
MPPT 제어 기능을 갖는 열에너지 하베스팅 회로 설계

윤은정* · 김수진* · 박금영* · 오원석** · 유종근***

Design of a Thermal Energy Harvesting Circuit with MPPT Control

Eun-jung Yoon* · Su-jin Kim* · Kum-young Park* · Won-seok Oh** · Chong-gun Yu***

본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0021112). IDEC 지원에 의해서도 일부 수행되었음.

요 약

본 논문에서는 MPPT 제어 기능을 갖는 열에너지 하베스팅 회로를 설계하였다. MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어는 열전소자의 개방회로전압과 MPP 전압간의 관계를 이용하였으며 열전소자의 개방회로전압을 주기적으로 샘플링 함으로써 이를 이용해 MPPT 기준전압을 생성하여 이를 기준으로 부하로의 에너지 공급을 제어한다. 모의실험 결과 94%의 최대 전력 효율을 보였다. 제안된 열에너지 하베스팅 회로는 0.35 μ m CMOS 공정으로 설계하였으며 설계된 칩 면적은 PAD를 제외하고 1168.7 μ m \times 541.3 μ m이다.

ABSTRACT

In this paper, a thermal energy harvesting circuit with MPPT control is designed. MPPT(Maximum Power Point Tracking) control function is implemented using the linear relationship between the open-circuit voltage of a thermoelectric generator(TEG) and its MPP voltage. The designed MPPT control circuit traces the maximum power point by periodically sampling the open circuit voltage of a TEG, makes the reference voltages using sampled voltage and delivers the maximum available power to load. Simulation results show that the maximum power efficiency of the designed circuit is 94%. The proposed thermal energy harvesting circuit is designed with 0.35 μ m CMOS process, and the chip area except PAD is 1168.7 μ m \times 541.3 μ m.

키워드

열에너지, 에너지 하베스팅, 열전소자, MPPT

Key word

Thermal energy, Energy harvesting, Thermoelectric generator, MPPT

* 준회원 : 인천대학교 전자공학과
** 정회원 : 전자부품연구원 SoC연구센터
*** 종신회원 : 인천대학교 전자공학과 (교신저자, chong@incheon.ac.kr)

접수일자 : 2012. 10. 05
심사완료일자 : 2012. 10. 25

I. 서 론

주변 기기의 소형화와 Wireless Sensor Networks (WSN) 및 Body Area Networks (BAN)이 점점 중요해지고 있는 요즘 여전히 이들의 유한한 배터리 수명에 의한 전력공급이 문제가 되고 있다. 긴 시간에 걸쳐 작동해야 하는 장치에 주기적으로 배터리를 교체 또는 충전을 해야 하는 것은 많은 비용과 시간이 들기 때문에 비효율적이다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 기술이 에너지 하베스팅(energy harvesting)이다. 에너지 하베스팅이란 빛, 열, 진동 등 주변의 버려지는 에너지를 다시 채 수확하여 전기에너지로 변환하여 사용하는 기술로 친환경이 대두되고 있는 요즘 더욱 주목받고 있다.[1~3].

여러 에너지들 중에서 열에너지는 주변에서 발생하는 에너지들 중 하위 에너지로써 에너지 손실 대부분이 열에너지로 나타나고 있으며 우리 주변에서 항상 발생하고 있지만 대부분이 활용되지 못하고 버려지고 있다. 하지만 이러한 열에너지의 생각을 조금만 바꾼다면 충분한 활용성과 장점들을 가지고 있으며, 전력공급이 가능한 에너지원으로써 생각한다면 무한한 가치를 가지고 있다. 예를 들어 사람이나 동물의 체온과 대기온도와의 차이는 지속적으로 일정하게 유지되므로 이들 온도의 차이를 이용한 열에너지 하베스팅을 하면 지속적인 전력을 얻을 수 있다.

이러한 열에너지를 하베스팅 하기 위해서는 열전효과를 이용한 열전소자가 필요하다. 열전효과는 톨먼효과, 펠티에 효과, 제베크 효과가 있으나 이 중 제베크 효과를 이용하여 열에너지를 직접 전기에너지로 변환한다. 이때 열전소자는 최대 가용 전력을 출력하는 MPP(Maximum Power Point)가 존재한다.

