

Infineon의 Super-Junction MOSFET의 최신 개발 동향

전력 반도체 분야의 우수한 제품과 솔루션은 재생 가능한 원천으로부터 에너지를 더 효율적으로 생산하고 사용할 수 있게 해준다. 이러한 전력 반도체 분야에서 전력 관련 솔루션의 핵심적인 소자라고 할 수 있는 MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)은 전력 시스템 전체의 성능을 결정할 만큼 큰 영향을 끼치게 되므로 신중한 선택이 필요하다. 강건하면서도 효율적인 MOSFET의 특성은 전력 시스템의 크기와 시스템 비용의 절감을 가능케 하는 중요한 요소이며 부가적으로 전반적인 에너지 감소에도 도움을 줄 뿐만 아니라, 이산화탄소(CO₂) 배출량을 최소화하는 데 도움이 되며 이와 관련된 비용을 절감할 수 있어 최종적으로 소비자에게도 유익하다.

1. Super Junction MOSFET

고전압 전력용 MOSFET은 시장의 요구사항에 부응하며 기술적 진전을 이루어 왔다. HV MOSFET 테크놀로지의 경우, 1980년 초의 1세대 DMOS 구조를 시작으로 2000년대 초에 이르러 실리콘으로 구현할 수 있는 칩단위 면적당 Ron값의 이론적 한계치까지 최적화를 달성했다. 이와 동시에 진행된 수퍼정선 HV MOSFET에 대한 연구는 1990년대 후반에 100,000개 이상의 p-column을 갖는 수퍼정선 구조가 개발됨으로써 칩단위 면적당 Ron값의 이론적 실리콘 한계를 넘어서게 되었다.

$$R_{ON} \approx 8.3 \times 10^{-9} BV^{2.5} \Omega \cdot cm^2$$

(Silicon Limit, eg @ 600V, 73mohm)

당시의 수퍼정선 HV MOSFET은 일반적으로 컨벤셔널 HV MOSFET 대비, 칩단위 면적당 Ron값은 3배 낮고, 스위칭 속도는 2배 정도 더 빠른 차이를 보이며, 고용량, 고효율 특성을 요구하는 시장의 요구에 부응하며 성공적으로 안착하게 되었다. 인피니언은 수퍼정선 HV MOSFET을 개발한 이래로

