

미래사회를 지탱하는 파워디바이스 기술의 진전

불투명한 경제정세의 와중에서도 전기에너지를 지탱하는 근간이 되는 파워 일렉트로닉스 분야는 확실히 그 기술 개발을 향상시켜 오고 있다.

특히 파워디바이스는, 지구환경과 생활환경을 보다 쾌적하게 하기 위하여 인버터 장치 등의 각종 전력절약기와 풍력·태양광·연료전지 등 클린에너지의 전력제어장치에 없어서는 안되는 반도체디바이스로 성장했다.

파워디바이스 중에서도 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)의 기술혁신은 요 20년 사이에 비약적인 성과를 거두었다.

1980년대에 제품화된 IGBT는, 반도체메모리의 초미세가공기술을 도입하면서 5 μ m에서 서브미크론의 디자인틀로 발전하여, 2000년대에 들어 칩의 전류밀도는 약 2배, 포화전압은 약 65%까지 개량되었다. 이와 같은 IGBT의 변천은, 전력손실을 대폭적으로 저감시켜 에너지절약기의 전력변환효율 향상에 공헌하고 있다.

파워디바이스의 기술진보에서 또 한 가지 잊지 말아야 할 것은 주변회로의 집적화(集積化)에 의한 고성능·고기능화이다. 최근의 인버터용 파워디바이스로 가장 많이 사용되고 있는 파워모듈은, IGBT 등의 파워칩과 그 주변회로와의 컬래버레이션에 의한 제품이다. 다시 말하면 구동회로, 전류·전압·온도센서 및 그것들의 보호회로가 IC(集積回路)에 편입되어 고기능·소형화를 촉진시키고 있다. 구동회로는 LVIC(저전압집적회로)에서 HVIC(고전압집적회로)로 발전하여 전류·온도 등의 각종 센서도 동일 칩에 탑재할 수 있게 되었다. 또 센싱이나 보호기능뿐만 아니라 출력전류의 제어를 위한 연산기능과 di/dt의 제어기능이 내장되도록 되어 있어, 보다 고성능의 인텔리전트 파워모듈(IPM)이라고 불리는 새로운 개념의 파워디바이스가 실현되었다.

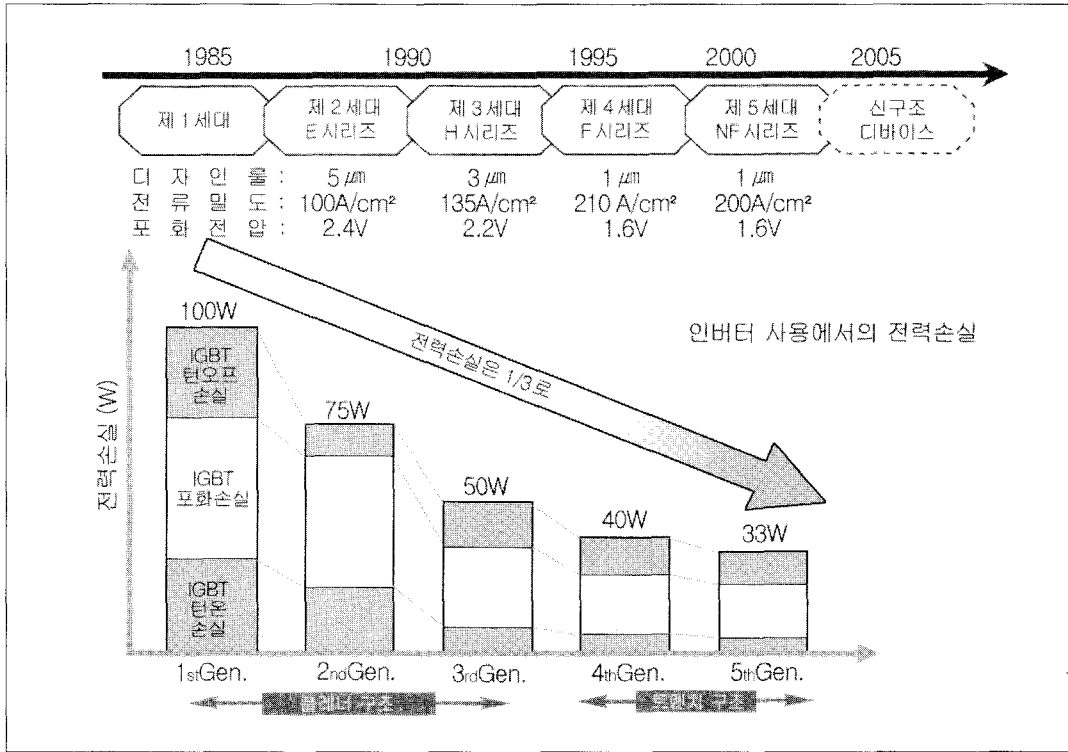
또한 패키지 기술도 내부배선 인덕턴스의 저감과 트랜스퍼 몰드패키지의 개발로, 소형화뿐만 아니라 파워칩의 성능·기능을 충분히 발휘할 수 있도록 개발이 적극적으로 추진되고 있다.

