

# 직렬 공진 하프-브릿지 컨버터 인덕션 쿠키에 적용할 Wide-Bandgap power device 선정

김재근 김승권 박성민  
 홍익대학교 전자전기공학과

## Selection of Wide-Bandgap power device for series resonant half-bridge converter of Induction Cooker

Jae-Keun Kim, Seung-Gwon Kim, Sung-Min Park  
 Department of Electronic & Electrical Engineering, Hongik University

### ABSTRACT

본 논문에서는 인덕션 쿠키의 토폴로지 중 하나인 직렬 공진 하프-브릿지 컨버터에 Wide-Bandgap 전력 반도체를 적용하여 전력 손실을 평가한다. 전력 반도체의 발전으로 Si-기반의 전력반도체를 대체할 GaN과 SiC의 Wide-Bandgap 소자들이 양산되고 있다. Wide-Bandgap 소자의 장점은 고주파수에서의 동작과 낮은 손실에 있다. 이에 인덕션 쿠키의 직렬 공진 하프-브릿지 컨버터에 Wide-Bandgap 전력반도체를 적용하여 전력 손실을 PSIM Thermal Module을 통해 평가하고 인덕션 쿠키에 적합한 소자를 선정한다.

### 1. 서 론

최근 전기 자동차와 신재생 에너지 시스템과 같은 다양한 분야에서 전력변환장치가 사용됨에 있어, 수십 년간 주스위칭 소자로 사용하던 Si기반의 MOSFET과 IGBT는 전력변환과정에서 높은 손실을 감당해야 했고, 이를 줄이기 위해 Wide-Bandgap (WBG) 스위칭 소자에 관심을 두기 시작했다. WBG 스위칭 소자는 고주파 스위칭임에도 불구하고 스위칭 손실이 적으므로 이를 통해 수동소자의 크기를 줄일 수 있다. 따라서 기존 Si 기반의 시스템에 비해 높은 효율과 작은 크기의 전력변환 장치를 제작할 수 있다.

본 논문에서는 직렬 공진 하프-브릿지 컨버터에 기존 Si-IGBT를 대체하기 위해서 현재 시장에서 구매할 수 있는 GaN-FET과 SiC-FET을 적용하여 인덕션 쿠키에 적합한 스위칭 소자를 선택한다. 이를 위해 PSIM Thermal Module을 이용하여 스위칭 소자의 전력손실 시뮬레이션을 통해 예측하고 비교분석한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 와이드 밴드갭 스위칭 소자(WBG)

WBG소자는 기존 Si기반의 소자와 비교했을 때 넓은 밴드갭과 높은 절연과 파괴강도를 지니며, 빠른 전자포화 속도를 지닌다. 이러한 특성은 Si보다 약 10-15배 정도 얇은 전압 차단층을 갖는 전력 반도체를 제작할 수 있게 된다 [1]. 이 경우, 얇아진 차단층으로 인하여 낮은 전압강하 또는 온저항을 지니게 되어 Si기반 소자보다 적은 도통 손실이 발생하게 한다. 특히, GaN은 높은 전자 이동 특성을 지

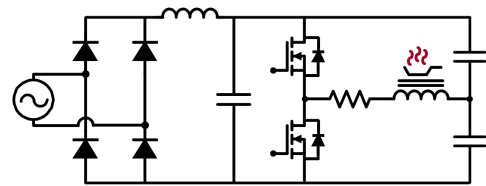


그림 1 직렬 공진 하프-브릿지 컨버터를 적용한 인덕션 쿠키

표 1 인덕션 쿠키의 수동 소자 및 주파수

Parameter	Value
Capacitor	0.6 $\mu$ F
Inductor	55 $\mu$ H
Resonant frequency	27.7kHz
Switching frequency	29kHz

닌다. 이는 스위칭을 할 때 빠른 전자 이동으로 스위칭 타임이 짧아져 스위칭 과정에서 발생하는 손실이 감소하는 이점이 생긴다. SiC는 낮은 고유 캐리어밀도를 지니므로써 열전도율이 높아지게 되어 고온에서의 전력변환장치를 운용할 수 있다.

