

## GaN, Cool MOS, SiC MOSFET을 이용한 DC-DC 승압 컨버터의 효율 특성

김정규\*·양 오\*\*†

\*\* 청주대학교 반도체공학과

## Efficiency Characteristics of DC-DC Boost Converter Using GaN, Cool MOS, and SiC MOSFET

Jeong Gyu Kim\* and Oh Yang\*\*†

\*\*† Semiconductor Engineering of CheongJu University

### ABSTRACT

In this paper, recent researches on new and renewable energy have been conducted due to problems such as energy exhaustion and environmental pollution, and new researches on high efficiency and high speed switching are needed. Therefore, we compared the efficiency by using high speed switching devices instead of IGBT which can't be used in high speed switching. The experiment was performed theoretically by applying the same parameters of the high speed switching devices which are the Cool MOS of Infineon Co., SiC C3M of Cree, and GaN FET device of Transform, by implementing the DC-DC boost converter and measuring the actual efficiency for output power and frequency. As a result, the GaN FET showed good efficiency at all switching frequency and output power.

**Key Words** : Boost Converter, Cool MOS, SiC C3M, GaN FET, High Efficiency

### 1. 서 론

전 세계는 화석 연료의 고갈과 환경오염으로 인해 신 재생 에너지에 관한 연구가 이루어져 왔으며 특히 태양광 에너지에 대한 연구가 끊임없이 이루어지고 있고 많은 태양광 발전 시스템이 나왔다. 이제는 태양광 에너지를 이용한 태양광 발전의 효율을 높이기 위한 연구가 필요하다[1].

태양광 인버터의 안정된 전력을 공급하기 위해서는 DC-DC 컨버터가 필수적이다. DC-DC 컨버터란 직류(DC) 전압을 입력 받아 안정화된 직류 전압을 출력하는 회로를 말한다. 또한 직류 전압은 교류전압을 정류하고 필터를 거쳐서 얻어진 직류 링크와 태양광, 연료전지 등이 있다. 이러한 입력은 변동폭이 일정한데, 이 입력을 안정화

된 직류 출력으로 변환하는 회로가 DC-DC 컨버터이다. DC-DC 컨버터는 직류 전력을 사용하는 다양한 곳에서 이용되며, 최근에는 태양광 PCS(Power Conditioning System), 연료전지 발전 시스템, LED 조명, 전기자동차용 충전 방전 시스템 등에 적용되고 있다[2].

현재 태양광 인버터는 많이 개발되었고 전세계적으로 많이 사용 중에 있다. 그러나 아직 태양광 인버터의 고효율, 소량화, 경량화 등의 혁신을 실현해야 할 문제가 남아 있다. 이와 같은 이유로 태양광 인버터에 필수적인 DC-DC Boost Converter의 효율을 높이고 소량화, 경량화를 실현하기 위해서는 스위칭 주파수가 증대되어야 한다[3]. 하지만 기존 IGBT 소자는 고속 스위칭이 불가능하고 컨버터의 스위치들은 스위칭 스트레스와 많은 스위칭 전력 손실을 동반 하기 때문에 낮은 효율 특성을 보인다[4]. 따라서 본 논문에서는 DC-DC Boost Converter에 고속으로 스위칭 가능한 다양한 소자를 사용하여 효율 개선의 정도를