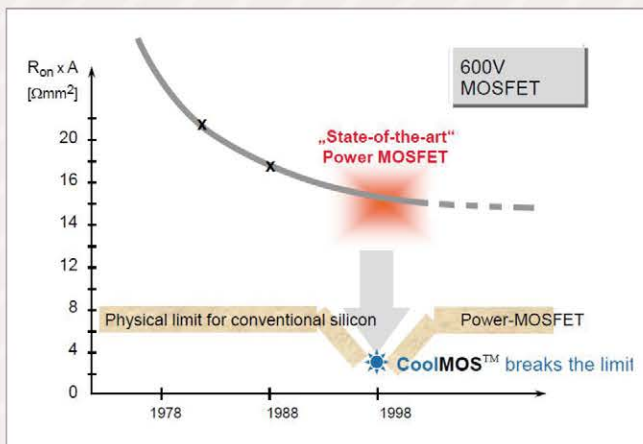


그림 1 인피니언의 SJ CoolMOS™와 실리콘 한계

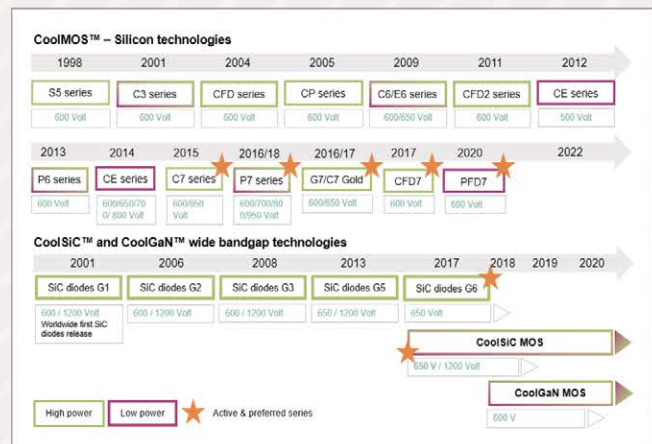


그림 2 인피니언 CoolMOS™ 개발 연혁

지속적으로 새로운 CoolMOS™ 수퍼정선 MOSFET 제품군을 출시하여 포트폴리오를 확대하고 가격 대비 성능과 품질면에서 진정한 기준을 확립해 왔다. 또한, 미래 차세대 CoolMOS™ 제품과 WBG 소자(Wide Band Gap) 제품의 포트폴리오 확장으로 주력의 전력반도체 기술을 기반으로 한 솔루션 선도 업체로 독보적인 입지를 굳히게 되었다.

2. 애플리케이션에 따른 MOSFET 시리즈

인피니언의 CoolMOS™ 수퍼정선(Super Junction) MOSFET은 조명(Lighting), 오디오(Audio), TV(Television), 서버(Server), 텔레콤(Telecom), 태양광(Solar Inverter), EV(Electric Vehicle) 충전(Charging), DC-DC 컨버터(Converter), 온보드 차저(On Board Charger) 등과 같은 소비자, 산업 및 자동차 응용 분야에 광범위한 옵션을 제공한다. 인피니언의 고전압 수퍼정선 MOSFET은 테크놀로지 특성과 토폴로지에 따라 적합한 적용 분야가 구분된다.

저출력 SMPS(Switching Mode Power Supply)의 경우, 스마트폰(Smart Phone)/태블릿(Tablet) 충전기(Charger), 노트북 어댑터(Note PC Adaptor), LED 조명 및 오디오(Audio), TV 전원 공급장치(TV SMPS)와 같은 애플리케이션이 있다. 특히 CoolMOS™ P7 테크놀로지스 전력 트랜지스터는 높은 성능과 경쟁력 있는 가격을 동시에 제공하며 뛰어난 스위칭/도통 손실의 저감과 효율성 향상, 사용 편의성 및 hard commutation에 대한 강건성의 장점을 제공한다. 서버, 통신, PC 전원, UPS, 또는 산업용과 같은 고출력 애플리케이션의 경우는 C7, G7, CFD7, P7, PFD7 및 S7 제품군이 필요한 특성과 성능을 제공한다.