기존에 에너지 하베스팅 시스템에서는 최대 가용 전력을 에너지원으로부터 획득하기 위해 주로 복잡한 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 알고리즘(ex: hill climbing algorithm)을 마이크로컨트롤러나 DSP를 사용하여 구현하고 있다[4~6]. 그러나 이러한 방법은 많은 비용과 전력이 요구되기 때문에, 본 설계의 응용분야인 초소형 센서노드에는 적합하지 않다. 최근에 DSP를 사용하지 않고 비교적 간단한 회로 기술로 MPPT 컨트롤을 구현하려는 연구가 시도되고 있다[1],[7].

본 논문에서 MPPT 제어 기능을 갖는 열에너지 하베

스팅 회로를 제안하고 0.35um CMOS 공정으로 설계하였다. MPPT 제어기능은 열전소자의 개방회로전압과 MPP에서의 전압간의 비례관계를 이용하여 간단히 구현하였다.

II. 회로 설계

2.1. 제안된 열에너지 하베스터 구조

그림 1은 본 논문에서 제안하는 MPPT 제어기능을 갖는 열에너지 하베스팅 회로의 블록도이다. 설계된 회로는 열전소자, TEMC(Thermal Energy MPPT Control unit) 등으로 구성되어 있다. 열전소자는 열에너지를 전기에너지로 변환하는 역할을 하고, TEMC는 열전소자의 출력전압이 MPP 근처에서 동작하도록 하는 MPPT 제어기능을 하며, TEMC에 의해 생성된 MPPT 기준전압들을 통해 'EN' 신호를 출력하여 열전소자로부터 수확된 에너지를 부하(load)로 공급하는 역할을 한다.

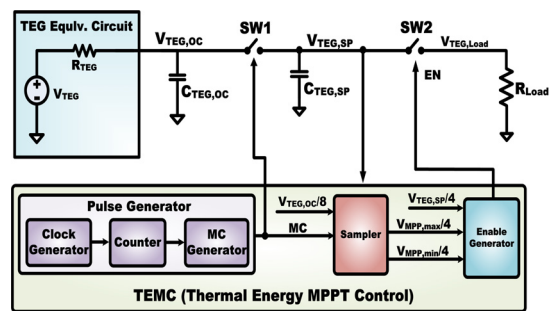


그림 1. 제안된 열에너지 하베스터의 블록 다이어그램
Fig. 1 Block diagram of the thermal energy harvester

2.2. 열전소자

열전소자(Thermoelectric generator)는 열에너지를 전기에너지로 변환하는 에너지 변환기로써 두 개의 서로 다른 금속 접합부의 온도차에 의해 기전력이 발생하는 제베크 효과(Seebeck effect)를 이용하여 변환한다.

일반적인 열전소자는 n과 p 타입의 열전반도체 쌍(leg pairs)이 여러 개로 구성되어있고 전기적으로는 직렬로 열적으로는 병렬로 연결되어있어 열전소자의 양면에 온도차가 발생하면 열전반도체의 캐리어들이 뜨거운

면에서 차가운 면으로 이동하여 기전력이 발생한다. 그림 2는 제베크 효과를 이용한 열전소자의 동작원리를 나타낸 그림이다.

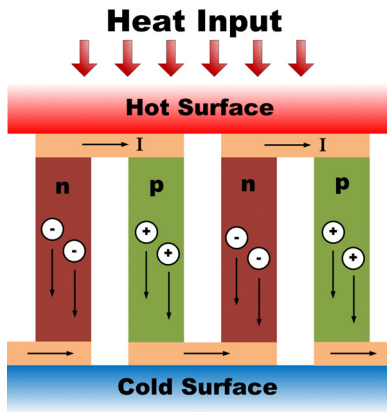


그림 2. 열전소자 동작원리
Fig. 2 Operating principle of TEG

제베크 효과에 의한 열전소자의 개방회로전압은 식 (1)과 같다[9]. α 는 제베크 상수이고, $N_{Legpairs}$ 는 열전반도체 쌍의 개수를 의미하며, ΔT 는 뜨거운 면과 차가운 면의 온도차를 의미한다. 식 (1)에 의해서 열전반도체 쌍의 개수가 많고, 열전소자의 뜨거운 면과 차가운 면의 온도차가 커질수록 열전소자가 출력하는 전압의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다.

