

# 스마트기기를 위한 12 V 승압형 PWM DC-DC 변환기 설계 및 특성해석

나재훈, 송한정\*

인제대학교 나노융합공학과 / 인제대학교 나노매뉴팩처링 연구소

## Design and Analysis of a 12 V PWM Boost DC-DC Converter for Smart Device Applications

Jae-Hun Na, Han-Jung Song\*

Department of Nanoscience & Engineering, Inje University /

Department of Nanoscience and Engineering, Center for Nano Manufacturing, Inje University

**요약** 본 논문에서는 스마트기기의 배터리를 전원으로 갖는 12 V 승압형 PWM 변환기를 설계하고 컨버터를 구성하는 각 소자들의 손실을 계산하여 가장 안정적인 동작을 하는 설계 값을 도출하였다. 12 V 승압형 PWM 변환기는 저항, 커패시터 및 인덕터 등의 여러 수동소자를 비롯하여, 다이오드, 전력 스위치용 파워 MOS 트랜지스터와 PWM 신호제어를 위한 IC를 사용하여 구현하였다. 컨버터를 구성하는 주요 소자들의 이론적인 계산 값과 회로설계 해석프로그램인 PSPICE를 사용한 시뮬레이션 결과를 비교하고 각 소자 값들을 변화시키며 결과 파형을 분석한다. 분석한 컨버터를 실제 PCB 보드에 구성하고 디지털 오실로스코프와 DMM 멀티미터를 사용하여 측정하였고, SPICE 시뮬레이션을 통해 얻은 결과 값과 비교하였다. 설계한 컨버터에서 사용한 제어용 IC 칩은 TI(텍사스 인스트루먼트)사의 LM3481을 사용하여 설계를 구현하였고, 5V 입력, 12V의 출력 값을 가지는 것을 확인하였다. 모의실험과 동일한 조건에서 출력전압, 리플전압 및 부하, 입력전압 변동율 등의 특성에 대한 측정결과는 SPICE 시뮬레이션 결과와 일치하는 것을 확인하였다.

**Abstract** In this study, a 12 V PWM boost converter was designed with the optimal values of the external components of the power stage as well as the compensation stage for smart electronic applications powered by a battery device. The 12 V boost PWM converter consisted of several passive elements, such as a resistor, inductor and capacitor with a diode, power MOS switch and control IC chip for the control PWM signal. The devices of the power stage and compensation stage were designed to maintain stable operation under a range of load conditions as well as achieving the highest power efficiency. The results of this study were first verified by a simulation in SPICE from calculations of the values of major external elements comprising the converter. The design was also implemented on the prototype PCBboard using commercial IC LM3481 from Texas Instruments, which has a nominal output voltage of 12 V. The output voltage, ripple voltage, and load regulation with the line regulation were measured using a digital oscilloscope, DMM tester, and DC power supply. By configuring the converter under the same conditions as in the circuit simulation, the experimental results matched the simulation results.

**Keywords** : Portable device, PWM, Boost converter, Loss Analysis, Current mode

### 1. 서론

최근 휴대폰, 스마트워치, 노트북, PDA와 같은 스마

트기기의 수요가 크게 증가되었고 보편화 되고 있다. 이러한 스마트 기기에 전원을 공급해주는 역할로 가장 널리 사용되는 회로는 DC-DC 변환기이다 [1-2]. DC-DC

본 논문은 2015년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2014H1C1A1066686)

\*Corresponding Author : Han Jung Song (Inje University)

Tel: +82-55-320-3873 email: hjsong@inje.ac.kr

Received March 17, 2016

Revised (1st May 13, 2016, 2nd May 31, 2016, 3rd June 1, 2016)

Accepted June 2, 2016

Published June 30, 2016

변환기는 입력과 출력 사이에 DC 절연을 위한 고주파 트랜스포머의 유무에 따라 크게 절연형 변환기와 비절연형 변환기로 나누어지며 회로는 기본적으로 주스위치와 환류 다이오드, 2차의 저역 통과 필터인 LC 필터로 이루어진다. 그림 1에 종래의 변환기가 적용된 스마트기기 및 전자기기들을 나타내었다.

이러한 현대의 스마트기기들은 하나의 디바이스에 카메라, LED, 블루투스 장치 등 여러 가지 기능들을 내장하고 있다 [3-4].

