

DC-DC 부스트 변환기를 이용한 열전에너지 하베스팅 회로

Thermoelectric Energy Harvesting Circuit Using DC-DC Boost Converter

윤은정*, 박종태*, 유종근**

Eun-Jung Yoon*, Jong-Tae Park*, Chong-Gun Yu**

Abstract

This paper describes a DC-DC boost converter for thermoelectric energy harvesting. The designed converter boosts the VDD through a start-up block from a low-output voltage of a thermoelectric device and the boosted VDD is used to operate the internal control block. When the VDD reaches a predefined value, a detector circuit makes the start-up block turn off to minimize current consumption. The final boosted VOUT is achieved by alternately operating the DC-DC converter for VDD and the main DC-DC converter for VOUT according to the comparator outputs. Simulation results shows that the designed converter generates 2.65V from an input voltage of 200mV and its maximum power efficiency is 63%. The area of the chip designed using a 0.35um CMOS process is 1.3mm x 0.7mm including pads.

요약

본 논문에서는 열전에너지 하베스팅을 위한 저전압 DC-DC 부스트 변환기를 설계하였다. 설계된 변환기는 열전 소자의 작은 출력전압으로부터 시동회로를 통해 일정 전압까지 승압된 VDD를 얻으며, 이는 내부 컨트롤 블록을 동작시키는데 사용된다. VDD가 원하는 전압 값에 도달하면 전압감지기가 이를 감지하고 시동회로에 공급되는 전류를 차단하여 전류소모를 최소화한다. 이후 비교기의 출력에 따라 VDD를 위한 DC-DC 변환기와 최종출력 VOUT을 위한 DC-DC 변환기를 번갈아가며 동작시켜서 최종적으로 승압된 VOUT을 얻는다. 모의실험 결과, 설계한 변환기는 200mV의 입력으로부터 2.65V의 VOUT을 출력하며, 최대 전력효율은 63%이다. 0.35um CMOS 공정을 사용하여 설계한 칩의 크기는 PAD를 포함하여 1.3mm x 0.7mm이다.

Key words : DC-DC Converter, Energy Harvesting, Thermoelectric Energy, Start-up Circuit, CMOS

1. 서론

최근 신재생 에너지원과 이들의 응용에 대해 관심

이 증가하고 있다. 또한 주변에 버려지는 에너지를 수확해서 저전력 시스템을 구동하기 위한 마이크로 에너지 하베스팅(energy harvesting) 기술에 대해 전 세계적으로 많은 관심과 연구개발이 진행 중에 있다 [1-11]. 에너지 하베스팅은 소비되거나 미활용 되는 에너지를 수확하여 전기에너지로 재생산하는 기술로서, 빛, 진동, 열에너지 등을 광전 셀(photovoltaic cell), 압전 변환기(piezoelectric transducer), 열전소자(thermoelectric generator) 등과 같은 에너지 하베스팅 소자를 이용하여 전기에너지로 변환하고 전자기기의 전력으로 사용하는 환경에너지 재생형 에너지원이다.

* Dept. of Electronics Engineering, Incheon National University (ngkorea@nate.com, 032-835-4770)

★ Corresponding author : Chong-Gun Yu

※ This work was supported by the Incheon National University Research Grant in 2012

Manuscript received Jul. 30, 2013; revised Sep. 4, 2013; accepted Sep. 4, 2013

마이크로 에너지 하베스팅 분야에서 빛에너지를 이용하는 기술[1-3]은 에너지 변환 효율이 상대적으로 높으며, 오래 전부터 연구 개발이 진행되어 왔기 때문에 상당부분 기술이 성숙되고 있다. 진동을 이용하는 기술[4-6]은 빛에너지를 이용하는 기술에 비해 효율은 다소 떨어지지만 소형으로 구현이 가능하기 때문에 초소형 시스템에 적합하다. 열에너지를 이용하는 기술[7-11]은 에너지 변환효율이 상대적으로 낮으며, 에너지 변환 소자에서 추출될 수 있는 전압레벨이 작다는 기술적인 어려움 때문에 연구개발이 다소 더디지만, 인간을 비롯한 생물체에 적용이 적합하여 헬스 케어 시스템 등 다양한 응용분야의 창출이 가능하기 때문에 최근 연구개발이 시도되고 있는 분야이다.

일반적으로 사용되는 p-n leg를 이용한 Bismuth telluride 형태의 열전소자 TEG(thermoelectric generator)에서 발생하는 전압은 온도 1도 당 수십 mV(@10cm²)로 매우 작다[12]. 이러한 소자를 생명체의 몸체(body)에 적용하는 경우 열전소자에 인가되는 온도 차이는 2-3도이다. 따라서 열전소자에서 발생하는 전압은 수백 mV 이내로 매우 작기 때문에, 열에너지 하베스팅 회로를 구동하기 어렵다.