$$V_{TEG,OC} = \alpha N_{Legpairs} \Delta T \quad (1)$$

그림 3은 열전소자의 전압-전류 특성 및 전압-전력 특성이다. 열전소자는 개방회로일 때 최대 전압($V_{TEG,OC}$)을 출력하고, 단락회로일 때는 최대 전류($I_{TEG,SC}$)를 출력한다. 이때, 개방회로 전압의 절반이 되는 $1/2V_{TEG,OC}$ 지점에서 최대 가용 전력을 출력하고 이를 Maximum Power Point(MPP)라 하고 MPP에서의 전압인 $1/2V_{TEG,OC}$ 를 $V_{TEG,MPP}$ 라 한다. 본 논문에서는 식 (2)의 열전소자의 개방회로전압($V_{TEG,OC}$)과 MPP에서의 전압($V_{TEG,MPP}$)를 이용하여 MPPT Tracking(MPPT)을 한다.

$$V_{TEG,MPP} = 1/2 V_{TEG,OC} \quad (2)$$

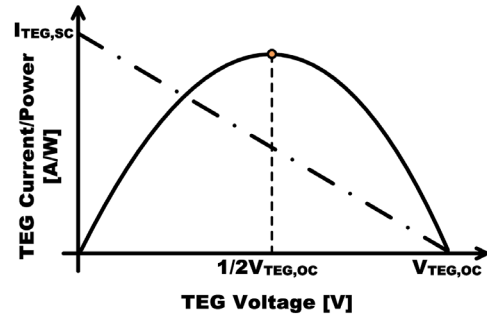


그림 3. 열전소자의 I-V, P-V 특성
Fig. 3 I-V, P-V characteristics of TEG

그림 4는 열전소자의 등가회로로 식 (1)에 의한 열전소자의 출력전압과 열전소자의 직렬 기생저항 R_s 로 구성되어있다.

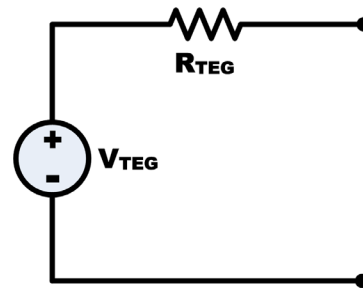


그림 4. 열전소자 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit of TEG

기존의 열에너지 하베스팅 연구에서 사용된 열전소자의 경우 참고문헌[9]에서는 bismuth telluride로 만들어진 열전소자로 90Ω의 내부저항에 60℃의 온도차에서 1V의 개방회로전압과 4uW/cm²의 전력을 출력하는 열전소자를 이용하였고, 참고문헌[12]의 경우는 MEMS 공정으로 제작된 열전소자로서 내부저항이 다른 열전소자보다 큰 값인 20kΩ~3MΩ을 갖고 사람의 체온과 공기의 온도차에 의해 1V~8V의 전압과 5~30uW/cm²의 전력을 출력하였다.

본 논문의 열에너지 하베스팅을 위해 사용된 열전소자는 MEMS 공정으로 제작된 열전소자를 이용하여 설계하며 개방회로전압은 3V이고 내부저항은 15kΩ인 등가회로를 이용하여 회로 설계를 하였다.

2.3. Thermal Energy MPPT Control unit(TEMC)

TEMC는 pulse generator, sampler, enable generator로 구성되어있다. Pulse generator는 그림 1의 SW1의 on/off 신호이자 sampler의 sample/hold 신호인 ‘MC’ 신호를 출력하는 역할을 하고, sampler는 ‘MC’ 신호에 의해 열전소자의 개방회로전압을 주기적으로 샘플링하여 이를 기반으로 MPPT 기준전압인 $V_{MPP,MAX}$ 와 $V_{MPP,MIN}$ 을 생산하여 enable generator에 공급하는 역할을 한다. Enable generator는 sampler로부터 공급받은 MPPT 기준전압을 기준으로 $V_{TEG,SP}/4$ 가 $V_{MPP,MAX}/4$ 보다 크면 부하로 전력을 공급하고 $V_{TEG,SP}/4$ 가 $V_{MPP,MIN}/4$ 보다 작아지면 부하로의 전력공급을 차단한다.