1. 머리말

미쓰비시電機의 파워디바이스 사업은, 세계시장의 IGBT 모듈과 인텔리전트 파워모듈 분야에서 기술상으로 보거나 마켓 세어로 보더라도 언제나 주도적 위치를 지키며, 파워 일렉트로닉스 응용에서 유익한 제품군(群)을 지속적으로 시장에 투입하여 왔다. 이들 신제품을 만들어 내는 기술개발의 원천은, 시장니즈 및 고객요구에

어떻게 응할 것인가 하는 점에 있다는 것을 충분히 인식하고 제품 개발을 추진하여 왔다.

21세기, 환경문제가 주목을 받고 있는 현재, CO₂ 삭감 대책으로서 에너지절약과 클린에너지가 불가결의 요소로 되어 있으나, 그 중심이 되는 것이 인버터로 대표되는 전력절약기 및 태양광·풍력발전, 연료전지의 클린에너지 기기이다. 이들 전력변환장치의 주역으로서 파워디바이스는 없어서는 안 될 존재이며, 그 성능, 신뢰성의 향상



〈IGBT 모듈의 기술혁신에 의한 전력손실의 변천〉

IGBT 모듈의 각 세대에서의 칩기술 및 그 성능의 변천에 의해, 인버터 응용에서의 전력손실이 비약적으로 개선되기에 이르렀다. 이들 기술혁신은 인버터장치의 소형화·고신뢰도화·고효율화에 크게 공헌하여, 인버터 혁명을 가져왔다.

에 대한 기대는 크다.

본고에서는, 파워모듈을 중심으로 한 최근의 기술과 신제품, 특히 제5세대 IGBT 칩 “CSTBT(Carrier Stored Trenchgate Bipolar Transistor)”를 응용한 IGBT 모듈과 IPM, 그리고 신세대 소자에 대하여 종합하였다.

2. 미쓰비시電機 파워디바이스의 개발 전망

미쓰비시電機는 파워디바이스에 있어서의 신제품 개발방침으로서, 먼저 특정분야의 강력한 파워디바이스 제품에서 선도적 메이커의 위치를 목표로 하고, 다음은 기

술혁신을 토대로 새로운 시장을 개척하는 것을 사업비전으로 내걸어 앞으로 사업을 전개해 나간다는 계획이다.

이와 같은 사업비전을 구체화하기 위해 미쓰비시電機의 총력을 발휘한 개발체제하에서, 시장의 주요 고객과의 파트너쉽 관계를 소중하게 여겨 각기 응용분야에 적합한 가치있는 제품개발을 지속적으로 추진해 나간다는 방침이다.

더욱이 기존제품과 같은 단기능의 파워디바이스가 아니고 솔루션형 디바이스로서 인티그레이션(集積)화와 인텔리전트(機能集積)화를 적극적으로 추진해 나간다.

