

# 빛 에너지 수확을 이용한 센서 노드 회로

서동현 · 조용민 · 우대건 · 윤은정 · 유종근

인천대학교

## Sensor Node Circuit with Solar Energy Harvesting

Dong-hyeon Seo · Yong-min Jo · Dae-keon Woo · Eun-jung Yoon · Chong-gun Yu

Incheon National University

E-mail : dozegod@nate.com

### 요 약

본 논문에서는 빛 에너지 하베스팅을 이용한 센서 노드 회로를 제안한다. 솔라셀에서 변환된 에너지는 PMU(Power Management Unit)를 통해 관리되고, 일정한 전압을 공급하기 위해 LDO(Low Drop Out Regulator)를 사용한다. LDO를 통해 공급된 전압으로 온도센서와 SAR ADC(Successive Approximate Register Analog-to-Digital Converter)를 구동시킨다. 이 회로는 0.35um CMOS 공정으로 설계되었다.

### ABSTRACT

In this paper, a sensor node circuit using solar energy harvesting is proposed. PMU(Power Management Unit) manages the energy converted from a solar cell. In order to supply a constant voltage to the sensor node, an LDO (Low Drop Out Regulator) is used. The LDO drives a temperature sensor and a SAR ADC(Successive Approximate Register Analog-to-Digital Converter). The circuit has been designed in 0.35um CMOS process.

### 키워드

Sensor Node, Energy Harvesting, Power Management Unit, Temperature Sensor, SAR ADC

## 1. 서 론

모든 전자기기는 가동을 위해서 외부 전력 공급을 필요로 한다. 센서 회로 역시 외부 전력이 필요하다. 센서는 물리적인 현상을 관측하기 때문에 필요한 장소에 오랫동안 작동해야 한다. 따라서 유선 전력 공급을 하던지, 큰 용량의 배터리를 사용해야 한다. 하지만, 센서 회로 특성상 유선으로 전력을 공급하지 못하는 장소에 설치될 가능성이 있고, 배터리를 교체하기 힘든 위치에 설치되는 경우도 있다. 교체가 가능한 장소라 하더라도 유지보수를 위한 비용이 지속적으로 사용될 수밖에 없다. 이러한 문제점의 해결책으로 에너지 하베스팅 기술이 사용된다.

배터리와 비교하면, 에너지 하베스팅 기술은 유지보수를 할 필요성이 거의 없기 때문에 비용을

절감 할 수 있는 이점이 있다. 더구나 배터리나 축전기는 환경을 오염시키고 사람의 건강에 위협한 화학 물질과 금속을 포함하고 있기 때문에 이런 것들의 폐기는 엄격히 규제되고 있다. 따라서 에너지 하베스팅 기술은 이런 환경 유해 물질의 폐기 문제를 극복할 수 있기 때문에 환경 보호라는 관점에서 큰 장점이 될 수 있다.[1~2]

에너지 하베스팅 기술의 문제점 중 하나는 많은 전기에너지를 얻을 수 없다는 것이다. 에너지 하베스팅 기술은 주변에서 버려지는 에너지를 수확하여 그 에너지를 전기에너지로 변환하여 사용하는 기술이므로 많은 전기 에너지를 생산하기는 어렵다. 그러나, 최근 전자 기기는 소형화 되고 있고, 저 전력 설계를 지향하고 있다. 따라서, 에너지 하베스팅 기술을 이용하여 센서 회로를 작동하는 것이 가능해졌다.

본 논문에서는 온도센서 노드와 빛 에너지 하베스팅 시스템을 하나의 시스템으로 구현한다. 에너지 하베스팅 시스템의 전력관리 회로와 LDO

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0021112). IDEC 지원에 의해서도 일부 수행되었음.

를 사용하여 안정적인 전압을 온도센서 노드의 전원으로 공급한다. 온도센서 노드는 온도에 따른 PTAT 전압과 Reference 전압을 공급해서 SAR ADC를 통해 최종 디지털 신호를 출력한다.