2.3.1. Pulse Generator

그림 5는 pulse generator의 블록도로 clock generator, 7-bit counter 그리고 MC generator로 구성되어있다. Pulse generator는 그림 1의 SW1의 on/off 신호이자 sampler의 sample/hold 신호인 ‘MC’ 신호를 생성하여 공급하는 역할을 한다. 열전소자의 개방회로전압 출력 여부를 결정하는 SW1의 on/off 신호와 개방회로전압을 샘플링하기 위한 sampler의 sample/hold 신호를 ‘MC’ 신호로 통일시켜 신호간의 부정합에 의해 발생할 수 있는 오차를 줄였다.

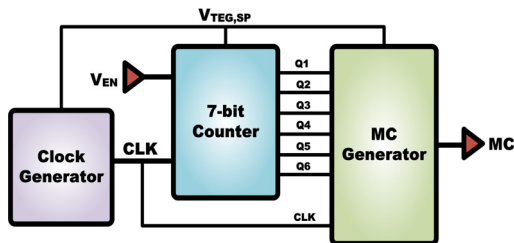


그림 5. Pulse Generator 블록도
Fig. 5 Block diagram of pulse Generator

그림 6은 clock generator로 pMOS 전류원을 연결하여 VDD 변화에 둔감한 바이어스 전류를 공급함으로써 VDD가 변화여도 일정한 주파수가 출력되는 링 발진기로 설계하였다. 모의실험 결과 100Hz의 주파수를 출력하였다.

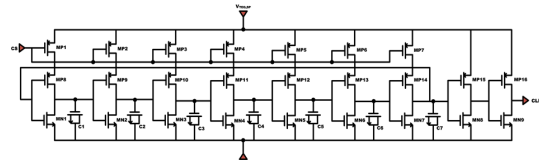


그림 6. Clock generator 회로도
Fig. 6 Schematic of clock generator

그림 7은 MC generator의 블록도로 3-input NOR 게이트와 2-input AND 게이트로 구성되어있다. 7-bit 카운터에서 출력된 Q1~Q6를 이용하여 7bit의 상위 6개 bit가 ‘0’일 때 ‘1’을 출력하고 나머지 경우에는 ‘0’을 출력하도록 ‘MC’ 신호를 생성하였다.

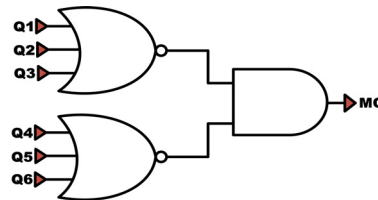


그림 7. MC generator 블록도
Fig. 7 Block diagram of MC generator

2.3.2. Sampler

그림 8은 sampler의 블록도로 ‘MC’ 신호를 통해 열전소자의 개방회로전압을 주기적으로 샘플링하여 열전소자의 개방회로전압과 V_{MPP} 간의 관계를 이용하여 MPPT 기준 전압인 $V_{MPP,MAX}/4$ 와 $V_{MPP,MIN}/4$ 를 생성한다. 이때 회로들의 원활한 동작범위를 확보하기 위해 개방회로전압의 1/8배 되는 값을 샘플링하여 본래 기준전압의 1/4배 되는 MPPT 기준전압을 생성한다.

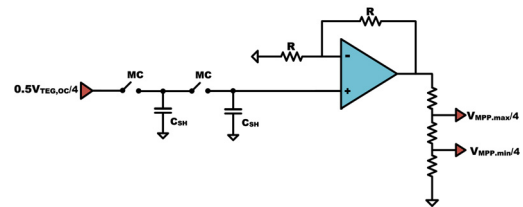


그림 8. sampler 블록도
Fig. 8 Block diagram sampler

그림 9는 sampler의 2단 증폭기로 설계된 증폭기는 2배 증폭하는 비반전 증폭기로 구성되어 샘플링된 신호를 2배 증폭하여 증폭된 신호를 저항분배기를 이용하여 $V_{MPP,MAX}$, $V_{MPP,MIN}$ 의 1/4값의 생성한다. 설계 결과 61.2dB의 이득과 716Hz의 대역폭 및 60°의 PM을 갖도록 설계되었다.