파워칩의 주변기능은, 이제까지 배양해 온 종합반도체

〈표 1〉 미쓰비시電機의 파워모듈 주요제품군과 그 응용분야

제품군	응용분야	진보하는 기술
DIP-IPM(SIL을 포함)	소용량 인버터(~3.7kW) 가전 및 산업용 인버터	트랜스퍼 몰드 패키지에 의한 소형화 IGBT 기술혁신에 의한 저손실화
IGBT 모듈	일반산업용 인버터 각종 전원 용도	저손실 IGBT 칩 프레너→트렌치→CSTBT
인텔리전트 파워모듈(IPM)	인버터 AC 서버	인텔리전트 기능집적화(고성능화) 온칩 온도센서, di/dt 제어 etc
자동차용 인텔리전트 파워모듈	HEV, FCHV	인텔리전트 기능집적화 고수명, 고신뢰성
HVIGBT HVIPM	전차용 인버터 공업용 인버터	고내압화 2.5kV→3.3kV→4.5kV→6.5kV 고신뢰성

메이커로서의 기술력으로 LVIC(Low Voltage IC)나 HVIC(High Voltage IC)와 파워칩을 융합시킨 새로운 개념의 파워모듈을 제안해 나간다. 또 HEV(하이브리드 전기자동차), FCHV(연료전지자동차) 등의 전기자동차 관련 인텔리전트 모듈과 풍력발전·연료전지 등의 신에너지 분야에 대해서도 파워모듈 시장으로서 크게 개척해 나간다는 계획이다.

현재 주력하고 있는 파워디바이스, 특히 파워모듈 제품은 표 1에 표시하는 제품군과 응용분야이다. 제품카테고리별로 보면 소용량의 트랜스퍼 몰드형 DIP-IPM, 중용량으로는 제5세대 IGBT 모듈과 IPM, 특히 고내압 IGBT-IPM이다.

3. IGBT의 기술 진보

1950년대에 시작된 파워디바이스의 역사는 “보다 저손실(低損失)”, “보다 고내압(高耐壓)”, “보다 고속(高速)”을 목표로 각각의 응용에 적합한 디바이스를 제공해 왔다.

그 동안 파워 일렉트로닉스 분야에 있어서도 급격한 변화를 이룬 것이 인버터장치이다. 종래의 사이리스터에

서 바이폴라 파워트랜지스터로 옮겨져 인버터장치는 급속하게 발전하게 되었다. 그 후 불과 수년이 지나 IGBT가 개발·실형화 되어 파워디바이스의 주역의 자리는 IGBT로 바뀌어 왔다. 현재 IGBT를 사용한 인버터 장치는 고성능화·소형화·저(低)코스트화가 이루어져 인버터 가전기기에서 산업용기기, 전기자동차, 전차에 이르는 여러 분야에 응용되고 있다.

기술적으로 보아도 IGBT는 최근의 국제적인 학회나 전시회에서 그 발표건수는 다른 파워디바이스에 비해 특별히 많다. 이것은 각 메이커와 연구기관의 연구태마, 제품개발에 대한 관심의 높이를 나타내고 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다.

동사도 파워모듈의 최고 메이커로서, IGBT 칩의 성능 향상을 목표로 끊임없는 기술혁신을 도모해 오고 있다.

IGBT 성능개선의 역사는 파워손실을 저감하는데 줄곧 힘써왔다. 한편 파워손실의 실체를 말한다면 포화전압과 스위칭시간으로, 이 양자가 트레이드오프(Trade-off)의 관계에 있는 것, 또한 파괴내량(破壞耐量)의 지표가 되는 안전동작영역(SOA)도 포함한 삼파(三巴)의 트레이드오프가 문제를 어렵게 하고 있다.

제1세대에서 제3세대까지의 IGBT는 에피택셜 웨이

퍼를 사용하여 미세화(微細化)와 라이프타임 제어기술에 의한 최적화설계로 특성 개선을 도모해 왔다.

제4세대에는, IGBT도 MOSFET와 마찬가지로 평면 구조에서 트렌치구조로 미세화의 극한 웨이퍼 프로세스 기술이 발전하여 비약적으로 포화전압의 개선이 이루어졌으나, 그 반면에 포화전압의 개선은 포화전류(단락전류)의 증가를 가져왔다. 이것을 극복하기 위하여 이미터(Emitter) 밸러스트저항 삽입과 전류 억제회로(Real Time Current Control : RTC)를 외부회로로서 부가하는 등의 제어기술이 고안되었다.