이처럼 작은 전압으로부터 회로를 구동시키기 위해 기존 연구[9]에서는 20mV의 입력전압으로부터 에너지를 수확하기 위한 DC-DC 부스트 변환기를 제안하였다. 그러나 이 시스템을 구동하기 위해서는 650mV 이상의 외부전압이 필요하다는 단점이 있다. 참고문헌[10]에서는 움직임(motion)에 의해 기계적인 스위치(mechanical switch)를 동작시켜서 35mV의 작은 전압으로부터 승압회로를 시동시켰다. 그러나 이 방법은 기계적인 스위치가 필요하며, 시동을 위해서는 진동과 같은 움직임이 필요하기 때문에 응용분야가 제한적이다. 참고문헌 [11]에서는 65nm CMOS 미세공정을 이용하여 95mV의 작은 전압에서도 동작 가능한 V_{TH}-tuned 발진기(oscillator)와 전하펌프(charge pump) 회로를 설계하여 시동회로로 사용하였다. 그러나 이 회로에서 승압된 출력 전압은 0.9V 정도로 작기 때문에 응용분야는 제한 적일 수밖에 없다.

본 논문에서는 기존의 기계적인 스위치와 같은 추가적인 소자를 사용하지 않고 열전소자에서 발생하는 작은 전압(수백 mV)으로부터 응용회로를 구동하는데 필요한 높은 전압(약 2.5V)을 발생시키기 위한 열에너지 하베스팅 회로를 제안하고 0.35μm CMOS 공정을 이용하여 설계하였다.

II. 회로설계

2.1 제안된 저전압 DC-DC 부스트 변환기의 구조

그림 1은 본 논문에서 제안하는 열에너지 하베스팅을 위한 저전압 DC-DC 부스트 변환기의 블록도이다. 회로는 열전소자(TEG: Thermoelectric Generator), 시동(Startup) 회로, 컨트롤 블록, 주(main) DC-DC 부스트 변환기로 구성된다.

열전소자는 열에너지에 의한 온도차를 전기에너지로 변환하는 역할을 한다. 그러나 열전소자에서 출력되는 전압은 수십~수백 mV로 매우 낮은 편이다. 시동회로는 이러한 열전소자의 낮은 출력전압으로부터 컨트롤 블록이 동작 가능한 전압(ex: 1V)까지 공급전압(V_{DD})을 승압시키는 역할을 한다. 컨트롤 블록은 시동회로에 의해 V_{DD}가 1V 이상 승압하게 되면, EN 신호를 발생시켜 시동회로를 disable시킨다. 또한 시동회로가 disable된 후 V_{DD}를 2V 이상 유지시키면서, 주 DC-DC 부스트 변환기의 승압을 위한 CHG_V_{OUT} 신호를 주 DC-DC 부스트 변환기의 파워 nMOS 스위치(M_N)에 공급한다. 주 DC-DC 부스트 변환기는 컨트롤 블록에 의해 수백 mV의 열전소자의 출력전압을 2.5V 이상 승압하는 역할을 한다.

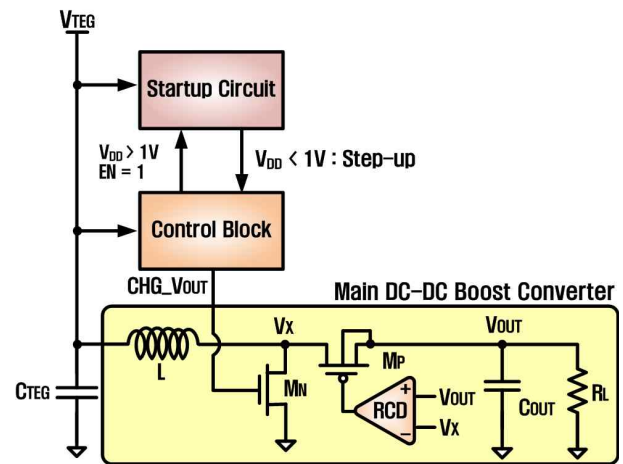


Fig. 1. Proposed low-voltage DC-DC boost converter circuit

그림 1. 제안된 저전압 DC-DC 부스트 변환기 회로

2.2 열전소자(TEG: Thermoelectric Generator)

열전소자는 열에너지를 전기에너지로 변환하는 에너지 변환기로써 두 개의 서로 다른 금속 접합부의 온도차에 의해 기전력이 발생하는 제베크 효과(Seebeck effect)를 이용한다.

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.