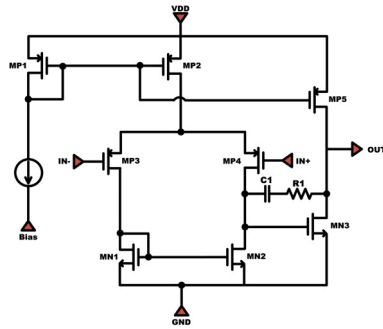


그림 9. 2단 증폭기 회로도
Fig. 9 Schematic of 2-stage amplifier

2.3.3. Enable generator

그림 10은 enable generator의 블록도로 부하로의 전력 공급을 결정하는 ‘EN’ 신호를 출력하는 역할을 한다. 구성은 두 개의 비교기와 latch로 구성되어 있다. 두 개의 비교기 중 하나는 $V_{MPP,max}/4$ 를 감지하는 역할을 하며 그림 1의 $V_{TEG,SP}$ 의 1/4값이 반전 입력으로 들어가고 비반전 입력에는 sampler로부터 출력된 $V_{MPP,max}/4$ 의 기준전압이 입력된다. 나머지 하나의 비교기는 $V_{MPP,min}/4$ 를 감지하고 이 신호는 앞의 비교기와는 반대로 반전입력으로 들어가며 $V_{TEG,SP}$ 의 1/4값이 비반전 입력으로 들어간다.

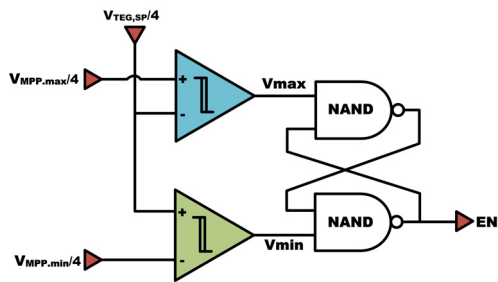


그림 10. Enable generator 블록도
Fig. 10 Block diagram of enable generator

$V_{TEG,SP}$ 는 MPPT 기준전압인 $V_{MPP,max}/4$, $V_{MPP,min}/4$ 와 전압 수준을 맞추기 위해 저항분배기를 통해 1/4로 전압 수준 맞춰준다. 따라서 enable generator는 sampler에서 생성된 기준전압을 이용하여 압전소자의 출력전압인 그림 1의 $V_{TEG,SP}$ 의 1/4값이 $V_{MPP,max}/4$ 이 되면 ‘EN’ 신호가 0이 되어 pMOS 스위치인 SW2를 on시켜 부하로 에너지를 공급하고 $V_{TEG,SP}$ 의 1/4값이 $V_{MPP,min}/4$ 이 되면 ‘EN’ 신호가 1이 되어 부하로 공급을 차단한다. 이로써 압전소자의 출력 전압은 1.5V를 기준으로 $V_{MPP,max}$ 와 $V_{MPP,min}$ 의 사이 전압을 유지한다. 그림 11에 동작원리를 정리하였다.

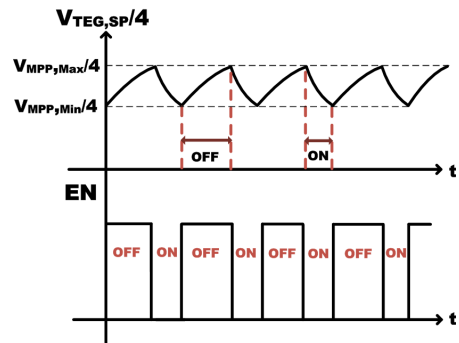


그림 11. Operation of MPPT control
Fig. 11 Operation of MPPT control

III. 모의실험 결과

설계한 열에너지 하베스팅 회로의 모의실험은 15kΩ의 내부저항을 갖고 3V의 개방회로전압을 출력하는 열전소자 등가회로를 이용하였고 그림 1의 부하저항은 7.5kΩ으로 설정하여 모의실험을 하였다.