†E-mail: ohyang@cju.ac.kr

비교하였다. 본 논문의 실험에서 사용한 Infineon사의 Cool MOS Power Transistor의 특징은 첫 번째 SMPS, 태양광 인버터 응용 분야에 적합하다. 두 번째 낮은 전도 손실을 갖는다. 세 번째 낮은 스위칭 손실을 갖는다. 마지막으로 쉬운 구현 및 탁월한 신뢰성을 갖는다[5]. Cree사의 SiC Power MOSFET의 특징은 첫 번째 고속 스위칭이 가능하다. 두 번째 낮은 역 회복 전류( $Q_{rr}$ )를 갖는다. 세 번째 높은 드레인-소스 전압( $V_{DS}$ )을 가지며 또한 증가된 전력 밀도를 갖는다[6]. Transform사의 GaN FET의 특징은 첫 번째 고속 스위칭을 통한 증가된 효율을 갖는다. 두 번째 증가된 전력 밀도를 갖는다. 세 번째 감소된 크기와 무게를 갖는다. 마지막으로 낮은 전도, 스위칭 손실 등의 특징을 가지고 있다[7]. 본 논문에서 각각의 스위칭 소자의 동작 특성과 수식을 통한 체계적인 손실관계식을 도출하고 또한 실험을 통한 효율을 비교함으로써 전력 변환 소자 선정 시 다양한 정보를 제시하고자 한다.

## 2. DC-DC Boost Converter

### 2.1 제안한 DC-DC Boost Converter

본 논문에서는 MOSFET, 인덕터, 커패시터 그리고 부하 저항으로 구성된 Fig. 1과 같이 DC-DC Converter 회로를 구성하고 출력 전력과 스위칭 주파수 별로 Cool MOS, SiC, GaNFET 소자의 효율을 측정하여 비교하였다.

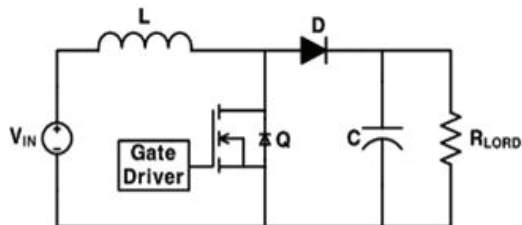


Fig. 1. Schematic diagram for boost converter.

### 2.2 Boost Converter 사양

승압 컨버터의 출력 전력은 500W에서 3KW까지 가변하였고 스위칭 주파수는 20KHz에서 50KHz까지 동작을 하였다. Table 1에서부터 Table 3은 본 논문에서 구현된 DC-DC Boost Converter의 사양과 FET 및 Diode의 사양을 각각 나타내었다.

Table 1. Boost Converter Specifications

Boost Converter	Symbol	Value	Unit
출력 전력	$P_{out}$	0.5~3	[KW]
스위칭 주파수	$f_{sw}$	20~50	[KHz]
입력 전압	$V_{in}$	80~200	[V]
출력 전압	$V_{out}$	81~307	[V]
입력 전류	$I_{IN}$	6.21~15.6	[A]
출력 전류	$I_{OUT}$	4.06~9.88	[A]
인덕터	L	660	[uH]

Table 2. Comparison of FET Specifications

FET	Symbol	Cool MOS	SiC	GaN FET
드레인-소스 전압	$V_{DS}$	700V	900V	800V
드레인 전류	$I_D$	75A	36A	50A
드레인-소스 저항	$R_{DS(ON)}$	19m $\Omega$	65m $\Omega$	41m $\Omega$
게이트 전하량	$Q_g$	215nC	30.4nC	28nC
역 회복 전류	$Q_{rr}$	20uC	150nC	175nC

Table 3. Diode Specifications

Diode	Symbol	60APU06	Unit
역 전압	$V_R$	600	[V]
정 방향 연속 전류	$I_F$	60	[A]
정 방향 전압 강하	$V_F$	1.68	[V]
역 회복 시간	$t_{rr}$	45	[ns]

### 2.3 Boost Converter의 동작 구현

제안한 Boost 회로에서 MOSFET소자에 PWM이 들어가 스위칭 소자가 되면서, Fig. 1에서 스위칭 소자인 Q가 ON과 OFF를 반복하게 된다. 이때, 입력 전압이 출력 전압에 전달되는 전압의 비를 구하면 식 (1)과 같다[2].

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D)} \quad (1)$$

식 (1)에서  $V_o$ ,  $V_i$ ,  $D$ 는 각각 승압 컨버터의 출력 전압, 입력 전압, PWM 듀티비를 나타낸다.