#### 2.2 직렬 공진 하프-브릿지 컨버터

인덕션 쿠키의 직렬 공진 하프-브릿지 컨버터는 그림 1의 회로이다. 다이오드를 통해 정류된 전원을 두 개의 스위치를 이용해 고주파 AC로 변환하여 위킹코일로 자기장을 발생시키는 형태이다 [2]. 인덕션 쿠키에서는 LC공진으로 인해 Zero Voltage Switching을 하게 되며 스위칭 과정에서 발생하는 Turn on 손실이 발생되지 않아 스위치 손실을 저감시킬 수 있다. 공진회로는 스위칭 주파수가 공진 주파수일 때 임피던스가 낮아 가장 높은 출력이 발생시킨다. 이에 스위칭 주파수를 공진 주파수와 근접하게 동작시켜야 한다. 공진 주파수는 LC공진 회로의 수동소자들에 의하여 결정되며 수식은 (1)과 같다.

$$f_{resonant} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

본 논문에서 사용한 수동소자와 공진 주파수는 표 1과 같다. 이때 스위칭 주파수는 ZVS영역에서 스위칭 동작을 위하여 공진 주파수보다 높게 하여 설정한다.

#### 2.3 Wide-Bandgap device 비교

표 2와 3은 인덕션 쿠키에 적용될 WBG소자들의 파라미터와 인덕션 쿠키의 입출력 값을 보여준다. 표 2의 가격의 출처는 digikey와 mouser이며, 현재 판매가격에 대해서만 고려되었다. WBG소자는 스위칭 과정 중 과도상태에 발생

표 2 시장에서 구매할 수 있는 와이드 밴드갭 소자

Parameter	SiC			GaN	
	CREE C3M0030090K	ROHM SCT3040KL	STMicroelec. SCT50N120	Transphorm TP65H35WS	GaNSystems GS66516T
Drain-Source Voltage $V_{DS}$	900 V	1200 V	1200 V	650 V	650 V
Continuous Drain Current $I_D(25^\circ\text{C})$	63 A	55 A	65 A	46.5 A	60 A
Drain-Source Resistance $R_{DS(on)}$	30 m $\Omega$	40 m $\Omega$	59 m $\Omega$	35 m $\Omega$	27 m $\Omega$
Gate to Source Charge $Q_{gs}$	19 nC	22 nC	19 nC	10 nC	4.5 nC
Gate to Drain $Q_{gd}$	30 nC	41 nC	35 nC	6 nC	4 nC
Total Gate Charge $Q_g$	87 nC	107 nC	122 nC	24 nC	12 nC
Reverse Recovery Charge $Q_{rr}$	545 nC	115 nC	230 nC	178 nC	0 nC
Forward Voltage $V_{SD}$	4.8 V@17.5 A	3.2 V@ 20 A	3.5 V@ 20 A	1.8 V@ 32 A	2 V@ 6 A
Cost (Unit price@Qty.)	\$28.21@100	\$27.79@ 100	\$27.67@ 100	\$17.95 @ 120	\$46.96@ 250

표 3 인덕션 쿠키의 입, 출력

Parameter	Value
Power	1850 W
Input Voltage	220 V <sub>ac</sub>
Input Current	8.55 A
$V_{D,Smx}$	311 V
$I_{Drms}$	13.6 A
$I_{Dpeak}$	37.5 A

표 4 Wide-Bandgap 스위칭 소자 전력 손실(25°C)과 성능지수

Manufacturer	Power loss (25°C)			Performance Index (Loss×Price)
	Conduction loss	Switching loss	Total loss	
CREE	10.85 W	0.66 W	11.51 W	324.70 W\$
ROHM	15.07 W	2.53 W	17.58 W	488.55 W\$
STMicroelec.	25.20 W	1.74 W	26.92 W	744.88 W\$
Transphorm	12.72 W	0.19 W	12.90 W	231.56 W\$
GaNSystems	9.34 W	0.52 W	9.86 W	463.03 W\$