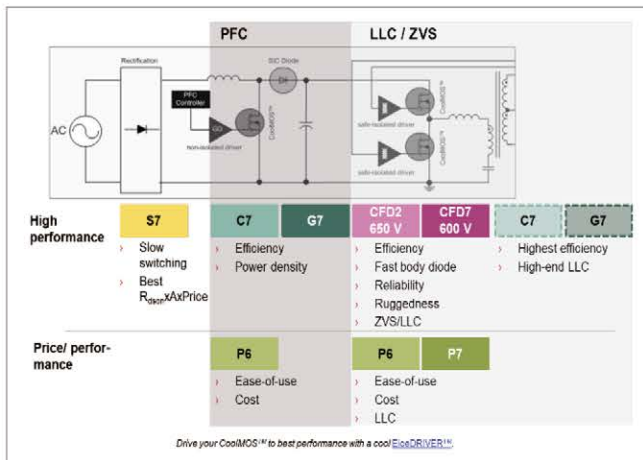


그림 3 토폴로지에 따른 CoolMOS™ 제품군 선정

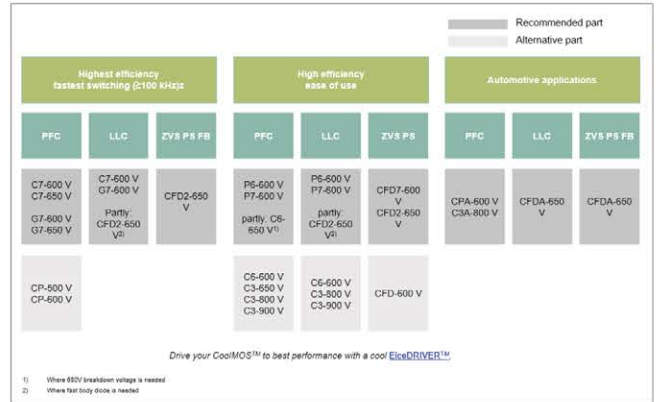


그림 4 토폴로지에 따른 CoolMOS™ 제품군 선정

전장용 인증을 취득한 CoolMOS™ 제품군인 600V CPA, 650V CFDA, 800V C3A 및 최신 650V CoolMOS™ 전장용 CFD7A MOSFET 제품은 우수한 성능과 뛰어난 품질 표준인 AECQ-101이 산업용 제품군에서의 폭넓은 경험과 결합된 결과물으로써 HV-LV DC/DC 컨버터(High Voltage-Low Voltage DC/DC)와 온보드 차저(On Board Charger) 솔루션에 대해 제품 수명의 높은 신뢰성, 보다 높은 고밀도 파워 설계와 향상된 설계 확장성을 제공한다.

3. Silicon SJ MOSFET의 최신 기술 동향

인피니언은 자사의 최신 CoolMOS™ 7 테크놀로지를 기반으로 토폴로지와 고·저출력 및 시장의 요구에 따라 스위칭, 패키지 특성 및 구조를 최적화시킨 제품을 출시하였다. CoolMOS™ 7 테크놀로지 기반의 제품군은 애플리케이션과 요구되는 토폴로지에 따라 C7, P7, G7/C7 Gold, CFD7, PFD7으로 나누어지며 각각 특화된 성능을 갖고 있다. 그중, C7 제품군을 예를 들어서 기존 세대의 MOSFET들과 차별화된 밸류 포지션을 살펴해보도록 하겠다.

3.1 PFC/LLC에서의 효율 향상

1.1kW, 65kHz 고정 스위칭 주파수로 동작하는 CCM PFC 데모보드를 이용해 $R_{ds(on)}$ max 40mohm대 유사 온 저항 수준의 CP 시리즈와 C7 시리즈의 효율성능에 대한 비교를 그림 5에 나타내었다. 같은 TO-247 패키지의 경우, 경 부하 조건에서 C7 시리즈는 기존의 CP 시리즈 대비 약 0.7% 높은 효율을 달성하며, 전 부하 영역에 대한 평균 효율 또한 약 0.4% 더 높다. C7 시리즈의 TO-247 4pin 패키지의 경우, 풀 부하 조건에서 CP 시리즈 대비 0.5% 더 높은 효율성능을 보여준다. 이로써

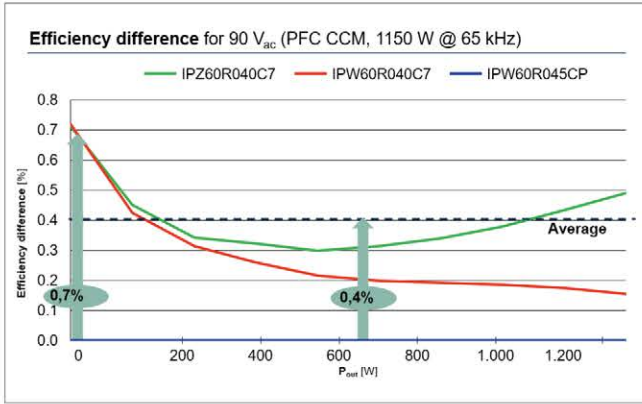


그림 5 CoolMOS™ C7 vs CP 효율비교

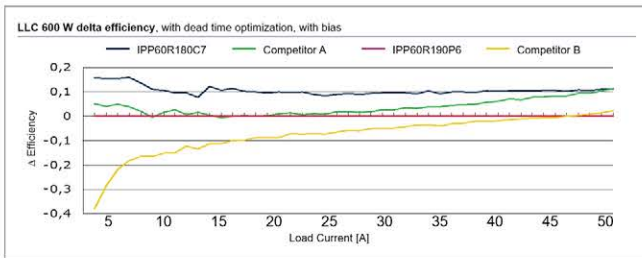


그림 6 CoolMOS™ C7 vs 타사 제품 효율비교

고객은 낮은 에너지 및 열 손실로부터 총 소유비용(TCO, Total Cost of Ownership)을 줄일 수 있고 전력 밀도를 더 높일 수 있는 이득을 가진다.

