

# 인덕션 쿠키용 공진형 하프-브릿지 컨버터의 스위치 손실 분석

김재근<sup>1</sup>, 백기호<sup>1</sup>, 박성민<sup>1</sup> 오원현<sup>2</sup>

<sup>1</sup>홍익대학교 전자전기공학과

<sup>2</sup>제이텍 코리아

## Analysis of Switch losses in Resonant Half-Bridge Converters for Induction Cooker applications

Jae Keun Kim<sup>1</sup>, Ki Ho Baek<sup>1</sup>, Sung Min Park<sup>1</sup> Won Hyun Oh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Electronic & Electrical Engineering, Hongik University

<sup>2</sup>JTEK Korea

### ABSTRACT

본 논문에서는 인덕션 쿠키의 스위칭 전력반도체에서 발생되는 스위치 손실을 비교 분석한다. Si 기반 전력반도체의 효율 상승이 한계점에 도달함에 따라 고속 스위칭 및 저손실 특성을 지닌 SiC, GaN와 같은 와이드밴드갭 소자를 활용한 고전력밀도 컨버터의 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 소비자 가전분야의 인덕션쿠키 공진형 하프 브릿지 전력회로의 기존 Si IGBT를 GaN FET과 SiC FET으로 구성하여 스위치 손실 모델을 유도하고 이를 통해 세 가지의 전력반도체가 적용된 인덕션 쿠키의 스위치 손실을 비교분석한다. 분석된 손실모델은 PSIM Thermal Module을 통하여 검증한다.

### 1. 서론

최근 전력변환 장치의 추세 중 하나는 전력 손실을 줄임으로써 고전력밀도(High Power Density)를 달성하는 것이다. 이것을 위해 토폴로지 연구와 제어 방법의 변화 등의 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 스위칭 소자로 사용되는 Si기반의 MOSFET과 IGBT의 소자재료특성의 한계로 인하여 저손실 컨버터의 발전은 더뎠고 있다. 이 한계를 극복하기 위해서 각광받기 시작한 것이 와이드밴드갭(Wide Band Gap) 소자이다. GaN 및 SiC기반의 소자들은 기존의 Si기반의 소자보다 우수한 절연과 파괴 전계 강도 및 온도 특성을 가지며 또한 고속 스위칭 특성으로 스위치 소자의 효율 상승을 기대할 수 있다.

본 논문에서는 와이드밴드갭 소자를 활용한 Half Bridge Resonant Converter 구조를 가진 인덕션 쿠키(Induction Cooker)를 제안한다. 제안된 회로에는 Si IGBT, GaN FET, SiC FET를 각각 적용하여 스위치 손실 분석 및 시뮬레이션을 수행하였다. 결과를 통하여 인덕션 쿠키 응용분야에서 기존의 Si기반의 스위치 디바이스 비교하여 와이드밴드갭 소자의 우수성을 확인한다.

### 2. 본론

#### 2.1 와이드밴드갭 디바이스

와이드밴드갭 소자는 기존에 사용되던 Si기반의 소자와 비교하여 높은 임계영역은 높은 전압 및 낮은 누설 전류에서 동작할 수 있게 해준다. 그 중에서 GaN소자는 Si에 비하여 넓은 밴드갭과 면적당 낮은 온 저항으로 인하여 낮은 게이트전하로 인하여 고속 스위칭을 가능하게 하며, 이로 인해 수동 소자들의 크기를 줄여 시스템 크기를 줄일 수 있다. SiC는 Si보다 고전압에

표 1. 전력소자 재료특성 비교<sup>[1]</sup>

Material Property	Si	SiC-4H	GaN
Band Gap (eV)	1.12	3.26	3.5
Critical Field (10 <sup>6</sup> V/cm)	0.3	3	3
Electron Mobility (cm <sup>2</sup> /Vsec)	1400	900	1250
Electron Saturation Velocity (10 <sup>6</sup> cm/sec)	10	27	27
Thermal Conductivity (Watts/cm <sup>2</sup> K)	1.5	4.9	1.3

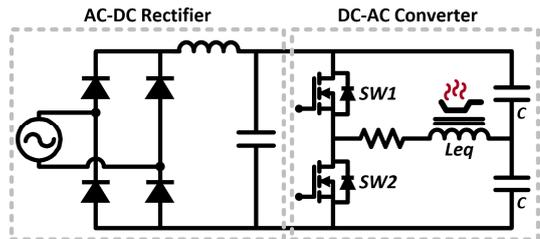


그림 1. Resonant half-bridge converter for induction cookers

서의 단위 면적당 낮은 온 저항을 가지며, 높은 열 전도성으로 인하여 고온에서 동작이 가능하게 해준다. 따라서 고속 스위칭이 필요한 장치에서는 GaN소자가 유리하며, 고전압이 핵심인 장치에서는 SiC소자를 더 효율적으로 사용할 수 있다.