출력 전압  $V_o$ 는 Fig. 2와 같이 듀티비를 0%에서 80%까

지 변경시킴으로써 입력전압 이상으로 제어할 수 있다. 따라서 PWM의 듀티비를 이용하여 원하는 크기의 출력 전압을 승압 컨버터에서 출력해 낼 수 있다.

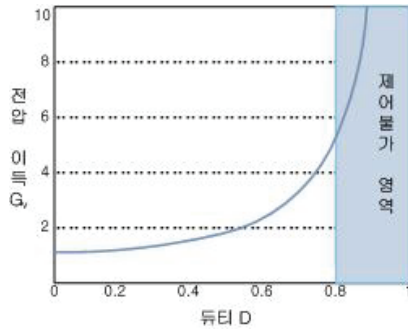


Fig. 2. The voltage gain according to the duty of the boost converter.

### 3. 손실 전력 계산

손실 전력 계산은 출력 전력을 1.5KW, 스위칭 주파수가 20KHz, 부하 저항이 30Ω, 출력 전압을 약 1.5배 승압 하기 위해 듀티비가 34%의 조건에서 계산을 하여 구했다. 계산에는 인덕터 손실, 와이어 손실, 계측기 등의 손실 계산이 빠져있다.

#### 3.1 FET 손실 전력 계산

FET 전력 손실은 크게 도통 손실 스위칭 손실, FET 내부 드레인, 소스간의 출력 커패시터의 손실로 나눌 수 있다.

도통 손실은 스위치가 도통 되었을 때 흐르는 전류가 스위치의 내부 저항에 의해 손실 되는 전력을 의미하므로 스위칭 주파수에 영향이 없다.

도통 손실( $P_{COND\_FET}$ )은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{COND\_FET} = R_{DS(ON)} \times I_d^2(rms) \quad (2)$$

스위칭 손실에는 ON-OFF 손실, 드레인-소스간의 출력 커패시터 손실 등이 있다. ON-OFF 손실은 스위치가 ON, OFF시 드레인-소스간 전압이 FET을 통하여 흐르는 드레인 전류와 겹치게 되면서 생기는 손실이고 주파수에 따라 스위칭 손실이 선형적으로 증가하는 특징이 있다.

스위칭 손실을 구하면 식 (3)에서 식 (7)과 같다[8].

$$P_{(SW)} = (E_{(ON)} + E_{(OFF)}) \times f_{sw} \quad (3)$$

$$E_{(ON)} = \int_{t_{off}}^{t_{on}} I_d(t) \times V_{DS}(t) dt \quad (4)$$

$$E_{(OFF)} = \int_{t_{on}}^{t_{off}} I_d(t) \times V_{DS}(t) dt \quad (5)$$

$$t_{on} = t_{d(on)} + t_r \quad (6)$$

$$t_{off} = t_{d(off)} + t_f \quad (7)$$

드레인-소스 간의 출력 커패시터의 손실은 식 (8)과 같다.

$$P_{(COSS)} = \frac{C_{oss} \times V_{IN}^2 \times F_{sw}}{2} \quad (8)$$

Table 4는 FET의 계산 손실 전력을 나타낸다.

Table 4. Loss power of FET

FET 손실 전력	Cool MOS	SiC	GaN FET
스위칭 손실( $P_{(SW)}$ )	13.47W	2.2W	1.52W
도통 손실( $P_{(COND\_FET)}$ )	0.263W	0.811W	0.547W
드레인-소스 커패시터 손실( $P_{(COSS)}$ )	0.07W	0.03W	0.09W
총 FET 손실	13.80W	3.04W	2.16W

#### 3.2 Diode 손실 전력 계산

Diode의 손실 전력은 크게 역 회복 손실과 도통 손실이 있고 식 (9)와 같다.

