

고속 구동에서의 Si 및 SiC 소자의 효율 및 특성 비교

박상욱*, 최재혁*, 이동훈**, 유승진**, 목형수*
*건국대학교, **국방과학연구소

Comparison of efficiency and characteristics of Si and SiC devices in high-speed driving

Sang Uk Park*, Jae Hyuk Choi*, Dong Hun Lee**, Seung Jin Yoo**, Hyung Soo Mok*
*Konkuk University, **Agency for defense development

ABSTRACT

현대 사회의 시스템들은 점점 소형화 경량화 되어 가며, 공간적 제약을 받게 되었다. 최근 차량, 선박, 철도 등 제약적 공간이내에 많은 공간 확보를 통해 승차자의 쾌적한 환경 조성 및 다량의 물자를 운송하는 것을 목표로 각 시스템에 대한 소형화 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 기존 Si 소자를 SiC 소자로 변경함으로써 얻을 수 있는 체적 및 손실 측면에서의 특성을 분석 및 장단점을 비교하였다.

1. 서론

과거 전력용 반도체인 Si 기반 MOSFET의 등장 이후 전력 제어 시스템의 주요 소자로써 Si 기반 MOSFET이 사용되어 왔다. 오랜 시간 반도체 스위치는 다양한 연구를 통해 효율과 성능이 크게 향상되고, 수많은 분야에 적용되어 왔지만, 기술적인 측면에서 포화상태가 도래하였다. 이러한 문제에 대해 최근 연구를 살펴보면, 새로운 소자를 통해 문제를 타개하려는 움직임을 확인 할 수 있다. 대표적인 논문으로 “Replacing Si to SiC_Opportunities and Challenges”^[1]에서는 Si 소자와 SiC 소자의 특성을 비교 SiC 소자의 우수성을 제시하고 있다. 그 중 일부를 살펴보면 표 1과 같다.

표 1의 평가 지표 중 Bandgap은 수치가 증가할수록 보다 큰 정격전압의 보유가 가능하며 기존 Si 대비 SiC를 사용한 FET에서 약 3배 향상된 수치를 보여준다. 또한 Saturated Velocity는 스위칭 주파수의 속도를 결정하는 지표로 수치가 증가할수록 보다 높은 스위칭 주파수를 보유하고 있음을 의미한다. 스위칭 주파수를 결정하는 지표 또한 기존 Si FET 대비 약 2배 향상된 물리적 특성을 보여준다. 즉 Si 소자와 비교 시 SiC 소자는 더 큰 정격전압을 가지며, 고속 스위칭에 유리하다는 것을 알 수 있다. 이는 Si 소자의 SiC소자로의 대체를 통해 최근 이슈가 되고 있는 제약적인 공간을 가지는 차량, 철도 차량, 선박 등에 이용되는 시스템의 소형화 가능성을 제시할 수 있으며 본 논문에서는 이를 위한 검증용 실시하였다. 검증 방법으로는 Si 및 SiC 스위칭 소자를 이용한 하드웨어를 제작 실험을 통해 그 결과를 확인 하였다.

표 1 Si 및 SiC 소자 특성 지표

Table 1 Si and SiC device characteristics index

	Si	SiC
Bandgap [eV]	1.1	3.2
Breakdown field[MV/cm]	0.25	2.4
Saturated Velocity [10 ⁷ cm/sec]	1.0	2.0
Thermal Conductivity [Watts/cm ² K]	1.5	4.9