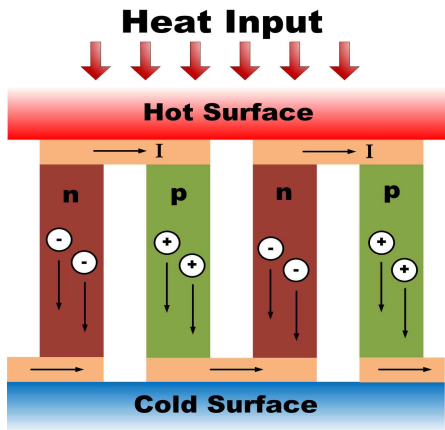


Fig. 2. Operating principle of a TEG
그림 2. 열전소자의 동작원리

제베크 효과에 의한 열전소자의 개방회로 전압은 식 (1)과 같다[12]. 여기서 α 는 제베크 상수이고, $N_{Legpairs}$ 는 열전반도체 쌍의 개수며, ΔT 는 뜨거운 면과 차가운 면의 온도차이다. 식 (1)로부터 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 등가회로로 식 (1)에 의한 열전소자의 출력전압과 열전소자의 직렬 기생저항 R_{TEG} 로 구성되어있다.

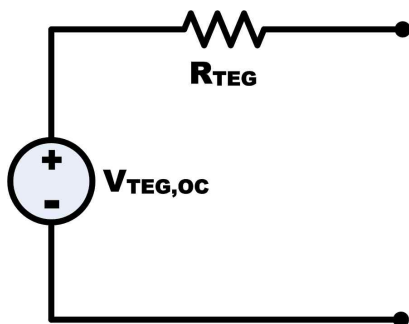


Fig. 3. Equivalent circuit of TEG
그림 3. 열전소자 등가회로

본 논문의 DC-DC 부스트 변환기를 위해 사용된 열전소자는 Tellux[13]사의 'G1-1.0-127-1.27' 모델이다. 이 열전소자는 5Ω의 내부저항을 가지고 있으며 25mV/K의 출력전압 특성을 갖는다.

2.3 저전압 시동(Startup) 회로

시동회로는 TEG에서 발생된 작은 전압 V_{TEG} 으로부터 다른 구성블록들을 동작시키는데 필요한 전압까지 V_{DD} 를 승압시키는 역할을 한다. 그림 4는 본 논문에서 제안된 저전압 시동회로로써 오실레이터(OSC), 전하펌프(Charge Pump), 펄스생성기(Pulse Generator), nMOS 스위치인 M_{NS} 등으로 구성된다. OSC는 전하펌프의 승압을 위한 클럭(CLK1, CLK2)을 발생시키며, 전하펌프는 입력전압을 트랜지스터의 $V_t(750mV)$ 이상으로 승압하고, 승압된 전압 V_{CP} 를 펄스생성기에 공급한다. 펄스생성기는 시동 동작을 위해 파워 nMOS 스위치(M_{NS})를 on/off하기 위한 펄스(V_{PG})를 생성한다. M_{NS} 의 반복되는 on/off 동작에 의해 인덕터 L_S 에 전류 build-up과 V_{DD} 노드로의 전류 공급을 반복하게 되며, 이 과정을 통해 V_{DD} 는 1V 이상으로 승압하게 된다.

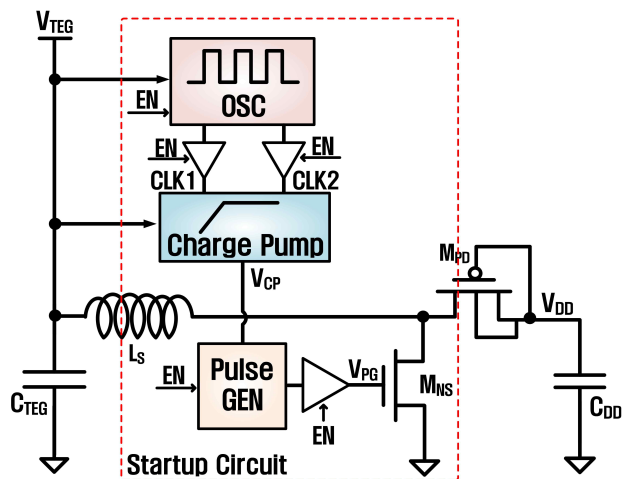


Fig. 4. Proposed startup circuit
그림 4. 제안된 시동회로

제안된 회로는 0.35μm CMOS 공정으로 설계되었다. 본 설계에 사용된 공정의 일반 MOSFET의 문턱전압은 대략 750mV인 반면, 열전소자는 이 보다 더 낮은 전압을 출력한다. 따라서 이러한 낮은 전압에서 시동회로를 동작시키기 위해, 공정사에서 제공하는 문턱전압이 100mV인 native MOSFET를 이용하여 OSC와 버퍼 그리고 전하펌프를 구성하였다. 그림 5는 설계된 OSC 회로이다. 3단의 링(ring) 오실레이터 형태로 구성하였으며, native MOSFET은 nMOS만 지원

이 되기 때문에 pMOS 트랜지스터는 저항으로 대체하였다. 또한 시동동작이 끝난 후 시동회로의 동작을 disable 시키고 전류소모를 최소화하기 위한 EN 스위치와 EN의 반전 신호인 ENB 스위치를 추가하였다. EN와 ENB 신호는 컨트롤 블록의 전압감지기에 의해 발생된다.