600V CoolMOS™ C7 제품군은 High End LLC 컨버터에 적합하며 600W LLC 데모보드에서 타 차상위 제품대비 약 0.1% 더 높은 효율을 나타내며, body diode는 최대 20V/ns에 달하는 내전압 dv/dt의 특성을 갖는다.

3.2 혁신적인 패키지 개발과 시스템 비용 절감

반도체 스위칭 소자의 패키지는 다양한 구조와 형태로 발전하고 있으며 인피니언은 실리콘 SJ MOSFET의 잠재적인 성능의 한계치를 확장시켜 고효율, 고전력밀도 및 우수한 방열 성능을 가진 제품들을 출시하고 있다. 여러 패키지 중 여기에서는 TO-247 4pin 패키지와 DDPAK에 대해서 살펴보도록 한다.

3.2.1 TO-247 4 pin 패키지(Kelvin Source Pin)

일반적인 TO-247 3pin 패키지의 경우, source리드에 존재하는 기생 인덕턴스는 드라이버의 구동전압에 대응하여 과도 구간에서 지연을 야기시켜 효율을 떨어뜨리게 된다. Source-sense(Kelvin Source) pin이 분리된 TO-247 4 pin 패키지의 경우, 과도구간에서 게이트 신호(Gate Signal)가 왜곡되지 않아 효율 저감을 방지할 수 있어 1.2kW CCM PFC로 구현된 데모

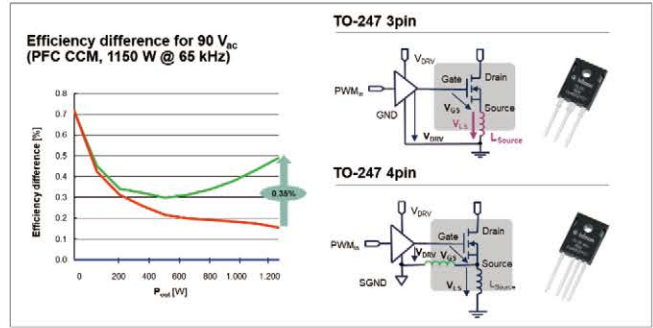


그림 7 TO-247 3pin vs TO-247 4pin 효율비교

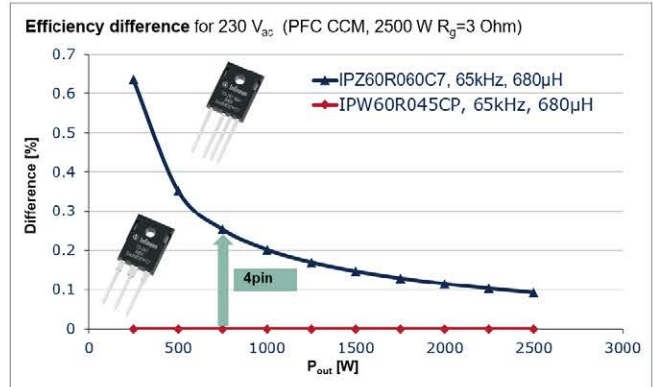


그림 8 TO-247 3pin vs TO-247 4pin 효율비교

보드에서 3 pin 패키지 제품 대비 약 0.35%(Full Load 기준) 더 높은 효율을 달성할 수 있다(그림 7).

4 pin 패키지 제품은 light/full load 조건에서 손실을 더욱 낮출 수 있으며 동일한 power의 SMPS 설계 시, 한 단계 아래 등급의 MOSFET(40mohm 대신 60mohm 급)으로 더 높은 효율을 달성할 수 있어 시스템 전체의 BOM(Bill of Material) 비용을 절감할 수 있다.