그림 12는 $V_{TEG,OC}$, $V_{TEG,SP}$, $V_{TEG,Load}$ 의 결과 파형으로 열전소자의 개방회로전압을 샘플링하기 위해 $V_{TEG,OC}$ 는 주기적으로 개방회로전압인 3V를 출력하였고 샘플링 구간을 제외하고 $V_{TEG,OC}$ 와 $V_{TEG,SP}$ 는 열전소자의 MPP 전압인 개방회로전압의 1/2배 값인 1.5V를 기준으로 유지되어 열전소자의 최대 전력의 출력을 유지하였다. 따라서 MPPT 제어회로에 의해 부하로의 에너지 공급이 반복되어 $V_{TEG,OC}$ 와 $V_{TEG,SP}$ 가 충·방전을 반복하였고 이 때, 방전되는 전압이 부하로 공급되었다.

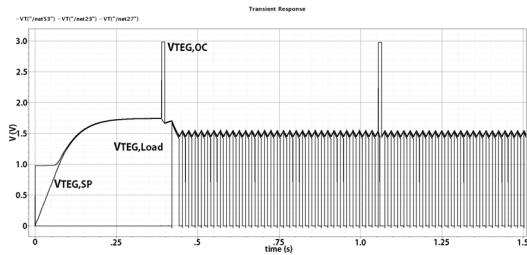


그림 12. 설계된 회로 전체 모의실험 결과
Fig. 12 Total simulation of designed circuit

그림 13은 MC, $V_{TEG,SP}/8$, 및 sampler의 switched capacitor와 비반전 증폭기의 결과 파형이다. 'MC' 신호가 '1'이 되면 그림 1의 SW1이 off되면서 MC 신호가 '0'을 출력하는 동안 열전소자는 개방회로전압을 출력한다. 회로의 동작범위를 확보하기 위해 샘플러에는 $V_{TEG,OC}/8$ 값인 372.6mV가 입력으로 들어가고 샘플러는 입력된 신호를 샘플링하다가 'MC' 신호가 0이 되면서 372.1mV를 홀드하게 된다. 이 값이 2배 증폭하는 비반전 증폭기의 입력으로 들어가 743.9mV로 2배 증폭하는 것을 확인하였다.

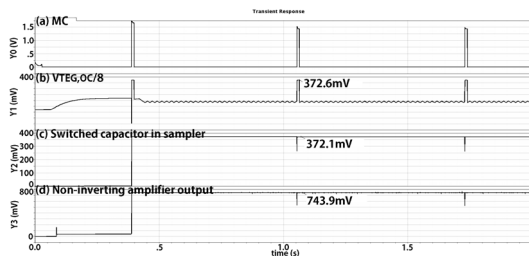


그림 13. MC 신호, $V_{TEG,OC}/8$, sampler 모의실험 결과
Fig. 13 Simulation of MC signal, $V_{TEG,OC}/8$, sampler

그림 14는 enable generator의 모의실험 결과로 sampler에 의해 생성된 $V_{MPP,Max}/4$ 는 381.8mV, $V_{MPP,Min}/4$ 는 362mV가 생성되어 $V_{TEG,SP}/4$ 가 사이에서 유지되었고 이는 실제 $V_{TEG,SP}$ 전압은 $V_{MPP,Max}$ 는 1.53V로, $V_{MPP,Min}$ 는 1.43V로 제어되어 실제 MPP 전압인 1.5V를 기준으로 열전소자의 출력을 제어하는 것을 확인하였다. 이를 통해 $V_{TEG,SP}/4$ 이 $V_{MPP,Max}/4$ 이 되면 pMOS 스위치인 SW2를 on 시킬 '0'을 출력하여 압전소자의 에너지가 부하로 공급되고 $V_{TEG,SP}/4$ 가 $V_{MPP,Min}/4$ 이 되면 pMOS 스위치를 off 시킬 '1'을 출력하여 부하로의 에너지 공급을 차단한다.