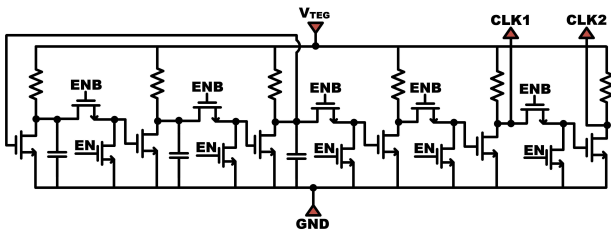


Fig. 5. Oscillator schematic
그림 5. 오실레이터 회로

전하펌프는 그림 6과 같이 Dickson 전하펌프 형태를 사용하였으며 12단으로 구성하였다. 전하펌프의 출력에 연결된 펄스생성기는 그림 7과 같이 3단 CMOS 인버터로 구성하였다.

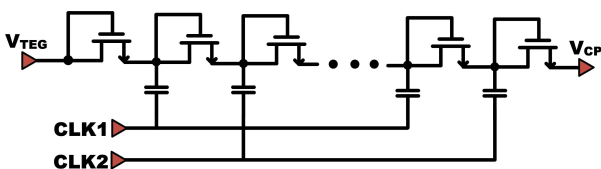


Fig. 6. Dickson charge pump
그림 6. Dickson 전하펌프

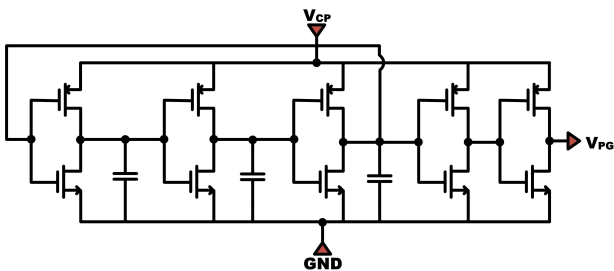


Fig. 7. Pulse generator schematic
그림 7. 펄스생성기 회로

2.4 컨트롤 블록(Control Block)

그림 8은 제안된 회로의 컨트롤 블록이다. 컨트롤 블록은 크게 V_{DD} 를 출력하는 DC-DC 부스트 변환기(DCDC_ V_{DD})와 회로 전체의 동작을 제어하는 컨트롤러(Controller)로 구성되어 있다. 시동회로에 의해 V_{DD} 가 1V이상 상승하면 컨트롤러가 동작하기 시작하고

EN 신호는 '1'을 출력하여 시동회로를 disable시킨다. 또한 컨트롤러가 동작하기 시작하면 컨트롤러는 V_{DD} 를 2V이상 유지시키면서 주 DC-DC 부스트 변환기를 승압시킨다.

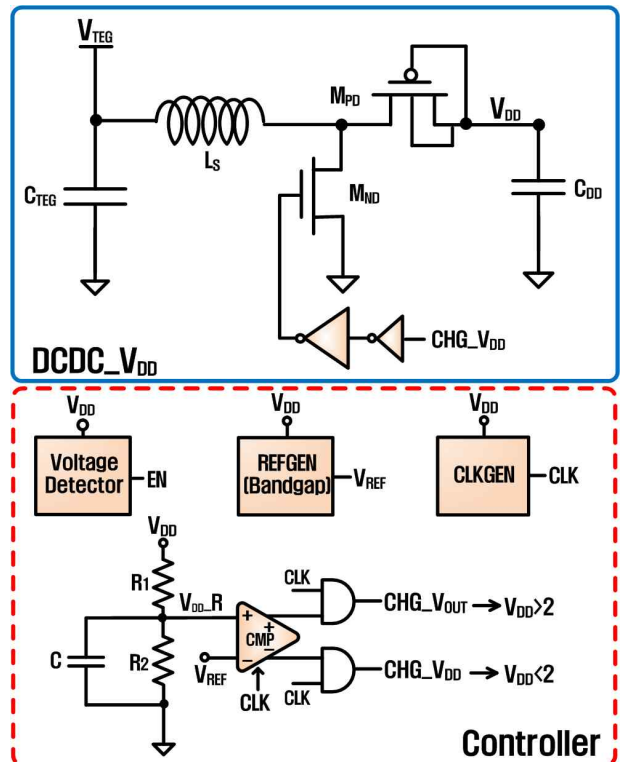


Fig. 8. Control block
그림 8. 컨트롤 블록

컨트롤러는 전압감지기(Voltage Detector), 밴드갭(REFGEN), 클럭생성기(CLKGEN) 그리고 비교기(CMP)로 구성되어 있다. 그림 9와 10은 각각 설계된 전압감지기와 밴드갭 회로이다. 전압감지기는 V_{DD} 레벨을 감지하여 V_{DD} 가 1V 이상이 되면 EN 신호 '1'을 출력하여 시동회로를 disable 시킨다. 밴드갭은 기준 전압을 생성하여 비교기에 공급하는 역할을 한다. 기존의 BJT를 이용하는 밴드갭 회로의 경우 전류소모가 크기 때문에 본 설계에는 적합하지 않다. 따라서 본 논문에서는 MOSFET와 저항으로만 구성된 밴드갭 회로를 설계하여 전류소모를 최소화하였다. 클럭생성기는 비교기 동작에 필요한 클럭 CLK를 공급하며 5단의 링 오실레이터 형태로 구성되었다.