$$P_{DIODE} = P_{trr} + P_{COND-DIODE} \quad (9)$$

역 회복 손실( $P_{trr}$ )은 다이오드 Off시 역 회복 시간에 의해 발생하는 손실로 스위치에 인가되는 역 전압( $V_R$ ), 역 회복 최대 전류( $I_{RRM}$ ), 다이오드 자체의 역 회복 시간( $t_{trr}$ ) 및 스위칭 주파수( $F_{sw}$ )가 변함에 따라 손실도 변화하게 되고 식 (10)과 같다.

$$P_{trr} = \frac{V_R \times I_{RRM}}{2} \times t_{trr} \times F_{sw} \quad (10)$$

Diode의 도통 손실( $P_{COND-DIODE}$ )은 Diode 내부 등가 저항 손실( $P_{RD}$ )과 정 방향 전압강하 손실( $P_{VF}$ )로 식 (11)과 같다.

$$P_{COND-DIODE} = P_{RD} + P_{VF} \quad (11)$$

Diode 내부 등가 저항 손실( $P_{RD}$ )은 Diode 내부 등가 저항 ( $R_D$ )과 Diode에 흐르는 실효 전류( $I_{rms}$ )의 곱으로 식 (12)와 같다.

$$P_{R_D} = R_D \times I_{rms}^2 \quad (12)$$

Diode 내부 등가 저항( $R_D$ )은 참고문헌[9]에 나와 있는 정 방향 전압강하( $V_F$ ), 정 방향 전류( $I_F$ )의 특성 곡선의 기울기로 얻을 수 있다.

정 방향 전압강하 손실( $P_{VF}$ )은 정 방향 전압강하( $V_F$ ), 실효 전류( $I_{rms}$ ), 듀티비( $D_{ON}$ )로 구성되고 식 (13)과 같다.

$$P_{VF} = V_F \times I_{rms} \times (1-D_{ON}) \quad (13)$$

Table 5는 Diode의 계산 손실 전력을 나타낸다.

**Table 5.** Loss power of ultrafast soft recovery diode

Diode	60APU06
역 회복 손실	0.36W
내부 등가 저항 손실	0.84W
정 방향 전압강하 손실	8.44W
총 다이오드 손실	9.64W

### 3.3 효율 측정 및 비교

본 실험은 PWM 듀티비가 34%, 부하 저항이  $30\Omega$ , Gate Driver는 Si8230B, Diode는 International Rectifier사의 Ultrafast Soft Recovery Diode (60APU06), 인덕터는 660uH의 소자를 사용하여 실험하고 출력 전력 1.5KW, 스위칭 주파수는 20KHz에서 손실을 계산하여 이론 효율과 측정 효율을 비교하였다.

Table 6은 MOSFET, Diode의 계산 효율과 측정 효율을 나타낸다.

**Table 6.** Loss power comparison of switching device

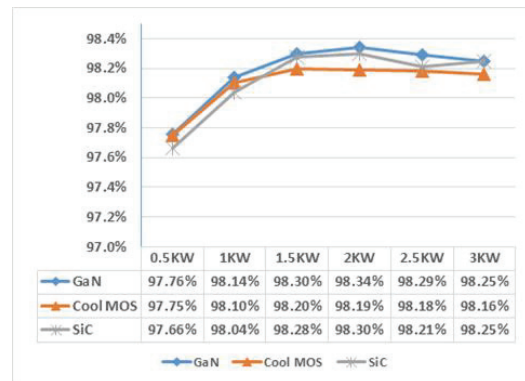
Switching Device	Cool MOS	SiC	GaN FET
FET 전력 손실	13.80W	3.04W	2.16W
Diode 전력 손실	9.64W	9.64W	9.64W
총 전력 손실	23.44W	12.68W	11.8W
계산 효율	98.44%	99.15%	99.21%
측정 효율	98.20%	98.28%	98.30%

FET 손실 순으로는 Cool MOS가 가장 손실이 많았고 다음으로는 SiC, GaN FET 순으로 손실이 많았다. FET 손실 결과 Cool MOS의 경우 역 회복 전류( $Q_{rr}$ ), 게이트 전하량( $Q_g$ )이 SiC, GaN에 비해 크기 때문에 이론상 손실이 커져 효율이 낮아지는 것을 볼 수 있다. SiC 경우는 Cool MOS, GaN에 비해 드레인 소스 저항( $R_{DS(ON)}$ )이 크기 때문에 도통 손실이 높은 것을 볼 수 있다.