제5세대가 되어, 얇은 두께의 웨이퍼 프로세스기술이 실용화되어 LPT(Light Punch Through)형 소자의 개발로 다시 성능향상을 이룩하였다. 이 제5세대에는 제4세대의 트렌치구조의 결점을 개선시킨 Wide Cell Pinch형의 CSTBT 구조를 개발하여 포화전압, 스위칭손실, SOA의 트레이드오프 곡선을 대폭적으로 개선했다.

이와 같은 IGBT의 성능개선은, 트렌치구조, 얇은 두께의 웨이퍼를 개발의 "키워드"로 하여 비약적인 성능개선을 이룩하여 왔으나, 이것으로 그치지 않고 이들 새로 개발된 웨이퍼 프로세스기술을 응용함으로써 차세대 신(新)기능소자의 개발이 가능하게 되었다.

동사에서는, 차세대 신기능소자로서 역저지형(逆阻止型) IGBT(Reverse Blocking IGBT, 이하 "RB-IGBT"라 함)의 제품화를 위해 개발을 추진하고 있다.

RB-IGBT는, 차세대 모션 컨트롤의 새로운 제어장치로서 기대되고 있는 매트릭스 컨버터회로에 최적한 디바이스로서 그 실용화가 기대되고 있다.

또한 현재의 전압형 인버터장치에 없어서는 안될 Free-wheel Diode(FWD)를 IGBT 칩에 내장한 역도통형(逆導通型) IGBT(Reverse Conducting IGBT, 이하 "RC-IGBT"라 함)의 개발연구도 장래의 실용화를 위해 추진되고 있다.

4. HVIC 기술과 인텔리전트화

IGBT나 MOSFET 등의 파워칩은 그것 자체로 스위칭동작을 할 수가 없다. 결국, 게이트에 입력신호를 필요로 하며, 적절한 전기신호를 발생시키기 위한 제어회로가 반드시 필요하다. 파워디바이스의 제어회로는, 응용에서의 필요에 따라 구동기능이나 보호기능 외에 입력절연기능, 자기진단기능, 특히 연산기능 등을 부가하도록 요청되고 있어 이러한 요구에 대응하여 파워디바이스의 인텔리전트화가 진행되고 있다.

동사의 IPM은, 1980년대 후반에 업계 최초로 제품화되어, 지금까지 많은 응용분야에서 고객의 요구, 애로사항에 대한 솔루션으로서 큰 역할을 다함은 물론 기술향상도 이룩하여 왔다.

이들 IPM은 파워디바이스로서 사용이 간편한 외에 시장에서의 고장률이 개선되는 등의 뛰어난 장점으로, 산업용 인버터, 인버터 가전기기, 전기자동차, 전차 등의 구동시스템 용도로 폭넓게 보급되었다. 각기의 응용장치에 의해 요구되는 기능은 다르지만, 초기의 IPM에서는 각 응용장치에 공통으로 최소한의 필요한 기능으로서 구동회로, 보호회로를 LVIC에 내장하여, IGBT 칩과 조합시킨 파워 하이브리드 디바이스로서 모듈패키지에 수납하였다.

그 후 1990년대에 들어, 가전제품에 인버터 기술이 채용되어 급속히 보급되기 시작하면서 보다 소형화, 고집적화(高集積化), 저코스트화와의 강력한 요구에 따라 HVIC의 개발이 추진되었다.

이 HVIC의 실현으로 마이크로컴퓨터부터의 제어신호를 직접 받을 수 있는 ASIPM(Application Specific IPM)과 DIPIPM(Dual In Line Package IPM)이 잇달아 상품화되고, 현재에도 새로워진 소형화가 진척되고 있다.

HVIC는, 특히 3상 인버터 응용회로에서의 IGBT 제어회로용으로서, 그 유효기능을 확대해 나가고 있으며 기술적으로도 개발을 진척시키고 있다. HVIC의 구성요소 기술로서 근간을 이루는 것은 절연분리기술과 기능집적 기술이다.

절연분리기술은, 현재 집합분리와 유전체분리의 두가지 방식이 있으며, 각기 사용하는 전압영역과 코스트 퍼포먼스에 따라 달리 적절히 쓰여진다.