그림 11은 비교기 회로이다. 클럭생성기에서 출력된 클럭에 의해 동작하며, V_{DD} 에 연결된 저항 분주기를 통해 V_{DD} 레벨을 밴드갭의 기준전압과 비교하여 2V의 V_{DD} 를 감지하는 역할을 한다. 이를 통해 V_{DD} 를

2V이상 유지하면서 주 DC-DC 부스트 변환기를 승압시키는 역할을 한다. 비교기 블록의 동작은 다음과 같다. V_{DD} 가 2V보다 낮아지면 비교기의 (-)출력에서 출력되는 CHG_V_{DD} 가 $DCDC_V_{DD}$ 의 파워 nMOS 스위치인 M_{ND} 에 인가되어 V_{DD} 를 승압한다. 이와 반대로 V_{DD} 가 2V 이상이면 비교기의 (+)출력인 CHG_V_{OUT} 이 출력되고, 주 DC-DC 부스트 변환기의 nMOS 스위치인 M_N 에 공급되어 V_{OUT} 을 승압한다.

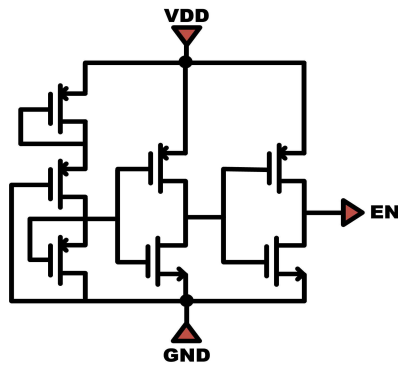


Fig. 9. Voltage detector schematic
그림 9. 전압감지기 회로

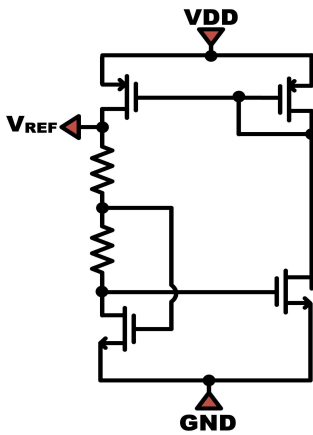


Fig. 10. Bandgap schematic
그림 10. 밴드갭 회로

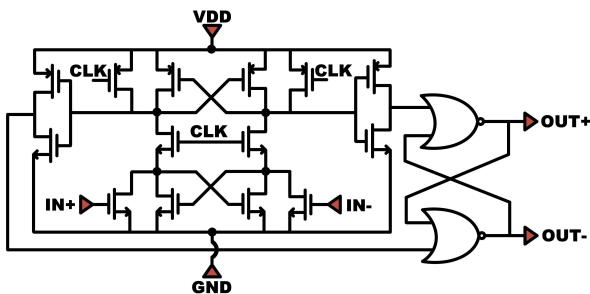


Fig. 11. Comparator schematic
그림 11. 비교기 회로

2.5 주 DC-DC 부스트 변환기

주 DC-DC 부스트 변환기($DCDC_V_{OUT}$)는 열전소자로부터 출력된 전압 (ex: 200mV)을 2V이상 승압하여 부하에 공급하는 역할을 한다. 파워 nMOS 스위치 M_N 은 컨트럴 블록에서 출력되는 CHG_V_{OUT} 신호에 의해 on/off 된다. 이때 V_{OUT} 에서 인덕터 L로 흐르는 역전류를 방지하기 위해 역전류 감지기(RCD: Reverse Current Detector)를 추가하여 시스템의 효율을 높였다. 그림 12에 주 DC-DC 부스트 변환기를 보였다.

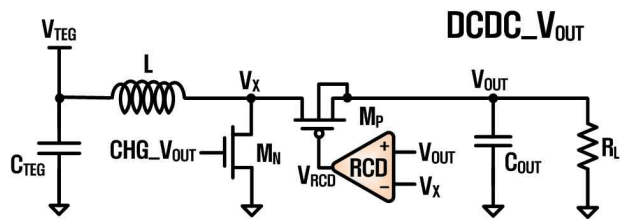


Fig. 12 Main DC-DC boost converter
그림 12. 주 DC-DC 부스트 변환기

그림 13은 본 설계에 사용된 역전류 감지기 회로도이다[14]. RCD 회로는 인덕터 전압(V_x)과 출력전압 V_{OUT} 을 비교하여 V_{OUT} 이 더 크면 V_{RCD} 를 출력함으로써 파워 pMOS 스위치를 off시켜 역전류를 방지하는 역할을 한다.