#### 2.2 스위치 손실 분석

그림 1은 인덕션 쿠키에서 주로 사용되고 있는 Resonant Half Bridge Converter 회로이다. 이 회로구조는 AC DC 정류 후 두 개의 스위치가 번갈아 켜지면서 고주파 AC가 발생하게 된다. 이 때 1차측인  $L_{eq}$ 에서 2차측의 저항체인 냄비로 에너지가 전달되어 가열되게 된다. 본 시뮬레이션에서는 정류한 전압 및 전류는 직류성분으로 가정하여, 이때의 스위치에서 발생하는 손실을 분석한다. 스위치의 손실에는 크게 도통손실, 스위칭 턴 온 오프 손실로 구성된다.

##### 2.2.1 도통손실(Conduction Loss)

도통손실은 스위칭 소자가 켜짐에 있어 소자에 전류가 흐르게 되는데, 도통되는 전압 및 전류 또는 내부저항  $R_{on}$ 에 의하여 발생하는 손실이다. 평균적인 손실식은 다음과 같다.<sup>[2]</sup>

$$P_{C(FET)} = I_{Drms}^2 R_{DS(on)} D \quad (1)$$

$$P_{C(IGBT)} = V_{CEsat} I_{Cavg} D \quad (2)$$

$P_C$ : Conduction Loss       $I_{Drms}$ : Drain Current Rms Value  
 $R_{DS(on)}$ : 스위치 내부저항       $V_{CEsat}$ : Collector-Emmitter Saturation Voltage  
 $D$ : Duty       $I_{Cavg}$ : Collector Current Average Value

## 2.2.2 스위칭 손실(Switching Loss)

스위칭 손실은 스위칭소자가 온 오프가 될 때 발생하는 스위칭 온 오프 손실과 역회복(Reverse recovery)손실로 구성되어 있다. 스위칭 온 오프 손실은 스위치 상태변환구간에서 전압 및 전류가 서로 교차하는 구간이 생겨 손실이 발생하게 되는데, 이것은 한주기마다 발생되기 때문에 주파수가 높아질수록 많은 전력 손실 발생하게 된다. 역회복 손실은 스위치가 턴 오프되면서 역전압이 발생하게 되는데 이 때 역병렬 다이오드에 의하여 전류를 방출하도록 하여 발생하는 손실이다. 이 두 손실을 수식화하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FET(on/off)} = \frac{1}{2} \times V_{DS} \times I_{D(on/off)} \times t_{(r/f)} \times f_{sw} \quad (3)$$

$$P_{IGBT(on/off)} = \frac{1}{2} \times V_{CE} \times I_{C(on/off)} \times t_{(r/f)} \times f_{sw} \quad (4)$$

$$P_{rr} = V_{DS} \times Q_{rr} \times f_{sw} \quad (5)$$

$P_{(on/off)}$ : Switching On/Off Loss     $I_{(on/off)}$ : Switch on/off Current

$t_{(r/f)}$ : Rise time, Fall time     $f_{sw}$ : Switching frequency

$P_{rr}$ : Reverse Recovery loss     $Q_{rr}$ : Reverse Recovery Charge

온 오프 손실과 역회복 손실을 간단히 도식화하면 식(6)과 같다.

$$P_{(on/off)} = E_{(on/off)} \times f_{sw} \quad (6)$$

$E_{(on/off)}$ : Turn on/off energy Loss

## 2.3 손실 분석 결과

분석을 위해 사용된 소자로서는 Si IGBT와 GaN FET, 그리고 SiC FET을 각각 Infineon社의 *IHW40N65R5*, GaNsystems社의 *GS66516T*, ROHM社의 *SCT3030AL* 모델로 선정하였다. 선정기준은 Si IGBT와 비슷한 최대 내압(650V) 및 연속 전류(80A)를 기준으로 선정하였다.

시뮬레이션에 앞서 이론적인 계산을 위하여 수식 (1)~(6)에 필요한 파라미터 값들은 표 2와 같다. 시뮬레이션 회로는 그림 2와 같이 구성하였으며 회로의 스위칭소자는 각각 PSIM Thermal Module의 Eon MOSFET(GaN FET, SiC FET) 및 IGBT 모델을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 계산된 각 스위칭 소자의 손실과 PSIM Thermal Module을 이용한 손실 시뮬레이션 결과는 표 2와 표 3에 나타내었다. 총 손실에 대한 결과로 GaN FET은 Si IGBT에 비하여 약 64%의 효율 상승을, SiC FET는 약 41%의 효율 상승을 보여주었다. 이 때 GaN FET과 SiC FET의 총 손실 차이는 스위칭 손실에서 크게 발생하며, 이것은 고속 스위칭을 요구하는 회로에서 SiC FET보다 GaN FET이 전력효율 상승면에서 더욱 유리하게 작용될 수 있음을 볼 수 있다.