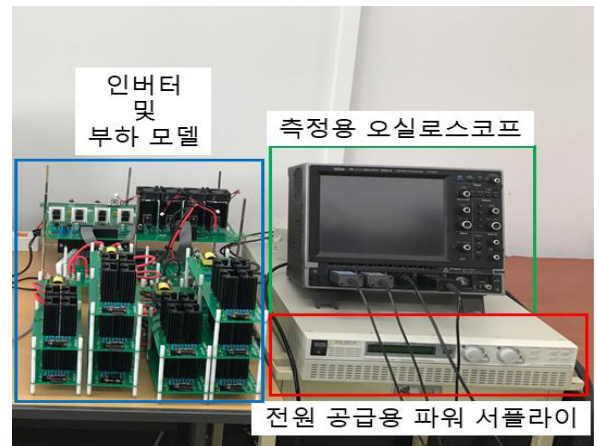


그림 1 시험 환경 구성

Fig. 1 Overall configuration for testing

2. 시험 및 비교

2.1 시험 환경

그림1 은 비교 검증을 위한 실험 환경 구성을 나타낸다. Si 및 SiC소자를 이용한 Full Bridge 인버터를 제작 유니폴라 구동을 실시하였으며, 동일한 입력 전압 및 동일 부하를 구성하여 효율 비교 시험을 실시하였다. 이때 인버터의 출력 전압과 전류의 파형을 통한 전력 분석을 위하여 인버터 출력단에 LC 필터를 활용하였다.

표 2 LC 필터 출력부 효율 (SiC MOSFET 이용 INV)
Table 2 LC filter output efficiency (inverter using SiC MOSFET)

측정 위치	전압 [V]	전류 [A]	전력[W]	효율[%]
직류 전원단	150.9	2.095	316.16	82.6
LC 필터 출력	88	3.058	261	

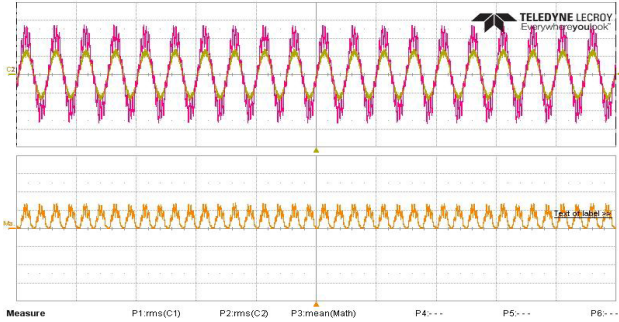


그림 2 SiC 인버터 LC필터 출력부 전압 및 전류 파형 (황색:전압, 적색:전류, 주황색:평균 순시 전력)

Fig. 2 SiC inverter LC filter output voltage and current waveform (yellow: voltage, red: current, orange: average instantaneous power)

2.2 SiC MOSFET 이용 고속 스위칭용 인버터

SiC MOSFET을 이용한 실험 조건은 직류 전압 150[V] 공급 상황에서 전부하를 사용하여 구동하였으며 이때 스위칭 주파수는 600[kHz]로 설정하였다. 전력 변환기 자체의 입력 대비 출력 효율을 분석하기 위해서는 전력 변환기의 출력부 전압 및 전류 정보가 요구되지만 반도체 소자의 스위칭 동작을 통하여 평균 전압의 형태로 요구되어지는 교류 전압을 합성하는 전력 변환기의 경우 인버터 출력단의 출력은 정현파 형태가 아닌 스위칭 형태의 극전압으로 나타난다. 따라서 그림 2와 같이 출력 파형이 정현파 형태로 나타나는 LC 필터의 출력부 전압 및 전류를 측정하여 인버터의 효율 분석하였다. 분석 결과 입력 전력은 316.16[W]이고 LC필터 출력단의 전력은 261[W]로 약 55.16[W], 약 82.6[%]의 효율을 나타내었다.

2.3 Si MOSFET 이용 고속 스위칭용 인버터

Si MOSFET를 이용한 시험은 200[kHz]로 스위칭하여 인버터를 구성하였을 경우의 입력 전력 대비 LC필터 출력단의 전력을 비교하였으며, 시험의 부하 및 환경은 SiC MOSFET과 동일하다. 분석 결과 입력 전력은 377.46[W]이고 LC필터 출력단의 전력은 252[W]로 약 125.46[W], 약 66.8[%]의 효율을 나타내었다. 본 시험 결과로부터 SiC MOSFET을 이용할 경우 Si MOSFET을 이용할 때와 비교 약 70.3[W], 약 15.8[%] 차이로 SiC MOSFET의 효율이 더 높다는 것을 알 수 있다.