## II. 회로 설계

### 1. Sensor node

본 논문에서는 솔라 에너지를 에너지원으로 사용하여 외부 전원 없이 온도센서 노드를 구동하는 것을 목표로 한다. Solar cell이 빛 에너지를 전기에너지로 변환하고 저장 커패시터(Csto)에 저장하여 센서 노드로 전원을 공급한다. 센서 노드는 PMU(Power Management Unit), LDO(Low Drop Out), 온도센서, SAR ADC로 구성되어 있다. 먼저 solar cell의 최대전력전압 Vmpp를 유지하기 위해 Vmax와 Vmin 전압을 PMU가 감지하여 Vmax가 되면 LDO를 통해 정전압을 센서노드에 전압을 공급한다. 다시 Vmin이 되면 공급을 차단하고 Csto에 충전한다. 온도센서는 온도를 측정하고 측정된 신호를 SAR ADC가 10bit의 디지털 신호로 변환하여 출력한다. 그림 1은 센서 노드의 전체 블록도이다.

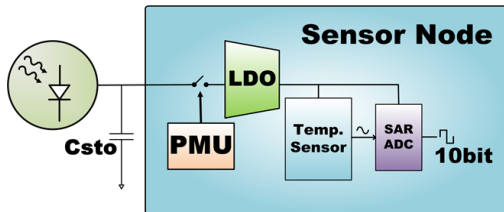


그림 1. Sensor Node의 블록도

### 2. Solar Cell

본 논문에서 사용 될 solar cell은 "SCC2422"[3]을 사용한다. 이 소자는 표 1과 같이 빛의 밝기에 따라서 출력특성이 달라진다. 본 논문에서는 10klux이상에서의 Vmpp를 기준으로 PMU가 1.9~2.1V를 유지하여 센서 노드에 공급하도록 설계하였다.

표 1. 빛의 밝기에 따른 "SCC2422" 모델의 특성

	528mm <sup>2</sup>	5klux	10klux	25klux	40klux
Voc(V)		2	2.45	2.87	3.03
Isc(mA)		0.31	0.7	1.6	3.13
V <sub>MPP</sub> (V)		1.29	1.9	1.98	2.13
P <sub>MPP</sub> (uW)		297	925	2610	4540
K <sub>MPP</sub>		0.65	0.77	0.69	0.7

### 3. PMU & LDO

설계된 PMU와 LDO의 블록도를 그림 2와 3에 나타내었다. Csto에 충전된 전압 Vsto가 2.1V가 되었을 경우 PMU는 Vmax를 감지하여 PMOS 스위치에 'on' 신호를 입력하여 Vsto가 센서노드로

공급된다. Vsto가 방전되어 PMU가 Vmin을 감지하면 PMOS 스위치에 'off' 신호를 입력하여 전원공급을 차단한다. 그 후 다시 Csto에 충전하고 Vmax가 되면 다시 공급한다. 이 동작을 반복하여 1.9~2.1V의 전압을 유지하며 2.1V에서 1.9V로 방전하는 동안만 센서 노드가 동작한다.

LDO는 센서 노드로 공급되는 전압을 1.8V로 안정화하여 공급전압에 의해 발생하는 에러를 감소한다. 따라서 온도 측정의 정확도를 높여 더욱 정확하고 안정된 동작을 하도록 한다. LDO 설계시 voltage buffer를 추가하여 system의 안정도를 높였다.