이에 따라 각 기능에 맞는 다양한 출력전압이 요구되며 각 전압변화에도 출력전압이 안정적으로 공급 될 수 있도록 설계되어야 한다. 그러므로 컨버터를 구성하고 있는 각 소자들이 컨버터 출력 값과 안정성에 미치는 영향을 정확히 분석하고 시뮬레이션 결과 값과 실제 설계된 컨버터의 동작을 비교 분석하는 과정이 필요하다 [5-6].

본 논문에서는 TI사의 LM3481을 사용하여 스마트기기를 위한 5 V 입력, 12 V 출력전압을 가지는 승압형 컨버터를 설계하고 이를 구성하는 소자의 값을 변화시키기에 따라 컨버터의 출력전압 및 안정성에 미치는 영향을 분석하고 실제 보드로 구성하여 시뮬레이션 결과와 실제 측정결과를 비교 분석하였다.



Fig. 1. Using of DC-DC converters in various applications

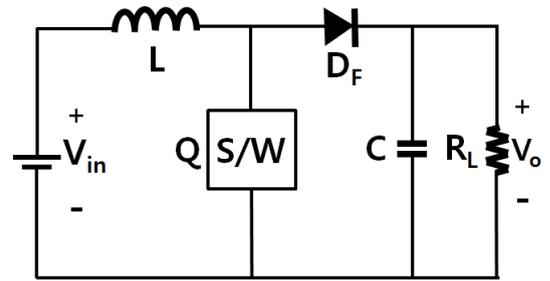
## 2. LM3481 칩을 이용한 12 V 승압형 변환기 설계

### 2.1 승압형 변환기 동작원리

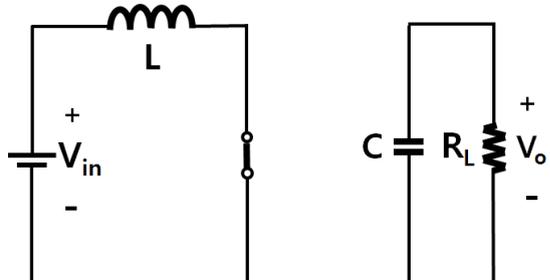
그림 2-(a)는 승압형 DC-DC 변환기의 기본회로도이

다. 회로는 인덕터, 커패시터, 다이오드를 포함한다. 그림 2-(b)에서 트랜지스터가 ON이 되면 입력으로부터 전류가 인덕터와 커패시터를 흐르면서 인덕터에 에너지가 축적된다. 환류다이오드(D)에는 역바이어스가 되어 OFF가 되고 커패시터는 부하저항(R)을 통하여 방전하게 된다.

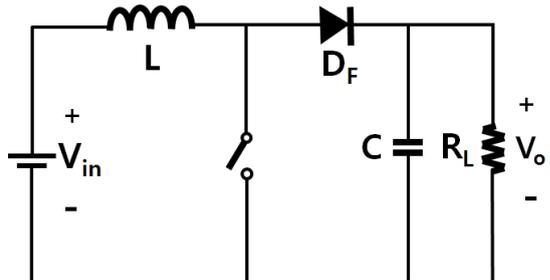
그림 2-(c)에 트랜지스터가 OFF가 되면 인덕터(L)에 축적되었던 에너지가 환류다이오드(D)를 통하여 출력측으로 방출하게 되며 스위칭 주기( $T_s$ )를 한 주기로 하여 이 동작이 반복된다 [7-8].



(a) circuit structure



(b) Q : ON ( $0 \leq t \leq DT_s$ )



(c) Q : OFF ( $DT_s \leq t \leq Ts$ )

Fig. 2. Basic boost converter circuit

### 2.2 스마트기기에용 승압형 변환기

그림 3에 승압형 컨버터의 기본구조를 나타내었다. 설계는 TI사의 LM3481 진행하였다.