3.2.2 DDPAK 패키지(Double DPAK)

High Power SMPS 어플리케이션을 위한 인피니언의 첫 번째 상측면 냉각방식(Top Side Cooled)의 SMD 솔루션으로써 kelvin source pin 이 있는 4 pin 형식의 핀 구조를 가지며 MSL1(Moisture Level)을 대응한다. 이 top side cooling 방식은 PCB 와 반도체를 열적으로 분리시켜 더 높은 전력밀도와 시스템 수명을 연장하는 것을 가능케 한다. FR4 재질의 PCB의 경우, 일반적인 열제한 온도는 110℃이고 실 동작조건에서 SMD 반도체의 온도와 거의 유사하게 상승하게 된다. 발열 원인 반도체의 온도가 먼저 상승하여 PCB의 열제한 온도에 도달하기 때문에 반도체의 열이 PCB의 사용온도를 제한하게 되는 문제를, top side cooling 구조의 패키지를 적용해서 PCB와 반도체를 열적으로 분리시켜 각각의 열성능을 추가적으로 더 확장시킬 수 있다(그림 9).

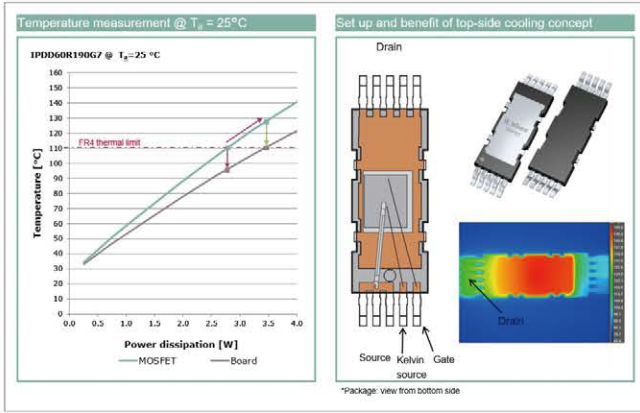


그림 9 DDPACK 패키지의 열성능 향상과 구조

3.3 향상된 스위칭 성능과 시스템 비용 절감

스위칭 효율성능이 우수한 전력용 스위칭 소자는 더 높은 스위칭 주파수에서 구동시켜 자성체 소자의 크기를 줄일 수 있어 시스템 전체의 물리적 크기와 비용을 낮출 수 있게 된다. CoolMOS™ C7은 스위칭 주파수를 두 배로 높여 자성체 부품의 크기와 비용을 줄이는 것을 가능케 해서 최고의 효율성과 가격 성능을 활용할 수 있다.

3.3.1 고주파 스위칭 효율 향상

CoolMOS™ C7 테크놀로지는 스위칭 효율 측면에서 기존의 CP 제품 대비 상당한 개선을 이루었다. 그림 10에 $R_{ds(on)}$ max 45mohm 급의 CP 제품과 60mohm 급의 C7 제품의 스위칭 주파수에 따른 마그네틱 소자와 효율의 차이를 나타내었다. 45mohm CP제품 대비 두 배 더 높은 스위칭 주파수를 적용한 60mohm C7 제품의 풀부하 효율은 동등 이상이고, 경부하(약 15% 부하 기준) 효율은 약 0.2% 정도 더 낮은 수준인 것을 알 수 있는데, 이는 보다 높은 스위칭 주파수와 보다 낮은 가격의 $R_{ds(on)}$ 제품군을 사용하여 전력밀도는 높이면서 전체 시스템 비용은 낮추고자 하는 설계자의 요구와 부합할 경우 충분히 수급할 만한 효율 차이가 될 수 있다.