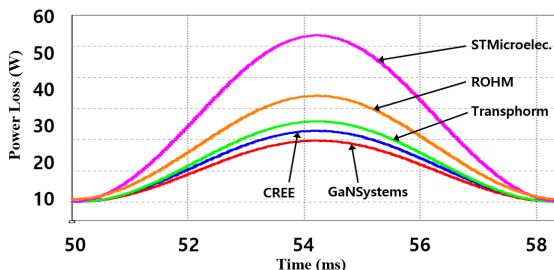


그림 2 PSIM Thermal Module 시뮬레이션 결과(반주기)

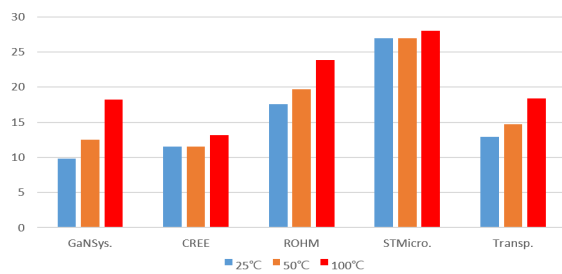


그림 3 온도 변화에 따른 스위치 전력 손실

할 수 있는 overshoot이나 ringing 등으로 인하여 스위칭 소자의 절연과피를 고려하여 인덕션 쿠키의 정격 전압 및 전류의 기준으로 50%의 마진을 두고 선택되었다. 스위치 동작에 있어 전류 피크값은 37.5A이다. 그렇기 때문에 54A를 기준으로 비슷하거나 보다 큰 전류 정격을 지닌 소자가 선택되었다. 표 4와 그림 2는 PSIM Thermal Module 시뮬레이션 결과를 나타

낸다. 25°C 기준으로 GaN-FET은 낮은 내부 drain-source 저항과 작은 게이트 전하로 인하여 짧은 스위칭 시간을 갖고 총 손실이 적게 나오는 것을 볼 수 있다. 하지만 그림 3과 같이 온도가 점차 올라감에 있어 전력 손실량이 커지는 것을 볼 수 있다. 전력 손실 중 큰 비중을 차지하는 도통 손실의 영향이 크며, 이는 내부 drain-source 저항이 온도에 민감하게 변한다는 것을 뜻한다. 반면, SiC-FET은 GaN-FET에 비하여 온도에 대해 민감하지 않아 전력 손실의 변화량이 적음을 볼 수 있다. 이는 높은 온도에서의 동작을 요구하는 어플리케이션에서 높은 효율을 얻기 위해서 GaN-FET보다 SiC-FET이 활용될 수 있다는 것을 추측할 수 있다. 표 4의 성능 지수는 낮을수록 가격과 손실이 적다는 것을 뜻한다. 직렬 공진 하프-브릿지 컨버터에서 성능지수로 가장 좋은 소자는 Transphorm의 GaN-FET이라 할 수 있다. 하지만 전류정격이 다소 낮아 과도 전류에 의한 소손 위험이 있어서 안전성에 문제가 될 수 있다. 손실 관점에서는 GaNSystems의 GaN-FET이 좋은 선택이 될 수 있지만 가격이 높다는 단점이 있다. 또한, GaN-FET은 공통적으로 고온으로 갈수록 손실이 증가하여 고온 운전에 적합한 SiC-FET이 좋은 선택이 될 수 있다. 종합적으로 CREE의 C3M0030090K 모델이 차선 성능지수와 안정성을 보아 인덕션 쿠키에 적합한 스위칭 소자라고 볼 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 직렬 공진 하프-브릿지 컨버터 인덕션 쿠키에 WBG 소자를 적용하여 전력손실을 평가하였다. 각 WBG 소자는 PSIM Thermal Module을 통해 전력손실 시뮬레이션을 하였고, 전력손실과 가격 측면에서 비교를 하였다. 비교 결과들을 바탕으로 SiC-FET이 GaN-FET에 비해 본 토폴로지에 적합하다는 것을 알 수 있었다. 본 논문에 제시된 전원장치 선정 과정은 실제 하드웨어 설계 이전에 적절한 WBG 소자를 선택하는데 도움이 될 것이라 기대된다.

이 논문은 2017년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2017R1C1B2008200)

### 참고 문헌

- [1] Chow, T. Paul. "Wide bandgap semiconductor power devices forenergy efficient systems." Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), 2015 IEEE 3rd Workshop on. IEEE, 2015.
- [2] P. Viriya, 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.