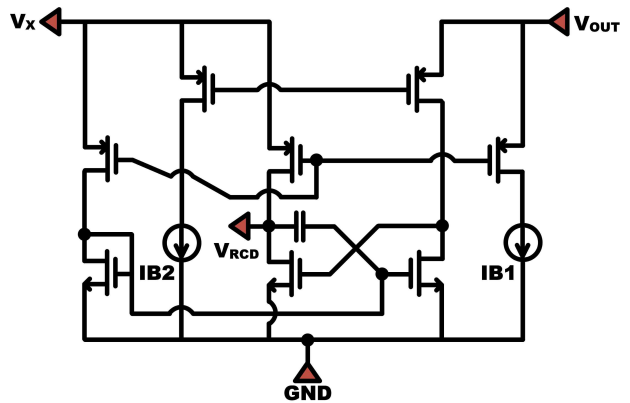


Fig. 13 Reverse current detector(RCD)
그림 13. 역전류 감지기

III. 모의실험 및 IC 제작

설계된 열전에너지 하베스팅을 위한 저전압 DC-DC 부스트 변환기는 5Ω의 내부저항과 200mV의 개방회로전압을 출력하는 그림 3의 열전소자 등가회로를 이용하여 모의실험을 하였다. 인덕터 L_S 와 L은 22uH를 사용하였고, C_{TEG} 는 100nF, C_{DD} 는 1nF, C_{OUT}

은 100nF 그리고 부하저항(R_L)은 10k Ω 으로 설정하였다.

그림 14와 그림 15는 시동동작에 대한 모의실험 결과이다. 그림 14는 V_{DD} 와 V_{PG} , EN에 대한 모의실험 결과로 초기 시동회로가 동작 시, 펄스생성기는 전하 펌프의 출력전압을 공급받아 펄스폭이 900mV이고 듀티사이클이 60%이며 주파수가 77kHz의 클럭을 출력하고 시동회로의 파워 스위치인 M_{NS} 에 공급하여 V_{DD} 를 승압시킨다. 시동회로에 의해 1V 이상 승압된 V_{DD} 는 약 1.3V가 되면 EN 신호가 '1'이 되는 것을 확인할 수 있다.

그림 15는 EN 신호, 시동회로의 클럭(Startup CLK), V_{PG} , V_{REF} 그리고 컨트롤 블록의 클럭(CLK) 파형이다. 시동회로의 오실레이터는 2.6MHz의 중첩되지 않는 두 개의 클럭을 발생시킨다. 전압감지기에 의해 EN 신호가 1이 되면 시동회로는 멈추게 되고, 시동회로의 클럭과 펄스생성기의 출력 V_{PG} 가 더 이상 발생되지 않는 것을 그림 15의 두 번째와 세 번째 파형에서 확인할 수 있다. EN 신호가 1이 되면 컨트롤 블록의 밴드갭과 클럭생성기가 동작하여 기준전압 V_{REF} 와 클럭 CLK가 출력되는 것을 네 번째와 다섯 번째 파형에서 확인할 수 있다. 모의실험 결과 시동회로는 시동동작 시 41 μ A의 전류를 소모하며, disable 후에는 8.6 μ A의 전류를 소모한다.

컨트롤 블록의 비교기는 클럭에 의해 동작하며 V_{DD} 를 저항 분주기를 통해 기준전압 크기로 낮춘

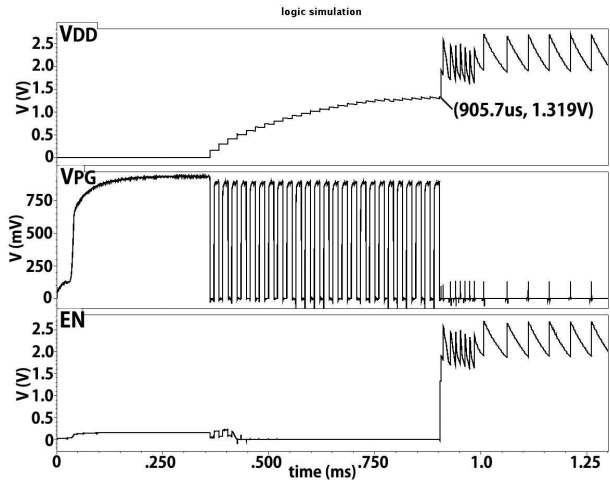


Fig. 14. Waveforms of V_{DD} , V_{PG} and EN signal
그림 14. V_{DD} , V_{PG} , EN 신호 파형

$V_{DD,R}$ 과 기준전압 V_{REF} 와 비교하여 2V의 V_{DD} 를 감지하도록 설계되었다. 그림 16은 비교기의 입력과 출력 파형이다. 모의실험 결과 밴드갭은 857mV의 기준전압을 출력하고, 클럭생성기는 70%의 듀티사이클을 갖는 176kHz의 클럭을 출력한다. 이를 입력받아 동작하는 비교기는 $V_{DD,R}$ 이 V_{REF} 보다 작아지면 $CHG_{V_{DD}}$ 를 출력하고, $V_{DD,R}$ 이 V_{REF} 보다 커지면 $CHG_{V_{OUT}}$ 을 출력하는 것을 그림 16에서 확인할 수 있다. 설계된 컨트롤러 블록은 14.4 μ A의 전류를 소모한다.