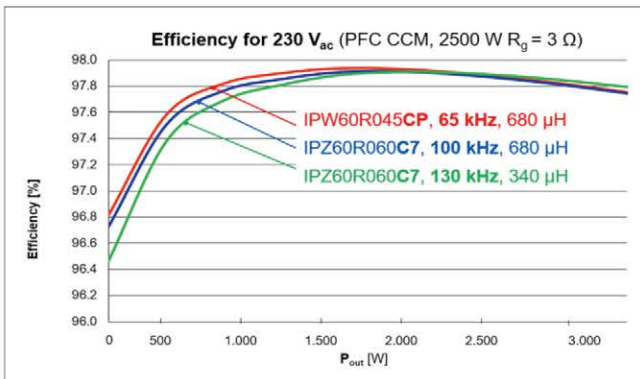


그림 10 스위칭 주파수에 따른 C7 vs CP 효율 비교

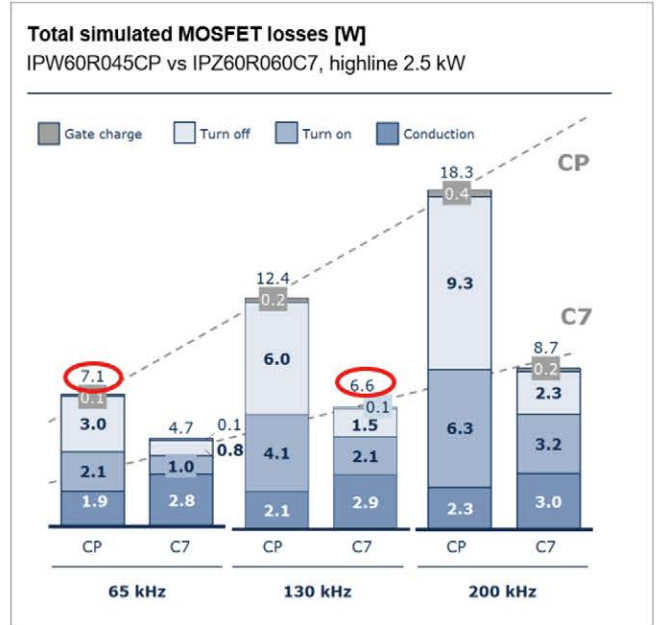


그림 11 CoolMOS™ C7 vs CP의 총 손실 비교

MOSFET 자체에서 발생하는 총 손실을 분석하여 CoolMOS™ C7과 CP 시리즈의 손실을 비교한 결과를 그림 11와 같이 나타내었다. 스위칭 주파수 65kHz일 때 CoolMOS™ CP 제품의 총 손실보다 130kHz일 때 CoolMOS™ C7 제품의 총 손실이 더 낮은 것을 알 수 있으며 이것은 turn off 스위칭 손실의 저감이 주효하게 영향을 끼쳤음을 알 수 있다. CoolMOS™ C7 시리즈는 오랜 시간에 걸쳐 시장으로부터 검증된 실리콘 기술을 바탕으로 사용자로 하여금 더 높은 주파수 사용영역으로 가는 길을 열어줌과 동시에 저비용 구조의 전원설계에 대한 솔루션을 제공한다.

3.3.2 전력밀도 향상

CoolMOS™ C7 시리즈 TO-220 패키지 제품의 경우, 가장 유사한 $R_{ds(on)}$ 제품을 갖는 타사의 제품보다 약 36% 더 낮은 $R_{ds(on)}$ 을 구현하여 고전력밀도의 시스템을 설계하는 데 매우 큰 이득을 제공한다.