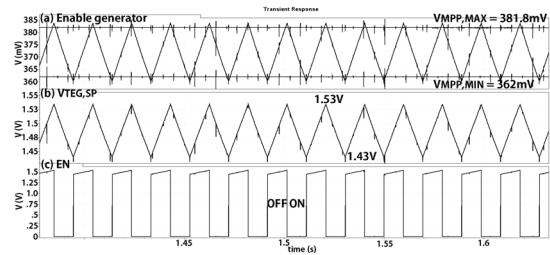


그림 14. Enable generator 모의실험 결과
Fig. 14 Simulation of enable generator

그림 15는 부하 저항에 따른 전력효율을 보여준다. 설계된 열에너지 하베스팅 회로의 최대 전력효율은 부하 저항이 20k Ω 일 때 94%이다. 이때 20k Ω 를 기준으로 부하가 커질수록 전력 스위치가 'on' 되는 구간, 즉 부하에 전력을 공급하는 시간이 줄어들게 되어 평균적으로 전력 효율은 감소한다.

부하가 작은 경우에는 공급 전력에 비해 부하에서 소비하는 전력이 작아서 전력스위치의 on/off 동작은 멈추게 되고 출력 전압은 상승하게 된다. 부하가 작아질수록 MPPT 제어 회로인 TEMC에서 고정적으로 소모되는 전력량이 부하에서 소모되는 전력량보다 상대적으로 커지므로 전력 효율이 떨어지는 것을 볼 수 있다.

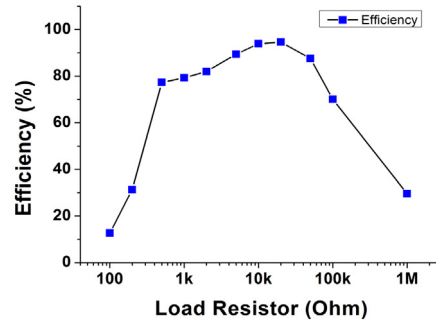


그림 15. 부하저항에 따른 전력효율
Fig. 15 Power efficiency versus load resistance

그림 16은 설계된 회로의 레이아웃 도면이다. PAD를 제외한 칩 면적은 1168.7 $\mu\text{m} \times 541.3\mu\text{m}$ 이다. 기존에 발표된 열에너지 하베스팅 회로와 본 논문에서 제안한 회로를 표 1에 비교하였다.

표 1. 열에너지 하베스팅 회로 비교
Table. 1 Comparison of the thermal energy harvesting circuits

Parameter	[3]	[9]	[10]	[11]	This work
TEG characteristic	35 Ω , 100W	Using bismuth telluride: 90 Ω , 1V&4 μ W/cm ² (@ Δ 60 $^{\circ}$ C)	Series connected 3 TEGs :35 Ω , 0.75V(@ Δ 20 $^{\circ}$ C)	TEG[13]: 5.2 Ω , 2.8V& 1.5W(@ Δ 100 $^{\circ}$ C)	MEMS process: 15k Ω , 3V
Input voltage	1V~2V	1V	0.5V~0.6V	35mV	1.3V~3V
MPPT Control	-	X	O	O	O
Architecture	Charge pump	DC-DC converter	Buck-boost DC-DC converter	Buck DC-DC converter	Simple circuits
Maximum Efficiency	58%	78%	85%	58%	94%
Controller Current	1.4 μ A	70 μ A	250 μ A	-	3 μ A
Process	0.35 μ m	0.35 μ m	-	0.35 μ m	0.35 μ m