표 3 LC 필터 출력부 효율 (Si MOSFET 이용 INV)
Table 3 LC filter output efficiency (inverter using Si MOSFET)

측정 위치	전압 [V]	전류 [A]	전력[W]	효율[%]
직류 전원단	148.9	2.535	377.46	66.8
LC 필터 출력	85.6	3.053	252	

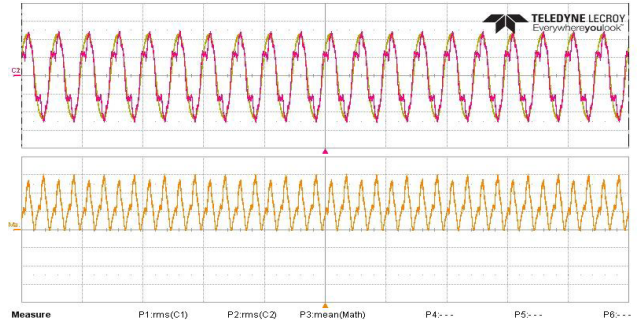


그림 3 Si 인버터 LC필터 출력부 전압 및 전류 파형 (황색:전압, 적색:전류, 주황색:평균 순시 전력)

Fig. 3 Si inverter LC filter output voltage and current waveform (yellow: voltage, red: current, orange: average instantaneous power)

표 4 방열판 적용 후 소자별 체적 비교

Table 4 Comparison of volume by device after applying heat sink

소자 유형	소자 손실 [W]	방열판 열저항 [$^{\circ}C/W$]	실 체적 [mm^3]	체적 비교 [%]
Si MOSFET	약 30	2.5	67600	100
SiC MOSFET	약 12	7	26600	39.4

2.4 Si 및 SiCMOSFET 방열판 적용 후 체적 비교

표 4에서 선정된 방열판의 방열면적은 반도체 스위치 소자의 내부 접합부 온도를 기준으로 약 120[$^{\circ}C$]를 기준으로 선정하였다. 이때 내부 접합부 온도는 직접 측정할 수 없으므로 데이터 시트에 명기된 방열판 열저항과 반도체 스위칭 소자 내부 열저항, 방열판 및 반도체 스위칭 소자 사이의 열저항 감소를 위하여 사용된 서멀 그리스의 통상적인 열저항 값 및 방열판의 수렴 온도를 기준으로 계산되어진 값을 활용하였다.

Si MOSFET를 사용한 경우 반도체 접합부의 온도를 120[$^{\circ}C$] 수준으로 유지하기 위한 방열판은 2.5[$^{\circ}C/W$]의 열저항 값을 보유한 방열판을 선택하였으며 실제 방열판이 차지하는 체적은 67,600[mm^3]이다. 이때 반도체 내부 접합부 계산 온도는 124[$^{\circ}C$]이다. 또한 SiC MOSFET를 사용한 경우 반도체 접합부 온도를 120[$^{\circ}C$] 수준으로 유지하기 위한 방열판은 7[$^{\circ}C/W$]의 열저항 값을 보유한 방열판을 선택하였으며 실제 방열판이 차지하는 체적은 26,600[mm^3]이다.

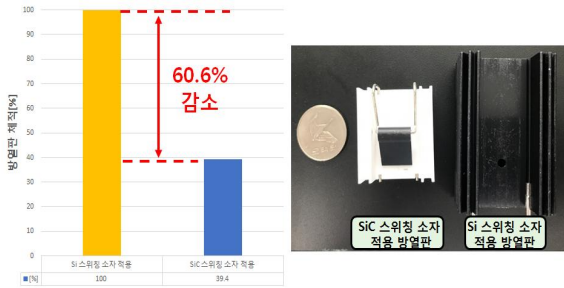


그림 4 Si 및 SiC MOSFET 방열판 적용 시 체적 비교
Fig. 4 Volume comparison of Si and SiC MOSFET heat sinks