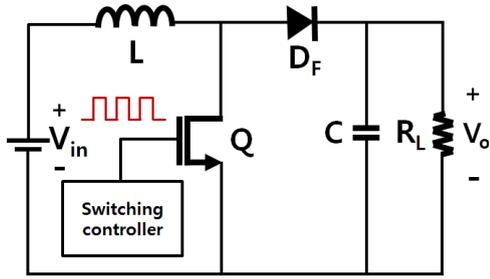


Fig. 3. Block diagram of the proposed boost converter

그림 4에 승압형 컨버터의 전체 회로도를 나타내었다. 그림에서 Q1은 Power MOS 스위칭 트랜지스터이며, L과 C는 각각, 에너지 저장을 위한 인덕터와 커패시터를 나타낸다. 입력 Vin 전압이 인가되면 변환기 출력은 저항 R1과 R2의 귀환에 의해, 스위칭 트랜지스터에 의해 조절이 된다. 제어기 (controller)는 T1의 LM3481칩을 사용하였다. 입력전압은 스마트기기의 배터리 전압과 동일한 5 V 입력을 가지고 12 V 출력전압을 가지도록 설계하였다.

본 논문에서는 제안하는 변환기의 각 회로요소의 변화에 따른 특성변화를 분석하였다.

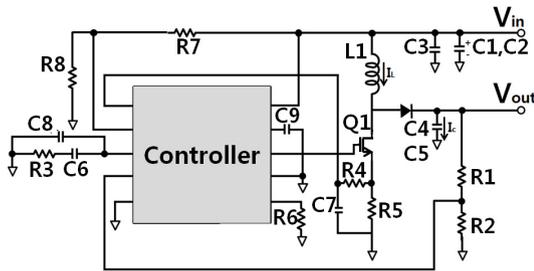


Fig. 4. Circuit schematic of the proposed converter

2.3 인덕터 전류

인덕터는 컨버터를 구성하는 에너지 저장소자 중 하나이다. 그림 5에 스위칭 주기 동안의 인덕터 변화를 나타내었다.

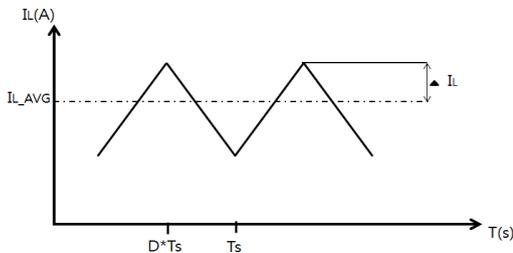


Fig. 5. Inductor current variation

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

(1)식에서, 부스트 컨버터의 정상상태에서 인덕터에 걸리는 전압은 인덕터에 흐르는 전류변화율에 비례한다. 식 1에서  $V_L(t)$ 이 일정하면  $di_L(t)/dt$  역시 일정해야 한다. 따라서 부스트 컨버터의 정상상태에서 출력전압이 평균값  $V_{out}$ 과 같음을 알 수 있다.

$$L = \frac{V_{IN} \times (V_{out} - V_i)}{\Delta I_L \times f_s \times V_{out}} \dots\dots\dots (2)$$

일반적으로 인덕터 값이 높을수록 감소된 리플 전류로 인해 최대 출력전류가 높아지며 인덕터 값이 낮을수록 크기는 작아지며 전류가 인덕턴스의 감소에 따라 증가하기 때문에 이를 식 2와 같이 나타내었다 [9].

2.4 출력 커패시터

출력 커패시터는 승압형 컨버터에서 인덕터가 충전하는 동안 출력 단에 출력 전류를 전달하는 역할을 한다. 출력 커패시터는 최대 실효값(RMS) 전류를 고려하여 계산한다. 출력 커패시터의 실효값(RMS)은 식 3에 나타내었다 [10].

$$C_{OUT}(s) = \frac{I_{out}}{F_s \times \Delta V_{out}} \dots\dots\dots (3)$$

- $C_{out}$  = 최소 출력 커패시턴스
- $I_{out}$  = 최대 출력 전류
- $D$  = Duty cycle
- $F_s$  = switching frequency
- $\Delta V_{out}$  = 출력 전압 ripple

Duty cycle(D)은 식 4와 같이 나타낸다.

$$D = \frac{V_{Out} - V_{IN}}{V_{Out}} \dots\dots\dots (4)$$

3. SPICE를 활용한 승압형 변환기를 구성하는 소자 값의 변화에 따른 최적화 및 안정성 테스트

그림 6은 제안하는 승압형 컨버터의 시뮬레이션 결과

를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 약 1.5 ms 후 부터는 입력전압이 5 V 일 때 출력전압이 12 V가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