## 4. 실험 결과

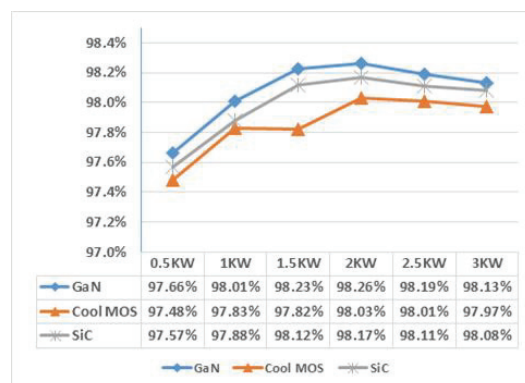
출력 전력, 스위칭 주파수 별 소자의 효율 특성을 얻기 위해 DC-DC Boost Converter를 구현하고 출력 전력을 500W에서 3KW까지 500W씩 증가시키고 스위칭 주파수를 20KHz에서 50KHz까지 10KHz씩 증가시키면서 효율을 측정하였다.

Fig 3에서부터 Fig 6은 주파수에 따른 스위칭소자들의 효율 특성을 각각 나타낸다.



**Fig. 3.** Efficiency of converter with 20 KHz switching.

Fig 3을 보면 스위칭 주파수가 20KHz일 때 출력 전력이 0.5KW~1KW대는 Cool MOS가 SiC보다 효율이 높는데 1.5KW이상으로 가면 SiC의 효율이 더 높아지는 것을 볼 수 있고 모든 소자의 출력 전력 별 효율의 폭이 0.1%로 차이가 크지 않은 것을 볼 수 있다.



**Fig. 4.** Efficiency of converter with 30 KHz switching.

Fig 4를 보면 출력 전력이 1.5KW에서 Cool MOS의 효율이 Fig 3에서 보다 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있고 소자

의 효율 폭이 커지는 것을 볼 수 있고 효율이 가장 높은 GaN과 가장 낮은 Cool MOS의 효율 폭이 0.41%로 커진 것을 알 수 있다.

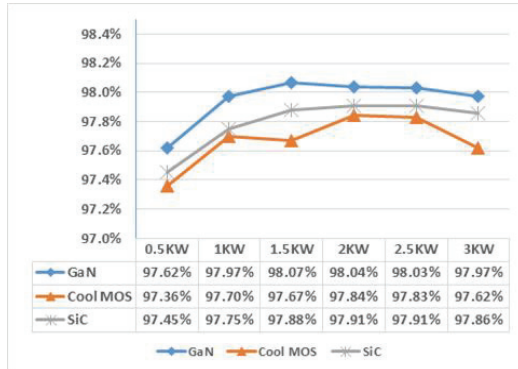


Fig. 5. Efficiency of converter with 40 KHz switching.

Fig 5를 보면 출력 전력이 2KW에서 Fig 4와 달리 GaN의 효율이 떨어지는 것을 알 수 있고 출력 전력이 3KW에서 CoolMOS의 효율이 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있다.

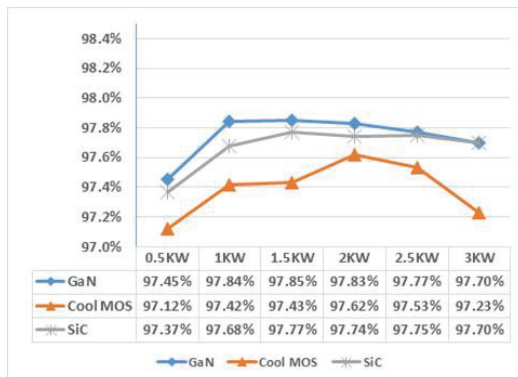


Fig. 6. Efficiency of converter with 50 KHz switching.