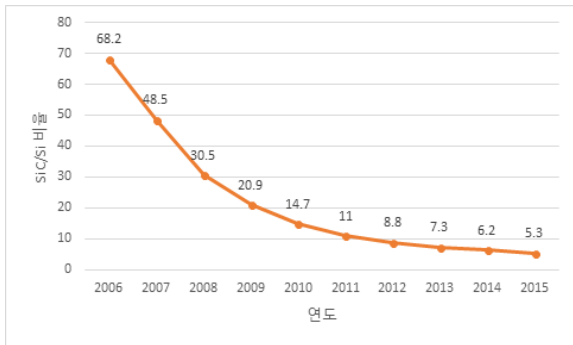


그림 5 연도별 Si 및 SiC 1[A]당 제작 시 원가 비용 비율
Fig. 5 Cost per production cost per Si and SiC 1 [A] by year

이때 반도체 내부 접합부 계산 온도는 110[°C]이다. 따라서 Si MOSFET를 사용하였을 경우 대비 SiC MOSFET를 사용하였을 때 방열판이 실제 차지하는 체적 측면에서 60.6% 감소한 39.4%를 나타낸다.

2.5 SiC소자가격경쟁력

그림 5는 2006년부터 2015년까지 KERI에서 시행한 Si 및 SiC 소자의 1[A] 소자 제작 시 원가 비용의 SiC와 Si의 비율로 나타내었다. 그림 5에 따르면 Si 소자 대비 SiC소자의 1[A]당 제작 비용의 비율은 매년 감소하고 있으며, 2015년 5.3%로 조사 시작 시기인 2006년과 비교 약 62.9% 감소한 것을 알 수 있다. 현재 시장에서 판매 되는 SiC는 소자의 높은 비용으로 인해 일부 시스템 또는 스위칭 소자의 환류 다이오드로만 SiC를 적용해 사용하는 하이브리드 시스템이 적용되고 있지만, 그림 5의 결과로부터 지속적인 SiC 제작 비용의 감소를 통해 향후 Si소자에 대한 SiC 소자의 완전한 대체가 가능할 것이 예상된다.^{[3][4]}

3. 결 론

기존 인버터에 사용되어진 반도체 스위칭 소자인 Si 계열 MOSFET를 신소재인 SiC 계열 MOSFET으로 변경 시 동일 용량 시스템 사용 시 약 70.3[W], 약 15.8% 차이로 SiC MOSFET에서 더 높은 효율을 나타내었으며, 방열판을 포함한 소자의 체적 계산 시 약 60.6%의 체적 감소를 나타내었다. 특성 및 효율, 면적 면에서 SiC 소자의 활용이 더 우수하여 향후 공간 제약적 시스템으로의 적용가능성을 엿볼 수 있지만, 비용적 측면의 문제로 인해 스위치의 다이오드만을 SiC로 이

용하는 하이브리드 타입의 이용 또는 일부 스위치만을 SiC로 전환 하는 방법 등이 제시되고 있어 시스템 상승 효율, 감소 체적, 상승 비용 등 전반적인 사항을 모두 고려한 조사가 추가적으로 필요할 것으로 보인다.

이 논문은 한국 국방과학 연구소의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Muhammad Nawaz, Kalle Ilves, "Replacing Si to SiC_Opportunities and Challenges", IEEE, 20 October 2016, Lausanne, Switzerland
- [2] V. Pala, E. V. Brunt, L. Cheng, M. O'Loughlin, J. Richmond, A. Burk, S. T. Allen, D. Grider, J. W. Palmour, and C.J. Scozzie, "10 kV and 15 kV Silicon carbide power MOSFETs for next generation energy conversion and transmission systems," IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014, pp. 449-454.
- [3] Peter Friedrichs, "SiC based power semiconductor in applications aspects and prospects", IEEJ, the 2018 International Power Electronics Conference
- [4] 강인호, "SiC 전력반도체 기술 및 동향", 한국 전기연구원, 2016