한편 집적화기술면에서는 LSI의 프로세스기술로 미세화(微細化)를 함으로써 보다 고밀도의 회로 집적이 가능하다.

최근에는 EPROM 내장 등의 다기능화도 실현되고 있다. 또 CMOS 기술의 채용으로 소비전력을 줄이는 등 소형이면서 고품질의 장치설계에 기여할 수 있는 것도 큰 장점으로 들 수 있다.

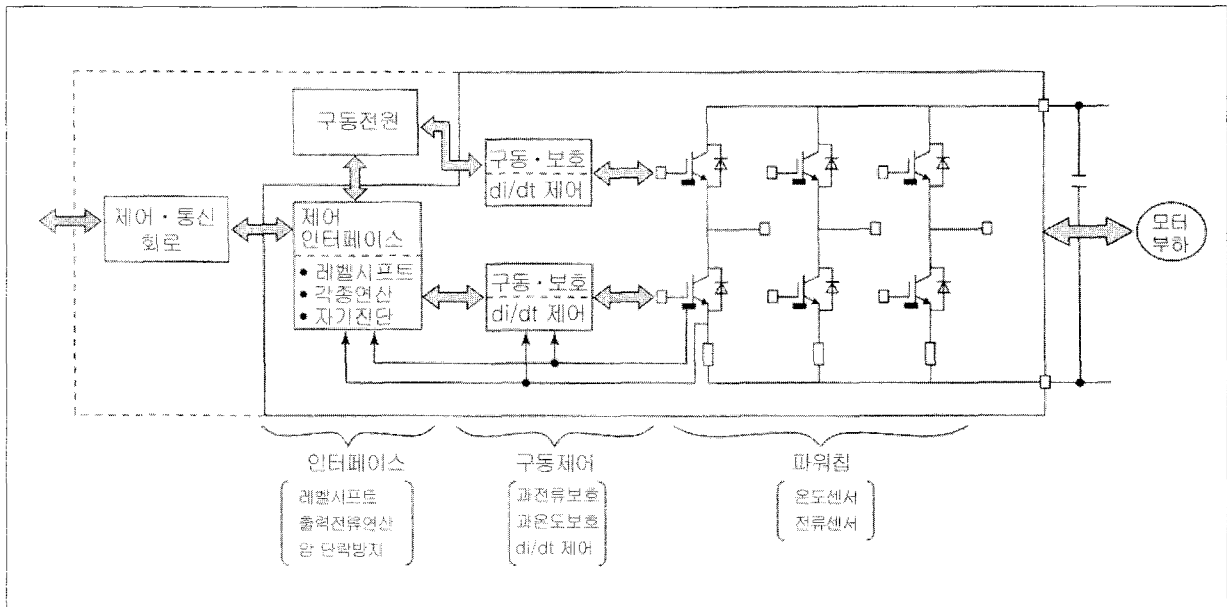
이제까지의 단기능 디바이스에서는, 주변회로도 포함

한 제어기판을 탑재하는데 큰 공간이 필요하여, 장치 전체의 용적 내에 수납하는 것이 설계자에 있어서는 큰 문제로 되는 경우가 많이 있었다. HVIC는, 필요한 기능회로가 실리콘 칩 위에 간결하게 정리되어 있어, 특히 소형·경량이 요구되는 인버터 가전제품 응용에 유효하다.

파워모듈의 인텔리전트화는 앞서 기술한 바와 같이 LVIC, HVIC의 기술에 의해 ASIPM, DIPM으로 진화하고, 더욱이 시스템화를 지향한 노력을 강화하고 있다. 이 배경에는 시장니즈로서 “보다 고부가가치의 집적화에 의한 코스트 퍼포먼스의 추구”가 있다.

이에 보다 간편하고 보다 쓰기 쉽고 보다 잘 파손되지 않는 파워디바이스를 목표로 새로운 시스템화를 추진해 나갈 필요가 있다.

그 대응책의 일례로서 인버터 응용에 있어서의 인텔리전트화의 현황과 장래기술을 그림 1에 소개한다. 파워칩 측에는 각종 검출기능 내장이 중요한 과제이다.