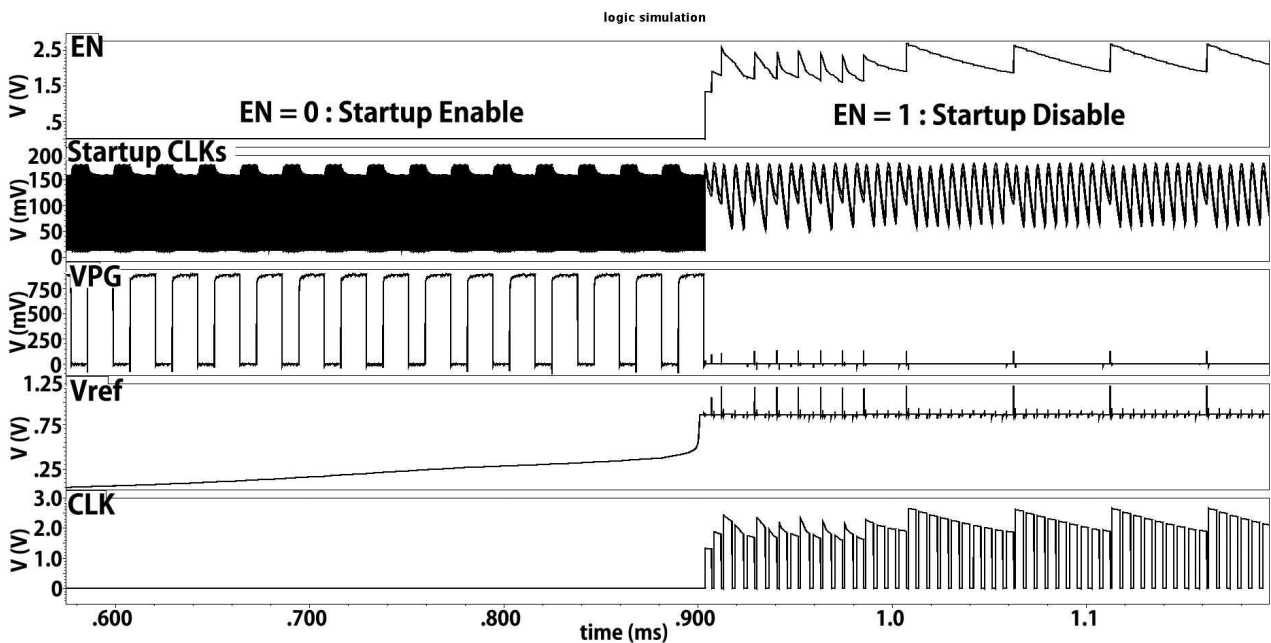


Fig. 15. Output waveforms of the startup circuit and the control block
그림 15. 시동회로와 컨트롤 블록의 출력 파형

Table. 1. Comparison of low-voltage DC-DC boost converters for thermoelectric energy harvesting
 표 1. 열전에너지 하베스팅을 위한 저전압 DC-DC 부스트 변환기 비교

Parameter	[8]	[9]	[10]	[11]	This work
Process	0.35um	0.13um	0.35um	65nm	0.35um
Minimum Input Voltage	600mV	20mV	35mV	95mV	200mV
Output Voltage	2V (unregulated)	1V (regulated)	1.8V (regulated)	0.9V (unregulated)	2.8V (unregulated)
Required External Voltage	2V	>650mV	None	None	None
Startup Mechanism	External voltage	External voltage	Boost converter with mechanical switch	Charge pump	Boost converter with charge pump
Number of inductors	-	1	3	1	2
DC-DC Conversion Principle	Charge pump	Boost converter with inductor	Boost converter with inductor	Boost converter with inductor	Boost converter with inductor
Peak Efficiency (%)	70 (boost converter)	52 (end-to-end)	58 (end-to-end)	72	63 (end-to-end)
Active Area (mm ²)	3.06	0.12	1.6	0.17	0.91
Year	2009	2010	2011	2011	2013

용분야가 제한 적일 수밖에 없다. 본 논문에서 제안된 회로는 외부 전압이나 기계적인 스위치를 사용하지 않으며, 비록 2개의 외부 인덕터를 사용하고 있지만 높은 전압을 출력하기 때문에 다양한 응용분야에 적용이 가능하다. 설계된 회로의 최소 입력전압은 200mV로 다소 높은 편이지만 이는 0.35um 공정을 사용했기 때문이며 보다 미세 공정을 사용하면 낮아질 수 있다.