표 2. Device parameters for loss analysis

Parameter	<i>IHW40N65R5</i>	<i>GS66516T</i>	<i>SCT3030AL</i>
$V_{CE} / V_{DS}$	311V	311V	311V
$R_{DS(on)}$		25mΩ	30mΩ
$V_{CEsat}$	1.16V		
$I_{Drms} / I_{Crms}$	19.85A	19.92A	19.92A
$I_{Davg} / I_{Cavg}$	18.37A	18.44A	18.43A
$I_{Coff} / I_{Doff}$	20.76A	20.85A	20.85A
$t_f$	13ns	22ns	27ns
$Q_{rr}$	3.80uC	0	130nC
$E_{off}$	182.8uJ	15.18uJ	124.4uJ
C	1uF	1uF	1uF
$I_{Cq}$	55uH	55uH	55uH
$f_{sw}$	21.46kHz	21.46kHz	21.46kHz
D	0.5	0.5	0.5

표 3. Theoretical results

	<i>IHW40N65R5</i>	<i>GS66516T</i>	<i>SCT3030AL</i>
Conduction Loss	21.31 W	9.92 W	11.90 W
Switching Loss	7.846 W	0.652 W	5.339 W
	29.156 W	10.572 W	17.239 W

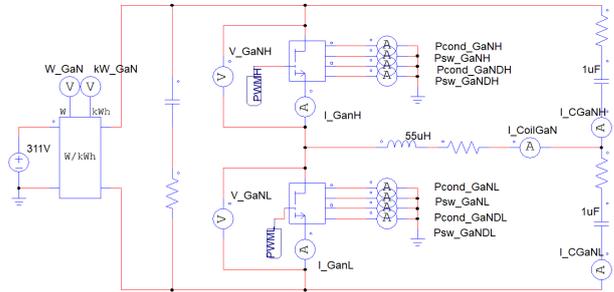


그림 2. PSIM schematic for thermal analysis

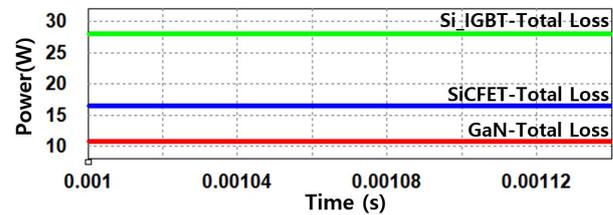


그림 3. PSIM thermal module results

표 4. PSIM simulation results

	<i>IHW40N65R5</i>	<i>GS66516T</i>	<i>SCT3030AL</i>
Conduction Loss	20.28 W	10.18 W	11.40 W
Switching Loss	7.753 W	0.633 W	5.175 W
	28.033 W	10.813 W	16.575 W

## 3. 결론

본 논문에서는 전력효율을 향상을 위한 방안 중 하나로 인덕션쿠커 Half Bridge 전력회로의 Si IGBT를 GaN FET 및 SiC FET소자를 사용한 전력변환 회로를 제시하였다. 회로에서의 손실수식을 통해 계산된 스위치 손실값과 시뮬레이션 결과를 통한 손실의 오차는 약 4%로 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 이론적인 스위칭소자 손실 계산의 타당함을 확인할 수 있었으며, 제안된 와이드밴드갭 소자들은 기존 Si IGBT에 비하여 전력효율의 향상을 가져올 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 논문은 와이드밴드갭 소자를 사용한 전력변환회로의 전력 효율 개선의 선행적 연구로, 이후 효율 개선 연구에 대한 기여를 기대한다.

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국과학창의재단(학부생연구프로그램사업)의 지원을 받아 수행된 연구임.

## 참고 문헌

- [1] ROHM Semiconductor, "SiC Power Devices and Modules" Application Note, Aug. 2014.
- [2] Dusan Graovac and Marco Purschel, "IGBT Power Losses Calculation Using the Data Sheet Parameters," Infineon Application Note, Jan. 2009.
- [3] Viriya, P., S. Sittichok, and K. Matsuse. "Analysis of high frequency induction cooker with variable frequency power control." *Power Conversion Conference, 2002. PCC Osaka 2002. Proceedings of the*. Vol. 3. IEEE, 2002.