〈그림 1〉 인버터용 인텔리전트 파워모듈의 시스템

각 IGBT 칩상에 반도체온도센서를 부가하여 모터 로크 동작시에도 온도이상 검출·보호가 가능하게 되었다. 이 기능은 장래의 부하제어에 유효한 수단이 될 것이다. 또 각상의 전류검출기능을 이용하여 전류 벡터제어가 저코스트로 실현되고 있다.

한편, 제어측에는 구동회로 외에 각종보호기능이 내장되고, 또한 출력전류에 따른 di/dt 제어기능이 부가된 것으로 인해, EMI 대책에 유효한 기술로서 앞으로 이용가치를 알게 될 것이다.

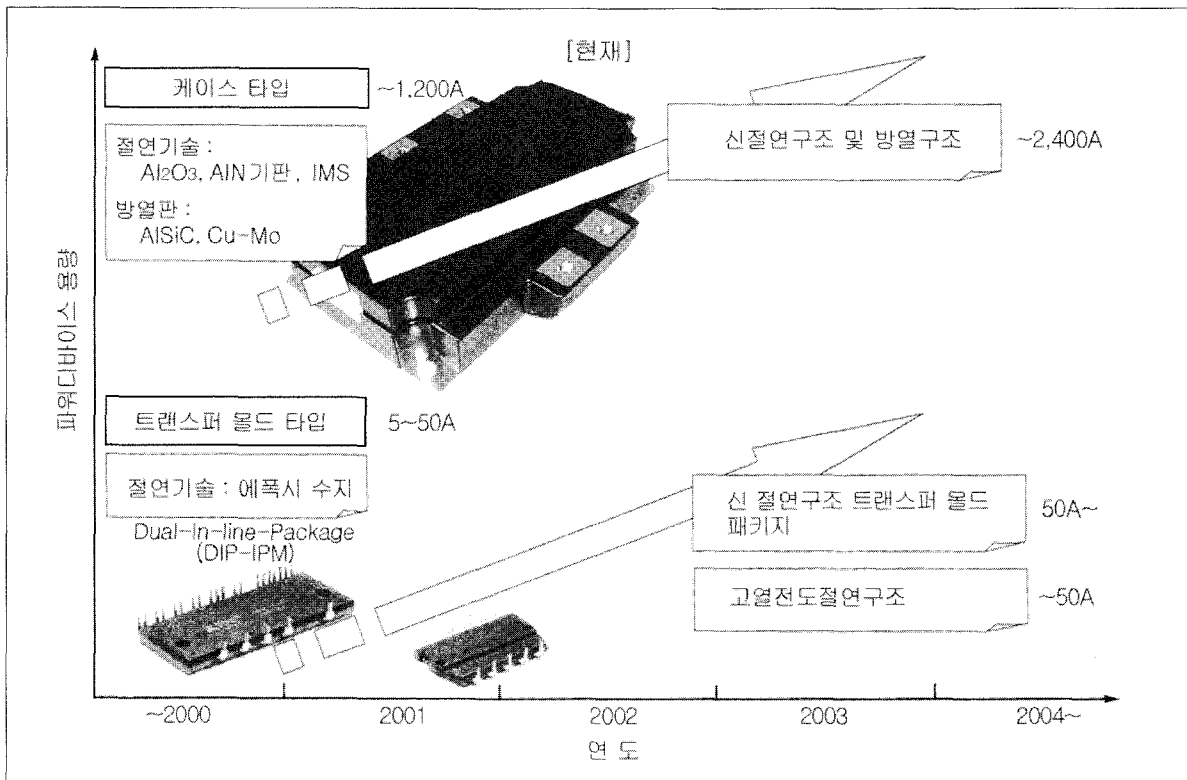
또한 제어 인터페이스로서 레벨 시프트, 자기진단 및 연산기능이 내장되어 장치의 신뢰성 향상, 제어성능 개선에 크게 기여하고 있다. 장래는, 제어전원이나 외부와의

통신기능을 구비한 시스템화의 방향으로 나아갈 것으로 생각된다.

이와 같은 파워디바이스 제어용 HVIC 기술은, 모터 제어장치에 그치지 않고 형광등용 전자제어, PDP (Plasma Display Panel) 구동용 등의 용도에도 확대되고 있다.