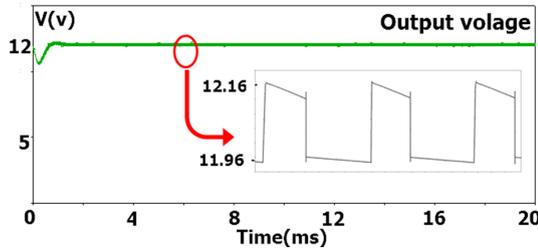


Fig. 6. Simulation result of output voltage

표 1에 컨버터의 목표 스펙과 시뮬레이션 결과 값을 나타내었다. 입력전압은 5 V를 인가하였을 때 출력 값은 12 V를 이며, 인덕터와 커패시터는 계산결과에 의해 각각 7.8  $\mu$ H, 100  $\mu$ F로 설정하였다. 출력전류는 1.5 A 이다.

Table 1. summary table of the dc-dc boost converter

Parameter	Proposed spec	Simulation Results	Units
Supply voltage	5		V
Output voltage	12		V
Output voltage ripple	180 mV	200 mV	mV
Load current	1.5	1.49	mA
Switching frequency	0.1 ~ 1	1	MHz
Duty ratio	0.85 이내	0.67	-

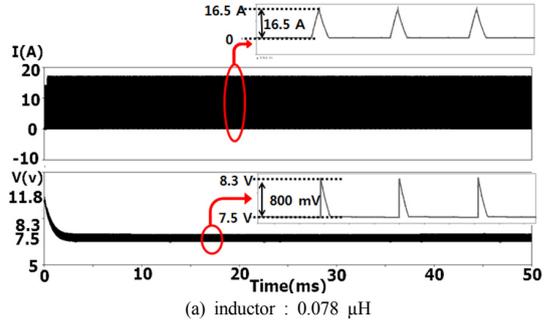
표 1에 나타난 계산 값과 시뮬레이션 결과를 통하여 오차를 나타내고 오차를 줄이기 위하여 커패시터와 인덕터의 값을 변화하며 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 7-(a)는 인덕터가 0.078  $\mu$ H 일 때의 출력전압 및 인덕터 전류 파형을 나타내었다. 인덕터 전류 0 ~ 16.5 A의 전류를 가지고 7.5 ~ 8.5 V의 출력전압을 얻었다. 7-(b)는 인덕터가 7.8  $\mu$ H 일 때 인덕터 전류가 3.3 ~ 4.5 A를 가지고 11.96 ~ 12.16 V의 출력전압을 얻었다. 7-(c)는 인덕터가 78  $\mu$ H 일 때 인덕터 전류가 3.8 ~ 4.1 A를 가지고 11.95 ~ 12.15 V의 출력전압을 얻었다.

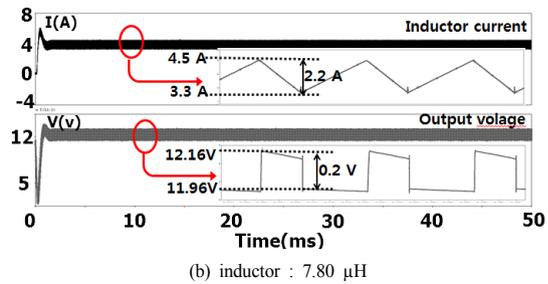
그림 7-(c)처럼 인덕터의 크기를 10배 이상 차이가 나도록 모의실험을 한 결과 출력전압의 리플의 변화가 없는 것을 확인하였다.

12 V의 안정된 출력전압을 갖는 인덕터 소자의 값과

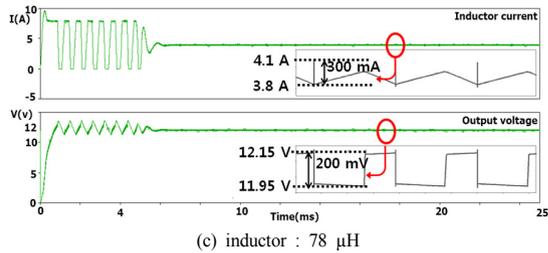
스마트기기용을 위한 적절한 인덕터 소자크기의 트레이드 오프 결과 인덕터 소자의 값이 7.8  $\mu$ H 일 때 가장 최적화 된 값을 가진다.



(a) inductor : 0.078  $\mu$ H



(b) inductor : 7.80  $\mu$ H



(c) inductor : 78  $\mu$ H

Fig. 7. Output variation according to inductor value

이상적인 인덕터의 값 7.8  $\mu$ H을 잡고 인덕터의 값에 따른 커패시터의 값을 확인하였다.