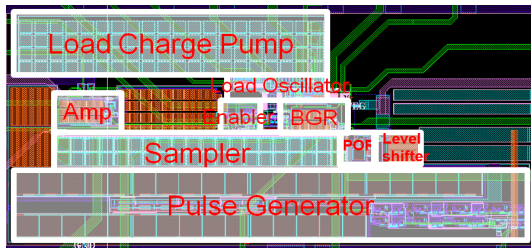


그림 16. 레이아웃
Fig. 16 Layout

IV. 결 론

본 논문에서는 0.35 μ m CMOS 공정을 이용하여 MPPT 기능을 갖는 열에너지 하베스팅 회로를 설계하였다. MPPT 제어는 열전소자의 개방회로전압과 MPP에서의 전압간의 비례관계를 이용하였고, 이를 열전소자의 개방회로전압을 주기적으로 샘플링하여 이를 이용하여 MPPT 기준전류를 생성함으로써 구현하였다. 설계된 회로를 모의실험 한 결과 TEMC의 전체 전류 소모는 3 μ A 이고 20k Ω 에서 94% 최대 전력 효율 특성 보였다. 제작한 칩은 PAD를 제외하고 1168.7 μ m \times 541.3 μ m의 크기로 설계되었다. 본 논문에서 설계된 열에너지 하베스팅 회로는 저비용으로 작은 크기로 구현가능하기 때문에 duty cycle이 비교적 낮은 environmental monitoring 분야의 자가발전 센서노드와 biomonitoring용 BSN(Body Sensor Network)에 활용될 수 있다.

참고문헌

- [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] J. Colomer-Farrarons, P. Miribel-Catala, A. Saiz-Vela, M. Puig-Vidal, and J. Samitier, "Power-Conditioning Circuitry for a Self-Powered System Based on Micro PZT Generators in a 0.13 μ m Low-Voltage Low-Power Technology," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, pp. 3249-3257, September 2008.
- [3] I. Doms, P. Merken, C. Van Hoof, R.P. Mertens, "Capacitive Power Management Circuit for Micropower Thermoelectric Generators With a 1.4 μ A Controller", *IEEE Solid-State Circuits Society*, pp 2824-2833, 2009.
- [4] C. Hua et al., "Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 45, pp. 99-107, Feb. 1998.
- [5] 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.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] 이은도, "열전소자의 기술개발 현황", 한국 기계 산업 진흥회, pp. 71-77, 2010.
- [9] H. Lhermet, C. Condemine, M. Plissonnier, R. Salot, P. Audebert, M. Rosset, "Efficient Power Management Circuit: From Thermal Energy Harvesting to Above-IC Microbattery Energy Storage", *IEEE Solid-State Circuits Society*, pp 246-255, 2008.
- [10] Ko Ko Win, S., Dasgupta, S.K. Panda, "An optimized MPPT circuit for thermoelectric energy harvester for low power applications ", *IEEE ICPE & ECCE*, pp. 1579-1584, 2011.
- [11] Y.K. Ramadass, A.P. Chandrakasan, "A Battery-Less Thermoelectric Energy Harvesting Interface Circuit With 35 mV Startup Voltage", *IEEE Solid-State Circuits Society*, pp. 333-341, 2011
- [12] V. Leonov, P. Fiorini, S. Sedky, T. Torfs, and C. Van Hoof, "Thermoelectric MEMS generators as a power supply for a body area network," in *Proc. Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, pp. 291 - 294, 2005.
- [13] Tellurex Thermoelectric Energy Harvester-G1-1.0-127-1.27, Tellurex [Online]. Available: <http://www.tellurex.com>

저자소개



윤은정(Eun-jung Yoon)

2011.2 : 인천대학교 전자공학과
학사
2011.3~현재 : 인천대학교
전자공학과 석사과정

※ 관심분야 : 에너지 하베스팅 회로 설계



김수진(Su-jin Kim)

2009.3~현재 : 인천대학교
전자공학과 학사과정
※ 관심분야 : 에너지 하베스팅 회로
설계



박금영(Kum-young Park)

2009.3~현재 : 인천대학교
전자공학과 학사과정
※ 관심분야 : 에너지 하베스팅 회로
설계



오원석(Won-seok Oh)

1998.2 : 인천대학교
전자공학과 학사
2000.2 : 인천대학교
전자공학과 석사

2000.3~현재 : 전자부품연구원 SoC연구센터
※ 관심분야 : CMOS Analog/Mixed-mode IC 설계



유종근(Chong-gun Yu)

1985.2 : 연세대학교
전자공학과 학사
1987.2 : 연세대학교
전자공학과 석사

1993.12 : Iowa State University 전기 및 컴퓨터공학과
Ph.D.

2009.8~2010.7 : UC Davis 방문교수

1994.3~현재 : 인천대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : CMOS Analog/Mixed-mode IC 설계,
RFIC 설계