에너지 하베스팅에서 변환 소자로부터 최대 전력을 출력하기 위한 방법들이 많이 적용되며 그 중 대표적인 것이 Maximum Power Point Tracking(MPPT)이다[2],[5-6],[8],[10]. 본 논문에서는 MPPT는 적용되지 않았지만 전체 시스템의 효율 향상을 위해 참고문헌 [10]에서와 같이 DC-DC 변환기의 동작 주파수를 열전 소자가 최대 전력을 출력할 수 있는 주파수로 설정하는 방법을 적용할 수 있다.

IV 결론

본 논문에서는 열전에너지 하베스팅을 위한 저전압 DC-DC 부스트 변환기를 제안하였다. 낮은 출력전압 특성을 갖는 열전소자로부터 시동동작을 위해 전하펌프를 이용한 펄스생성기를 통해 시동동작을 하였다. 또한, 컨트롤러 회로의 공급전압을 위한 DC-DC 변환기와 최종출력을 위한 DC-DC 변환기를 번갈아가며 동작시켜서 최종적으로 승압된 출력을 얻도록 설계하였다. 0.35um CMOS 공정으로 설계된 회로를 모의실

험한 결과 200mV의 입력전압으로부터 2.6V의 승압된 출력을 얻었으며, 최대 전력효율은 63%이다. 본 논문에서 제안된 저전압 DC-DC 부스트 변환기는 외부전압이나 기계적 스위치와 같은 외부소자를 사용하지 않고 2V 이상의 출력전압을 얻을 수 있으므로 열전 에너지 하베스팅이 필요한 다양한 응용분야에 활용될 수 있다.

References

- [1] 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*, vol. 55, no. 7, pp. 2759-2766, 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] N. Khosropour, F. Krummenacher, and M. Kayal, "Fully integrated ultra-low power management system for micro-power solar energy harvesting applications," *Electronics*

Letters, Vol. 48, No. 6, pp. 338-339, 2012.

- [4] 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*, vol. 55, no. 9, pp. 3249-3257, September 2008.
- [5] C. Lu, C.-Y. Tsui, and W.-H. Ki, "Vibration Energy Scavenging System With Maximum Power Tracking for Micropower Applications," *IEEE Trans. on VLSI Systems*, Vol. 19, No. 11, pp. 2109-2119, 2011.
- [6] N. Kong, and D. S. Ha, "Low-Power Design of a Self-powered Piezoelectric Energy Harvesting System With Maximum Power Point Tracking," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 27, No. 5, pp. 2298-2308, 2012.
- [7] A. Richelli, L. Colalongo, S. Tonoli, and Z. M. Kovacs-Vajna, "A 0.2 - 1.2V DC/DC Boost Converter for Power Harvesting Applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 6, pp. 1541-1546, June. 2009.
- [8] I. Doms, et. al., "Capacitive Power Management Circuit for Micropower Thermoelectric Generators With a 1.4 μ A Controller", *IEEE JSSC*, vol. 44 , no. 10, pp. 2824-2833, 2009.
- [9] E. Carlson, K. Stunz and B. Otis, "20mV input Boost Converter for Thermoelectric Energy Harvesting," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 45, pp. 741-750, Apr., 2010.
- [10] Y. K. Ramadass and A. P. Chandrakasan, "A Battery-Less Thermoelectric Energy Harvesting Interface Circuit With 35 mV Startup Voltage", *IEEE JSSC*, vol. 46, no. 1, pp.333-341, 2011.
- [11] P. H. Chen, et. al., "A 95mV-Startup Step-Up Converter with V_{TH} -Tuned Oscillator by Fixed-Charge Programming and Capacitor Pass-On Scheme", *IEEE International Solid-State Circuits Conference*, pp. 216-217, Feb. 2011.
- [12] 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.
- [13] Tellurex Thermoelectric Energy Harvester-G1 -1.0-127-1.27, Tellurex [Online]. Available: <http://www.tellurex.com>
- [14] T. Y. Man, P. K. T. Mok, and M. J. Chan, "A 0.9V Input Discontinuous Conduction Mode Boost Converter With CMOS Control Rectifier," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 43, pp. 2036-2046, Sept. 2008.

BIOGRAPHY

Yoon Eun-Jung (Student Member)



2011 : BS degree in Electronics Engineering, Incheon National University.

2013 : MS degree in Electronics Engineering, Incheon National University.

2013~ : PhD student in Electronics Engineering, Incheon National University.

Park Jong-Tae (Member)



1981 : BS degree in Electronics Engineering, Kyungpook National University.

1983 : MS in Electronics Eng., Yonsei University.

1987 : PhD in Electronics Eng., Yonsei University.

1983~1985 : Research Engineer, Gold Star Semiconductor.

1991 : MIT Post Doc.

2000~2001 : UC Davis Visiting scholar

Yu Chong-Gun (Member)



1985 : BS degree in Electronics Engineering, Yonsei University.

1987 : MS in Electronics Eng., Yonsei University.

1993 : PhD in Electrical Eng., Iowa State University.

2009~2010 : UC Davis Visiting

scholar