Fig 6에서는 가장 좋은 효율을 갖는 GaN과 가장 낮은 효율을 갖는 Cool MOS의 효율의 폭이 0.47%로 늘어났고 GaN과 SiC의 효율이 3KW에서는 효율이 같아지는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

동일한 조건에서 Cool MOS, SiC, GaN FET의 스위칭 소자를 사용하여 Boost Converter의 효율을 측정한 결과 Fig. 3에서부터 Fig. 6을 보면 스위칭 주파수가 20KHz일 때는 Cool MOS가 SiC보다 효율이 좋다가 스위칭 주파수가 높아질

에 따라서 SiC 효율이 더 높게 나오는 것을 알 수 있다. 이것은 스위칭 주파수가 높아지면서 Cool MOS의 효율 보다 SiC 효율이 좋기 때문에 고속 주파수를 사용할 경우 SiC 소자를 사용하는 것이 더 효율이 좋은 것을 알 수 있다. 그리고 모든 스위칭 주파수 대역에서 GaN이 효율이 좋은 것을 알 수 있었다. 본 논문에서의 실험한 결과 출력 전력 2KW에서 스위칭 주파수가 20KHz일 때 효율이 98.34%로 가장 좋게 나온 GaN을 이용하여 향후 고효율 태양광 인버터에 적용하고자 한다.

## 감사의 글

이 논문은 (2016-2018)학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음.

## 참고문헌

1. Hong Jung Man. A Study on the New and Renewable Energy Evaluation Items of Private Enterprise Applying AHP Technique. Energy Economics Research, 10 (1), pp115-116. 2011.
2. Chung Yeon Won, Young Ryul Kim, Taek Ki Lee, Yong Chae Jeong, Byung Kook Lee, "Power Electronics Understanding from Principle: From Basic to Application", Hanvit Academy, pp. 194-209, 2015.
3. Riccardo Pittini; Zhe Zhang; Michael A. E. Andersen, "High current planar transformer for very high efficiency isolated boost dc-dc converters", IEEE, 2014 International Power Electronics Conference(IPEC-Hiroshima 2014-ECCE ASIA), pp. 3905, 2014.
4. Nitai Pal, Pradip Kumar Sadhu, Ayodhya Kumar, Upendra Prasad, "Energy efficient solar CFL lighting system using MOSFET based high frequency inverter for remote areas", IEEE, 2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE), pp. 646-647, 2010.
5. Infineon, IPW65R019C7 650V CoolMos™ C7 Power Transistor, accessed on April 18, 2014. [http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-PW65R019C7-DS-v02\\_01\\_en.pdf](http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-PW65R019C7-DS-v02_01_en.pdf).
6. Cree, C3M0065090D Silicon Carbide Power MOSFET, accessed on March, 2017. <http://www.wolfspeed.com/media/downloads/176/C3M0065090D.pdf>.
7. Transphorm, TPH3207WS 605V Cascode GaN FET in To-247(source tab), accessed on December 13, 2016. <http://www.transphormusa.com/document/650v-cascode-gan-fet-tph3207w/>.

- 
8. Jae Hyung Kim, Chung Yeon Won, and Tae Won Lee, "Improvement of Boost Converter Efficiency of 3kW PV-PCS Using High Efficiency Power Devices", Power Electronics Review, Vol. 14, No. 1, pp. 40-44, 2009. [alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/94951/IRF/60APU06.html](http://alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/94951/IRF/60APU06.html).
- 
9. International Rectifier 60APU06PbF Ultrafast Soft Recovery Diode, accessed on May, 2011, <http://pdf1>.  
접수일: 2017년 5월 29일, 심사일: 2017년 6월 19일,  
게재확정일: 2017년 6월 21일