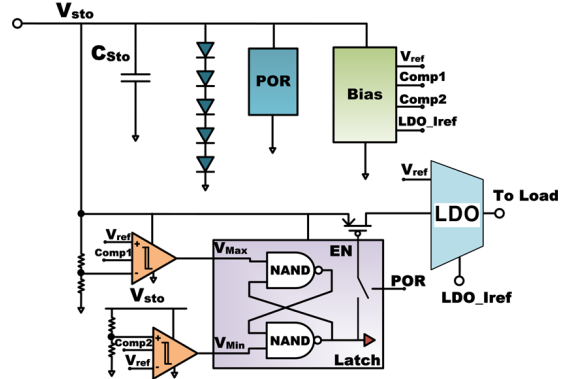


그림 2. PMU의 블록도

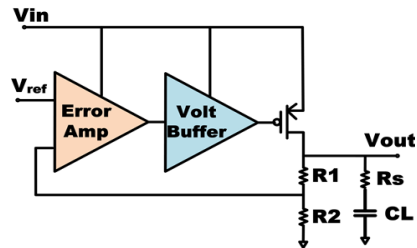


그림 3. LDO의 블록도

### 4. 온도센서 회로

온도센서 회로는 온도에 따라 변하는 아날로그 전압을 SAR ADC로 공급한다. 이 회로는 BGR(Bandgap Reference) 회로와 온도에 비례하는 PTAT(Proportional To Absolute Temperature) 회로로 구성된다. 1.8V의 공급전원으로 작동한다.

#### 4.1 BGR 회로

BGR은 SAR ADC 동작에 필요한 기준 전압들을 출력한다. -50℃~100℃범위에 해당하고 온도 센싱을 목표로 1.2V, 900mV 그리고 600mV를 출력하도록 설계하였다. 그림 4는 BGR의 회로이다.[4] 양쪽 BJT의 이미터 면적 비는 1:8로 설계하였다. Start-up 회로를 첨가하여 회로가 off되는 것을 방지하였다.

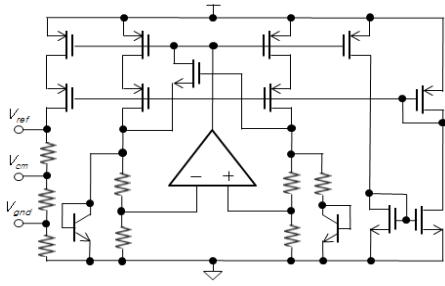


그림 4. BGR 회로

#### 4.2 PTAT 전압 발생 회로

절대온도에 비례하는 PTAT 전압은 온도에 대한 정보를 담고 있는 전압원이다.  $-50^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위에 따른 전압이 SAR ADC로 입력되고 BGR의 세 개의 출력전압과 비교를 통해 현재의 온도를 측정한다. 그림 5는 PTAT 전압 발생 회로이다. 이 회로 또한 start-up 회로를 포함하며, 이득이 높은 증폭기를 사용하여 BJT 양단의 전압이 같도록 설계하였다. 또한, 이미터 면적 비를 1:8로 했다.

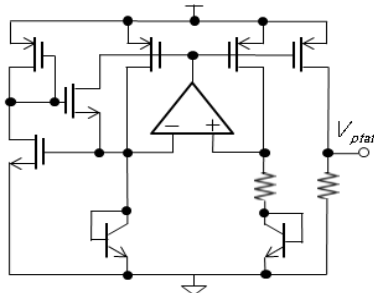


그림 5. PTAT 전압 발생 회로

#### 5. SAR(Successive Approximate Register) ADC

본 논문에서 설계한 ADC(Analog-to-digital Converter)는 연속 근사 레지스터를 이용한 ADC이다. 그림 6은 SAR ADC의 블록 다이어그램을 나타낸 것이다. SAR ADC는 Capacitor Array, 비교기, SAR Logic으로 구성되어 있다. 동작 전압은 1.8V이고, 10bit의 resolution을 가진다.

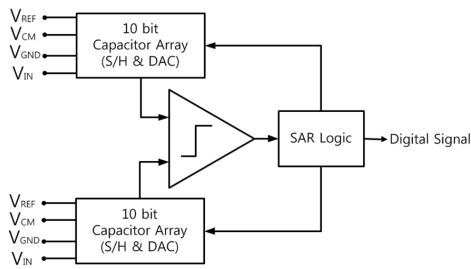


그림 6. SAR ADC 블록도

#### 5.1 SAR Logic

그림7은 SAR Logic이다. SAR Logic은 위 D flip-flop의 Shift register와 아래 D flip-flop의

Control logic으로 구성되어 있다. 샘플링 구간에 Set(샘플링) 전압이 0V가 되면 샘플링을 시작하고, Set 전압이 1.8V가 되면 순차적으로 MSB부터 디지털 신호를 출력한다.