그림 8-(a)는 커패시터가 1  $\mu$ F 일 때 DC-DC 승압형 변환기의 출력전압 및 커패시터에 흐르는 출력전류의 시뮬레이션 결과이다. 커패시터에 0 ~ 8.2 A의 전류가 흐르고 4.5 ~ 18.5 V의 출력전압을 얻었다. 그림 8-(b)는 커패시터가 100  $\mu$ F 일 때는 커패시터에 0.75 ~ 1.45 A의 전류가 흐르고 11.96 ~ 12.16 V의 출력전압을 얻었다. 그림 8-(c)는 커패시터가 500  $\mu$ F 일 때는 커패시터에 3.3 ~ 4.5 A의 전류가 흐르고 12 ~ 12.2 V의 출력전압을 얻었다.

그림 8-(c)처럼 커패시터의 크기를  $500\mu\text{F}$ 으로 모의실험을 한 결과 출력전압의 리플의 변화가 없는 것을 확인하였다.

12 V의 안정된 출력전압을 갖는 커패시터의 값과 커패시터의 트레이드 오프 결과 커패시터의 값이  $100\mu\text{F}$ 일 때 가장 최적화 된 값을 가진다.

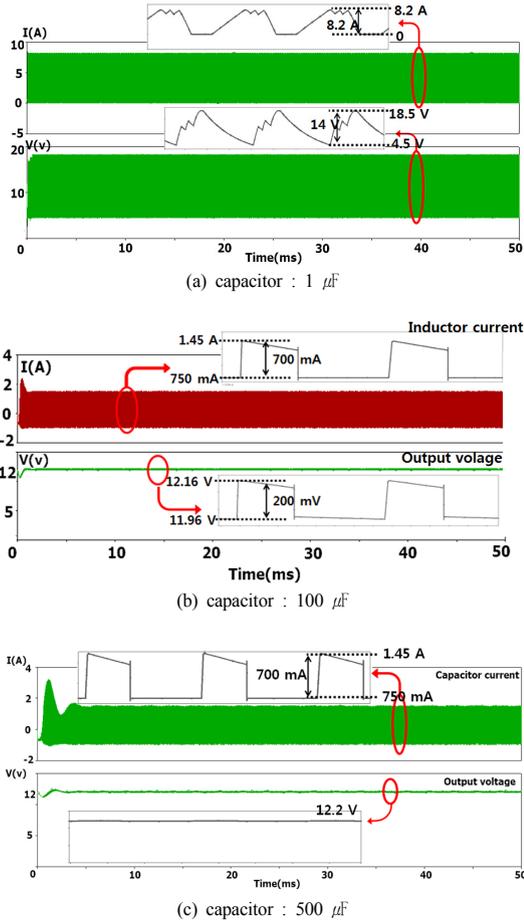


Fig. 8. Output variation according to capacitor value

인덕터의 값을  $0.078\mu\text{H}$  일 때 부터  $78\mu\text{H}$ 까지 측정하면서 인덕터 값에 따른 출력 전압을 측정하였다. 인덕터 값이  $7.80\mu\text{H}$ 일 때, 인덕터 전류에 따른 출력전압이 안정되게 바뀌었고 이후의 인덕터 값을 크게 하였을때 변화가 미비함을 확인하였다. 그리고 이러한 인덕터 값을  $7.80\mu\text{H}$ 로 고정한 후 커패시터의 값을 변화를 준 결과  $100\mu\text{F}$ 에서 가장 안정된 출력값을 가지게 되었다.

#### 4. 이상적인 커패시터 및 인덕터 소자로 구성된 승압형 변환기의 회로 구현 및 테스트

그림 9는 TI사의 LM3481 칩을 사용하여 PCB 회로를 구현한 것이다.

회로에 사용된 회로요소들의 값들은 표 2에 나타내었다.