그림 12 TO-220/D²PAK에 가장 낮은 $R_{ds(on)}$ 을 구현

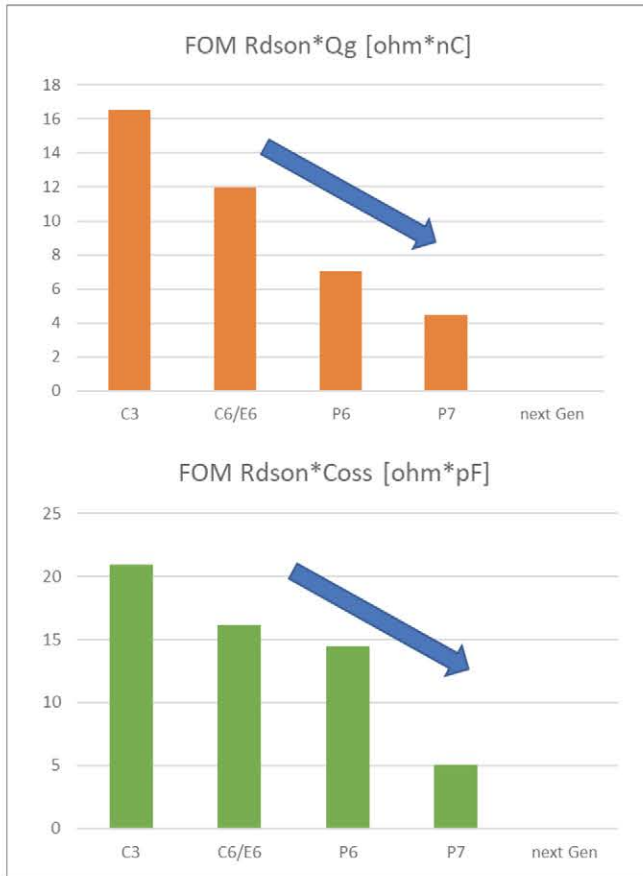


그림 13 FOM $R_{ds(on)} * Q_g$ 과 $R_{ds(on)} * C_{oss}$ 개발 추이

3.4 FOM $R_{ds(on)} * Q_g$ 과 $R_{ds(on)} * C_{oss}$ 향상

CoolMOS™ 테크놀로지별 제품군의 FOM (Figure of Merit) 수치를 비교해 보면, 기술에 따른 개발 추이는 지속적으로 낮은 도통 저항과 빠른 스위칭 특성을 갖는 방향으로 소자의 개발이 이루어지고 있음을 알 수 있다. P6 제품 대비 P7 제품의 FOM $R_{ds(on)} * Q_g$ (ohm*nC)는 약 35% 정도 더 개선되어 스위칭 소자의 도통 손실과 스위칭 손실을 동시에 저감시켰고, FOM $R_{ds(on)} * C_{oss}$ (ohm*pF)의 경우는 약 65% 가량 더 개선이 되어 경부하 조건에서의 효율을 크게 향상시킬 수 있게 되었다.

Device parameters	Competitor A	Competitor B	600 V CoolMOS™ C7 (IPV5SR040C7)	Comments
$R_{DS(on)}$ max [mΩ]	38 mΩ	40 mΩ	40 mΩ	Similar $R_{DS(on)}$ for real comparison
Gate Charge Q_g type [nC]	185 nC	135 nC	107 nC	Q_g , C_{oss} , E_{sw} to show advantages in switching losses
C_{oss} [pF]	200 pF	140 pF	85 pF	
F.O.M $R_{DS(on)} * Q_g$ [Ω.nC]	7.0 Ω.nC	5.4 Ω.nC	4.3 Ω.nC	Benefits over light load and full load

그림 14 CoolMOS™ C7 vs 타사 제품 비교

MOSFET의 주요 성능을 나타내는 이러한 주요 파라미터 값의 향상은 고효율, 고주파 스위칭, 고전력밀도의 설계를 가능하게 하며 결과적으로는 시스템 전체의 비용을 줄이는 것을 지향한다.

4. 결론

전력용 반도체 신소재로 주목받는 WBG 스위치 소자의 출시로 각 산업분야에서는 이것의 응용에 대한 연구가 활발히 전개되고 있다. 기존의 실리콘 스위치 소자를 어느 분야와 영역까지 WBG 소자로 대체할 수 있는지에 대한 검토와 그 영역의 경계를 확인하고자 하는 시도가 꾸준히 이어지고 있다. 실리콘 스위치 소자 또한 오랜 시간 시장에서 검증된 기술을 토대로 스위칭 효율과 패키지(TO-247-4, TOLL, sTOLL, DDPACK, ThinPAK 8x8, ThinPAK 5x6등) 성능을 혁신적으로 향상시키는 연구와 개발로 실리콘 소자의 한계를 극복하려는 노력이 계속되고 있고 이는 WBG 소자와는 차별화된 또 다른 가치를 만들어 내는 새로운 출발점이 되고 있다.

이동욱 인피니언 테크놀로지스 코리아 부장
 2001년~2008년 삼성전기 Power개발팀 선임연구원.
 2008년~현재 인피니언 테크놀로지스 코리아 부장.

