소자로 구현하여 전체 시스템의 사이즈와 전력소모가 증가하므로 초소형 시스템에 적합하지 않다. 참고문헌 [6]에서는 ISC를 사용하여 FOC 방법을 구현하였으나 제어회로 구동을 위해 p-diff/n-well 다이오드의 직렬연결을 사용하였기 때문에 기생다이오드에서 발생하는 누설전류가 문제가 될 수 있다. 또한 이들 방법들은 칩 구현 결과는 없으며, 모의실험 결과만 제시하고 있다. 제안된 회로는 제어회로 구동을 위해 미리 충전된 배터리가 필요하지 않기 때문에 배터리를 사용하지 않는 초소형 자가발전 시스템에 적합하다.

표 2. 마이크로 빛에너지 하베스팅 시스템 비교

Table 2. Comparison of micro-scale solar energy harvesting systems

	[6]	[7]	[8]	This work
PV cell type (Size)	ISC (N/A)	using an open source verilog-A model	single cell (0.01 cm ²)	single cell (0.14 cm ²)
PV cell open voltage Voc (V)	< 0.5	< 0.7	< 0.55	< 0.5
MPPT Scheme	FOC	Relationship between the PV voltage and the switching frequency of the charge pump	N/A	FOC & pilot cell(0.07 cm ²)
Controller power source	Auxiliary 4 diodes in series (1.6 V)	Rechargeable battery (1.5 V)	using complex programmable logic device	Main PV cell (<0.5 V)
Max. Efficiency(%)	N/A	97	59	78 (w/o load charge pump)
Verification	Simulation	Simulation	Measurement	Measurement
Process(nm)	500	65	500	180
Year	2010	2013	2014	2013

V. 결 론

본 논문에서는 센서노드와 같은 초소형 자가발전 시스템을 위한 마이크로 빛에너지 하베스팅 시스템을 제안하였다. FOC 방법을 이용하여 MPPT 제어 기능을 구현하였으며, 파일럿 PV 셀을 이용하여 주 PV 셀의 개방회로 전압을 간단히 예측하였다. MPPT 제어회로의 구동은 간단한 승압회로를 사용하여 주 PV 셀의 출력 전압을 승압하여 사용하기 때문에 미리 충전된 배터리는 필요하지 않다. 제안된 회로는 0.18 μm CMOS 공정으로 설계되었으며, 칩 면적은 부하단 전하펌프와 패드를 포함하여 900 $\mu\text{m} \times 1370 \mu\text{m}$ 이다. 제작된 칩을 측정된 결과 설계된 회로는 빛 세기의 변화에 따른 MPP 전압 변화를 실시간 트래킹한다. 기존의 마이크로 빛에너지 하베스팅 회로에 비해 제안된 회로는 제어회로 구동을 위해 미리 충전된 배터리가 필요하지 않기 때문에 배터리를 사용하지 않는 초소형 자가발전 시스템에 적합하다. 본 논문에서 설계된 마이크로 빛에너지 하베스팅 회로는 매우 작은 크기로 구현가능하기 때문에 듀티 사이클이 비교적 낮은 환경 모니터링 분야의 자가발전 센서노드에 활용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2014046387). IDEC 지원에 의해서도 일부 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] D. Dondi, A. Bertacchini, L. Larcher, P. Pavan, D. Brunelli, and L. Benini, "A solar energy harvesting circuit for low power applications," IEEE ICSET, pp. 945-949 (2008)
 [2] H. Shao, C. Tsui, and W. Ki, "The Design of a Micro Power Management System for Applications Using Photovoltaic Cells With the Maximum Output Power Control," IEEE Trans. on VLSI Systems, vol.17, no.8, pp. 1138-1142 (2009)
 [3] I. Doms, P. Merken, C. Van Hoof, and R. P. Mertens, "Capacitive Power Management Circuit for Micropower Thermoelectric Generators With a 1.4 μA Controller," IEEE

JSSC, vol. 44, no. 10, pp. 2824-2833 (2009)
 [4] C. Lu, V. Raghunathan, and K. Roy, "Maximum Power Point Considerations in Micro-Scale Solar Energy Harvesting Systems," ISCAS, pp. 273-276 (2010)
 [5] D. Dondi, A. Bertacchini, D. Brunelli, L. Larcher, and L. Benini, "Modeling and optimization of a solar energy harvester system for self-powered wireless sensor networks," IEEE Trans. on Industrial Electronics, pp. 2759-2766 (2008)
 [6] E. Méndez-Delgado, G. Serranoy and E. I. Ortiz-Rivera, "Monolithic integrated solar energy harvesting system," 35th IEEE PVSC, pp. 2833-2838 (2010)
 [7] A. Eltaliawy, H. Mostafa, Y. Ismail, "Microscale Solar Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks Based on Exponential Maximum Power Locking Technique," 2013 IEEE 20th International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS), pp.889-892, 2013.
 [8] S. Ghosh, H. T. Wang, W. D. Leon-Salas, "A Circuit for Energy Harvesting Using On-Chip Solar Cells," IEEE Transactions on Power Electronics, pp.4658-4671, 2014.
 [9] C. Hua et al., "Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 45, pp. 99-107 (1998)
 [10] W. Wu et al., "DSP-Based multiple peak power tracking for expandable power system," in Proc. Applied Power Electronics Conf. and Exposition 2003, vol. 1, pp. 525-530 (2003)
 [11] C. Hua and C. Shen, "Control of DC/DC converters for solar energy system with maximum power tracking," 23rd IECON, vol.2, pp. 827-832 (1997)
 [12] <http://www.solarbotics.com>



윤 은 정
 2011년 인천대학교 전자공학과
 학사 졸업
 2013년 인천대학교 전자공학과
 석사 졸업
 2013년~현재 인천대학교 전자
 공학과 박사과정 재학 중
 <주관심분야 : Energy Harvesting,
 DC-DC Converter>



양민재

2014년 인천대학교 전자공학과
학사 졸업

2014년~현재 인천대학교 전자공
학과 석사과정 재학 중

<관심분야 : Energy Harvesting,
DC-DC Converter>



유종근

1985년 연세대학교 전자공학과
학사 졸업

1987년 연세대학교 전자공학과
석사 졸업

1993년 Iowa State University
전기 및 컴퓨터공학과
박사 졸업

2009년 ~ 2010년 UC Davis
방문교수

1994년 ~ 현재 : 인천대학교 전자공학과 교수

<주관심분야 : CMOS Analog/Mixed-mode IC 설계,
RFIC 설계>