5. 패키지 기술과 신뢰성

지금까지 파워디바이스의 패키지는, 외부환경으로부터의 보호와 설치 및 외부전극에의 접속 등이 주된 필요기능이었으나, 최근의 스위칭용 파워디바이스 특히 파워모



〈그림 2〉 파워모듈의 패키지 기술

들에 있어서는 ① 내부임피던스의 최소화, ② 내부전극에 의한 전자계(電磁界)의 영향 억제, ③ 최적의 절연성능, ④ 장수명화(長壽命化)의 요구 및 코스트의 관점에서, 그것에 대응하는 패키지 기술이 전개되고 있다.

동사는 이제까지 각종 용도에 대응하여 파워모듈 패키지를 개발해 왔으며, 대별하면 그림 2에 표시하는 바와 같이 케이스 타입과 트랜스퍼 몰드 타입의 2가지로 나누어진다.

케이스 타입에서는 비교적 고내압·대전류의 디바이스에 적합하며, 트랜스퍼 몰드 타입은 소형, 저코스트의 소용량 파워모듈에 채용되고 있다. 이 양자는 그 성능도 각각의 용도에 맞추어져, 외부전극단자와 절연기술이 크게 다르다.

파워모듈에 있어서, 절연기술은 매우 중요하며 현재 채용되고 있는 주된 것으로 세라믹(Al_2O_3 , AlN)기판, IMS(Insulated Metal Substrate) 및 수지절연이 있다.

각각의 절연기술은 절연재료와 그 두께로 절연성능, 열전도성, 절연용량(Capacitance)이 결정된다. 그 때문에 사용전압, 발생손실, 고주파누설전류의 관점에서 최적의 절연구조가 선정된다. DIPIPM은 수지절연이지만, 새로운 구조기술 개발에 의해 그 동안 한계점에 이르고 있던 전류용량 20A의 벽을 깨고 50A까지 허용될 수 있게 되었다. 또한 대용량에의 도전이 시작되고 있다.

한편, 턴오프 서지전압의 억제, 스위칭시의 과형진동의 억제를 목적으로 패키지 내부의 전극배선과 구조를 개량하고 내부인덕턴스의 저감을 계획하는 것은 중요한 기술 과제이다.

또한, 스위칭시의 과도전자계현상을 정량적으로 해석·평가함으로써 모듈성능에 끼치는 전자계의 악영향을 억제하는 것도 기술과제로 되어 있다.

이들 기술과제를 해결하기 위하여, 모듈 내부의 각배선

과 배선간의 결합을 정량화(定量化)하는 분석정수의 추출(抽出)도 모듈의 동특성(動特性) 해석으로 시뮬레이션에 의한 전자계(電磁界)해설이 가능해져 실제의 패키지 설계에 사용되고 있다.

파워모듈은, 장수명화(長壽命化)도 중요한 과제이다.

환경조건이나 사용조건에 의해 수명요구치는 달라지지만, 특히 자동차·전차 등의 차량탑재용도로는 사용환경조건이 엄격하다. 온도사이클과 파워사이클 수명은 재료간의 접합면에서 결정되기 때문에 납땜접합기술·알루미늄 와이어접합기술의 연구를 기반으로 장수명·고신뢰성 모듈의 개발에 전력을 다하고 있다.

6. 맺음말

21세기의 환경형사회에서 CO_2 삭감을 위한 에너지절약과 클린에너지의 창출을 선도하는 파워 일렉트로닉스 기술, 그중에서도 그 열쇠를 쥐고 있는 파워디바이스가 어떠한 역할을 완수할 수 있는지가 중요하다.

파워디바이스의 기술혁신은, 이상 기술한 바와 같이 눈부신 바가 있으며, 시장니즈·고객요구에 대응한 성능·품질·신뢰성 및 사용하기 편리함을 추구하고면서 발전해 오고 있다.

이 글에서는 이들 요구에 대응한 신제품과 그의 새로운 기술과 함께 장래의 기술전망에 대해 소개하였다. ✕

이 원고는 일본 三菱電機技報에서 번역, 전제한 것입니다. 본고의 저작권은 三菱電機(株)에 있고 번역책임은 대한전기협회에 있습니다.