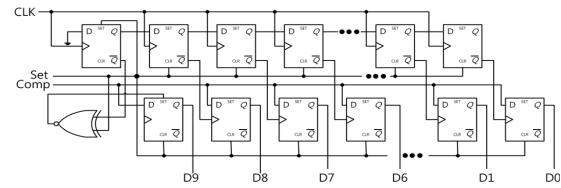


그림 7. SAR Logic

#### 5.2 비교기

사용된 비교기는 two-stage latched 비교기[5]이다. 단순한 SR latched 비교기를 사용하게 되면 입력단의 대용량 커패시터로 인해 고속 동작을 할 수 없게 된다. 따라서 첫 단계 증폭단을 거쳐 latched 비교기에 들어가도록 설계하여 입력단의 대용량 커패시터와는 직접적으로 연결되지 않아 고속 동작을 가능하게 해준다.

### III. 모의실험 결과 및 레이아웃

#### 1. PMU & LDO 모의실험

모의실험에 사용된 solar cell의 등가회로는 2.45V의 Voc, 1.9V의 Vmpp를 출력한다. 그림 8은 PMU와 LDO의 출력 파형이다. 초기에 Csto에 충분한 전압이 충전될 때까지 PMU, LDO 및 센서 노드를 동작 시키지 않는다. 따라서 Csto의 충전 시간을 단축시킨다. 그림 8과 같이 POR이 동작하기 전까지 BGR을 제외하고 모든 블록이 동작하지 않는다. Vref는 Vsto와 관계없이 762mV를 출력한다. Vsto의 전압은 Csto에 충전된 전압이며 1.91~2.12V의 출력을 유지한다. Vsto가 2.12V가 되면 EN 신호가 '0'이 되어 PMOS 스위치가 'on'되고 Csto가 방전하면서 LDO를 통해 센서 노드로 전원을 공급한다. LDO의 출력은 약 1.8V의 전압을 출력한다. Csto가 방전하여 Vsto가 1.91V가 되면 EN 신호가 '1'이 되어 PMOS스위치가 'off'되고 LDO의 출력이 0V이다.

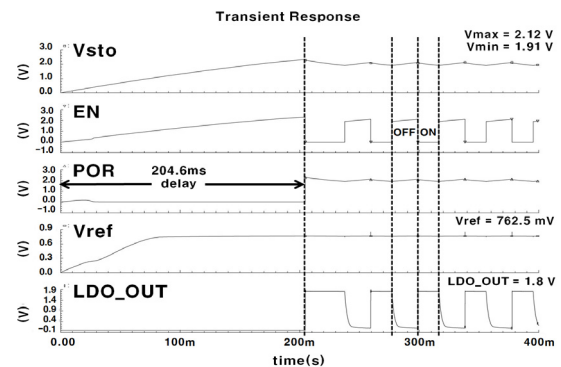


그림 8. PMU and LDO 모의실험

## IV. 결 론

### 2. 온도센서 회로 모의실험

그림 9는 BGR 회로의 출력 결과이다.  $V_{gnd}$ ,  $V_{cm}$ ,  $V_{ref}$ 는 각각 600.528mV, 900.87mV, 1.20126V이다. 세 출력 모두 약 31ppm/°C의 온도 특성을 나타냈다. 전류 소모는 2.631uA이다.

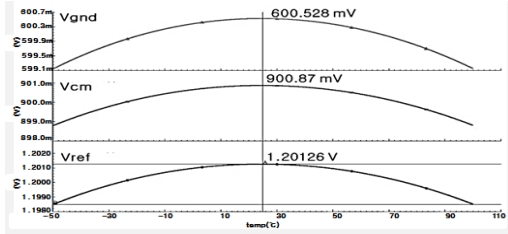


그림 9. BGR 전압의 온도에 따른 출력 파형

그림 10은 PTAT 전압 발생 회로의 출력 파형이다. -50°C 일 때의 전압은 685mV이고 100°C 일 때는 1.14V로 양단의 전압 차이는 455mV이다. 1.8V의 공급전원에서 5.627uA의 전류가 소모 된다.