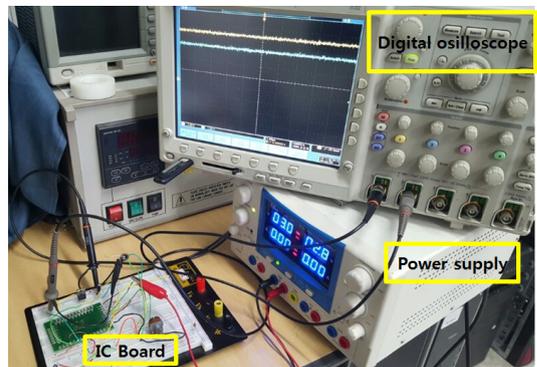
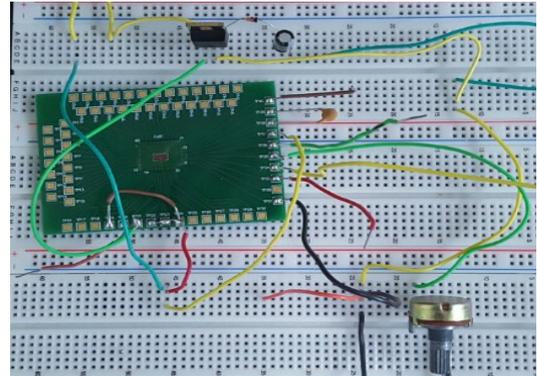


Fig. 9. Implementation of the proposed DC-DC boost converter

Table 2. Summary of circuit elements

Terms	Value
C1,C2	$100\mu\text{F}$
C3	$0.47\mu\text{F}$
C4,C5	$100\mu\text{F}$
C6	$390\text{pF}$
C7	$2200\text{pF}$
C8	$390\text{pF}$
C9	$1\mu\text{F}$
C11	$1\mu\text{F}$

R1	169 kΩ
R2	20 kΩ
R3	1.37 kΩ
R4	100 Ω
R5	20 mΩ
R6	61.9 kΩ
R7,R8	121 kΩ
L1	7.8 μF
D1	4 A
Q1	

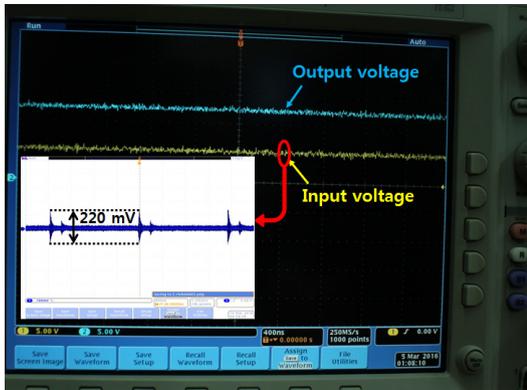


Fig. 10. Measured results of the DC-DC converter with digital oscilloscope

그림 10에 PCB회로에 5 V의 입력전압 인가시 12 V의 출력전압에 측정됨을 보였다.

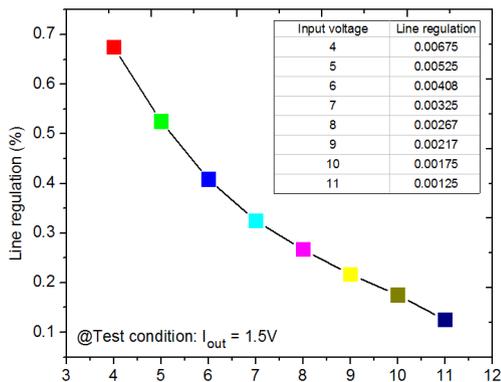


Fig. 11. Measured results of the line regulation

그림 11은 구상한 회로에서 입력전압을 4 V에서 11 V까지 1 V 간격으로 변화를 주었을 때 측정된 라인 레귤레이션(line regulation)으로 나타내었다.

입력전압을 변화시켰을 때 라인 레귤레이션(line regulation) 비가 0.67 %에서 0.12 %까지 줄어드며 안정화 되는 것을 확인하였다.

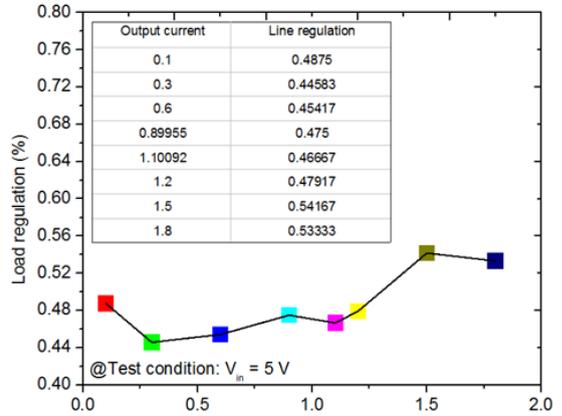


Fig. 12. Measured results of the load regulation

그림 12는 부하(load) 저항값의 변화에 따른 출력전압의 변화를 측정한 결과이다. 입력 전압을 5 V 일 때의 로드 값을 줄여가며 출력 전류를 0.1 A 에서 1.8 A 까지 변화를 주었을 때 로드 레귤레이션(load regulation) 수치가 적게 일어나므로 입력전압의 안정한 것을 확인하였다.