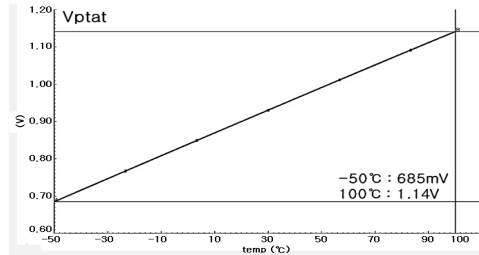


그림 10. PTAT 전압의 온도에 따른 출력 파형

### 3. Sensor Node

그림 11은 PTAT 온도 특성에 따른 전압 그래프와 SAR ADC에서 출력 된 디지털 신호를 변환 한 전압의 차이를 나타낸 것이다. 최대 전압 차이는 9mV이다.

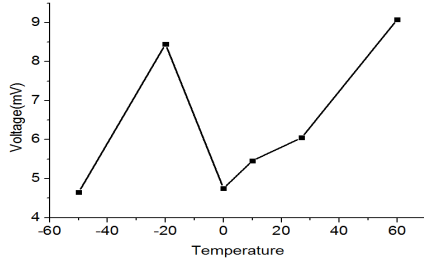


그림 11. 온도센서 전압과 SAR ADC 전압 차이

### 4. 레이아웃

그림 12는 PAD를 포함한 빛 에너지 하베스팅을 이용한 온도센서 노드의 레이아웃 사진이다. 크기는 1.2mm X 1.1mm이다.

본 논문에서는 Solar Cell을 이용한 자가 충전 을 통해 온도센서 노드를 동작시키는 회로를 설계하였다. 모의실험 결과 10klux에서 Solar Cell로부터 수확된 에너지는 PMU에 의해 1.9~2.1V 전압으로 유지되며, LDO는 이를 1.8V로 안정화 하여 센서노드에 공급한다. 온도센서 회로는 -50°C~100°C 사이의 온도를 측정하고, 측정된 온도는 SAR ADC를 통해 10bit의 디지털 신호로 출력된다. 온도 센서의 에러는 1.48°C~2.68°C로 측정 되었다.

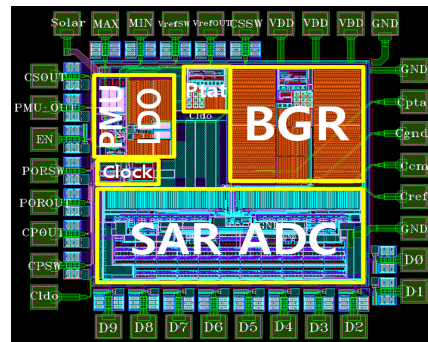


그림 12. 전체 회로 레이아웃

## 참고문헌

- [1] D. Dondi, et al,, "A solar energy harvesting circuit for low power applications," IEEE ICSET, pp. 945-949, 2008.
- [2] J. Colomer-Farrarons, et al,, "Power-Conditioning Circuitry for a Self-Powered System Based on Micro PZT Generators in a 0.13µm Low-Voltage Low-Power Technology," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 55, no. 9, pp. 3249-3257, September 2008.
- [3] <http://www.solarbotics.com>
- [4] Ka Nang Leung and Philip K.T.Mok "A Sub-1-V 15-ppm/°C CMOS Bandgap Voltage Reference Without Requiring Low Threshold Voltage Device" J. Solid-State Circuits, vol.37 ,pp. 1-2, April. 2002
- [5] Raheleh Hedayati, A Study of Successive Approximation Registers and Implementation of an Ultra-Low Power 10-bit SAR ADC in 65nm CMOS Technology, Elextronic Devices, pp.52-54, 2011