## 5. 결론 및 추후 연구 방향

본 논문에서 스마트기기를 위한 12 V 승압형 PWM DC-DC 변환기 설계 및 특성을 해석하였다. Texas Instruments사의 LM3481 상용칩을 사용하여 최적화된 회로를 구현하였다. 입력전압이 5 V일 때 출력전압이 12 V로 나타나는 것을 확인하였고, 인덕터 값을 변화시켜 주었을 때 값이 작아질수록 리플 전류가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 또한 커패시터 값이 커질수록 리플 전류가 줄어드는 것을 확인하여 최대 효율값을 가지는 값들을 알아보았다. 또한 실험용 보드는 TI 사의 LM3481칩, 파워트랜지스터, 각종 저항과 커패시터 등을 사용하여 구현하였고 회로의 특성을 하드웨어로 구현했을 때와 모의실험 결과가 일치함을 확인하였다.

본 논문의 DC-DC 변환기는 스마트기기의 고효율 구동에 유용하게 활용될 것으로 사료된다.

## References

- [1] L. M. Piao, "A study on Design of PMIC of SEPIC/BOOST Topology with Integrated current sensing circuit", Inha University Master degree , 2011.
- [2] J. K. Kim, "Design of high-efficiency Buck DC-DC converter for reduction of control circuit loss," Hanyang University Master degree, 15-16, 2011.
- [3] Xiaoming Duan, Haifei Deng, Nick X. Sun, Alex Q. Huang, Dan Y. Chen " A High Performance Intergrated Boost DC-DC converter For Portable Power Supply" 13-17, IEEE 2004.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/APEC.2004.1295950>
- [4] Eric Magne Solie, "Soft Start Precharge Circuit for DC Power Supply," U.S. Patent 6 998 829, 2006.
- [5] K. Jung, J. Lim, J. Park, H. Yang "A High Efficiency CMOS DC-DC Boost Converter with Current Sensing Feedback", IEEE Tran. Circuits and systems, 1-3, 2005.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MWSCAS.2005.1594437>
- [6] Said Oucheriah, Liping Guo, "PWM-Based Adaptive Sliding-Mode Control for Boost DC -DC Converters," IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 60, no. 8, pp. 3291-3294, 3292-3293, 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2012.2203769>
- [7] Gabriel A, Rincon-Mora, Philip E. Allen, "A Low-Voltage, Low Quiescent Current, Low Drop-Out Regulator", IEEE Journal of Solid-state Circuits, Vol. 33, 36-44, No. 1, Jan 1998.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/4.654935>
- [8] C. F. Lee, Philip K. T. Mok, "A Monolithic Current-Mode CMOS DC-DC Converter With On-Chip Current-Sensing Technique", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 39, No. 1, 3-14, Jan 2004.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSSC.2003.820870>
- [9] Y. Katayama, S. Sugahara, H. Nakazawa, M. Edo, "High-Power-Density MHz-Switching monolithic DC-DC Converter with Thin-Film Inductor", 1485-1490, IEEE 2000.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PESC.2000.880526>
- [10] D. M Bellur, M. K. Kazimierzuk, "DC-DC Converters for Electric Vehicle Applications", 286-293, 1-3, IEEE 2007.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EEIC.2007.4562633>

## 나 재 훈(Jae-hun Na)

[준회원]



- 2014년 2월 : 인제대학교 나노융합공학부 (공학사)
- 2014년 9월 ~ 현재 : 인제대학교 나노융합공학과 재학중

&lt;관심분야&gt;

반도체, 회로설계, 소자

## 송 한 정(Han-Jung Song)

[정회원]



- 1986년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학사)
- 1988년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학박사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 인제대학교 나노공학부 정교수

&lt;관심분야&gt;

반도체 소자 신뢰성 및 회로설계