차량용 전력반도체 평가를 위한 파워 사이클러 개발

김태훈, 정진범
자동차부품연구원

Development of the Power Cycler for Evaluation of Power Semiconductor for Vehicles

Tae-Hoon Kim, Jin-Beom Jeong
Korea Automotive Technology Institute

ABSTRACT

최근 친환경 자동차로의 적용을 위한 차량용 전력반도체 에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 전압, 전류 등의 기본 성능사양은 선진社의 동등 혹은 유사 수준에 도달하였음에도 아직 수명 내구성과 같은 신뢰성 측면에서는 미비한 실정이다. 이에 본 논문에서는 대용량 전력반도체 모듈의 신뢰성 평가 항목 중 하나인 파워 사이클 시험평가를 위한 파워 사이클러 개발에 대해 논한다. 본 기술개발을 통해 개발된 파워사이클러는 기존 고가의 외산 파워 사이클러를 도입하거나 해외 평가기관을 활용해야 했던 국내 전력반도체 모듈 개발업체의 지원이 가능하며, 또한 국산화 개발을 통해 전력반도체 모듈 개발업체의 요구사항을 충분히 반영할 수 있는 맞춤형 파워사이클러 개발이 가능하다. 개발된 장비를 활용하여 전기차용 전력 모듈에 대한 파워사이클 평가를 진행하며, 그 타당성을 검증한다.

1. 서 론

자동차의 차량용 반도체 관련 시장은 지속적으로 증가하고 있으며, 특히 친환경 자동차의 주 동력원인 전기모터의 구동 및 배터리 충전기 등의 차량용 전력변환장치에서, 전력반도체는 전력변환장치 구성을 위한 핵심부품에 해당한다. 이러한 차량용 전력 반도체는 신뢰성, 내구성, 양산 안정성 등의 요구특성이 일반 가전용이나 산업용 반도체에 비하여 높은 품질 수준을 요구하고 있어, 신규 기업의 시장 진입이 어려운 분야 중 하나이다. 최근, 국내 일부 대기업을 중심으로 친환경 자동차로의 적용을 위한 차량용 전력반도체 모듈에 대한 연구개발이 진행되고 있지만 전압 및 전류 등의 기본 성능사양은 선진社의 동등 혹은 유사 수준에 도달하였음에도 아직까지 수명 내구성과 같은 신뢰성 측면에서는 미비한 실정이다. 이에 따라 본 논문에서는 대용량 전력반도체 모듈의 신뢰성 평가 항목 중 하나인 파워사이클 시험평가를 위한 파워 사이클러 개발에 대해 논한다. 개발된 파워 사이클러는 접합부(Junction)의 온도가 일정 온도까지 상승하도록 전력을 인가하고 접합부가 해당 온도에 도달하면 전원공급을 차단하여 하한 설정 온도까지 냉각되도록 하는 사이클 반복 시험이 가능하다. 또한 사이클에 따른 모듈 노화 및 예상치 못한 고장 시 시험을 중단하기 위한 여러 안전 조건 기능을 가지고 있다. 개발된 장비를 활용하여 전기차용 SiC 전력 모듈에 대한 파워사이클 평가를 진행하였으며, 장시간 사이클 시험동안 장비가 안정적으로 운용됨을 확인하였다.

2. 차량용 대용량 전력반도체 평가용 파워 사이클러 개발

2.1 차량용 대용량 전력반도체 평가 요구사항 분석

먼저 전력반도체 평가 요구사항 분석을 위해 시험평가 규격을 살펴보면 AEC Q(Automotive Electronic Council Qualification), JEDEC(Joint Electron Device Engineering Council) 등이 있으며, 차량용 전력반도체 모듈에 대한 평가 규격으로 AEC Q101이 해당되나, AEC 자체가 JEDEC를 많은 부분 적용하고 있어 이들 모두 확인하여한다. 또한, 전력반도체 모듈의 수명은 크게 와이어 본드부와 절연 기판의 솔더부의 영향으로 구분 지을 수 있으며, 이 중 와이어 본드부의 경우 실리콘과 알루미늄 사이의 확장계수 차이에 의한 소재의 변형 및 접합부의 작은 균열이 발생하여 수명이 단축되는 본딩 와이어 리프트 오프가 주된 수명저하 현상이다[1]. 본딩 와이어 리프트 오프 현상 등과 같이 전력반도체 모듈의 정상 동작이 지속되는 상황임에도 발생 가능한 수명저하 현상에 대해, 제품 개발 단계에서 이를 확인하고 검증하기 위한 시험 방법을 JEDEC나 AEC 규격에서도 제시하고 있으며, 이는 파워 사이클 시험으로 수명 저하를 야기할 수 있는 상황을 반복적으로 인가하여 전력반도체 모듈의 수명 특성을 확인하는 시험 방법이다. 파워 사이클 시험은 접합부(Junction)의 온도가 일정 온도까지 상승하도록 전력을 인가하고, 접합부가 해당 온도에 도달하면 전원공급을 차단하여 하한 설정 온도까지 냉각되도록 하는 사이클을 반복수행하는 시험이다[2]. 파워 사이클 시험을 수행하기 위한 파워 사이클러는 전력모듈에 전력을 인가하는 전원공급장치와 온도 측정을 위한 온도 측정부, 냉각을 위한 냉각부, 전체 시스템을 제어하기 위한 제어부 등으로 구성되어 있어야 한다.

2.2 파워 사이클러 하드웨어 및 소프트웨어 개발

파워 사이클러 평가장치의 하드웨어 구성은 대전류를 공급하기 위한 전원공급장치, 냉각을 위한 칠러(수냉) 및 냉각팬(공랭), 온도 측정을 위한 온도 센서, 데이터 분석 및 저장을 위한 DAQ 등 여러 요소가 합쳐진 시스템으로, 전체 시스템 사진은 그림 1과 같다. 구축된 평가 장치는 대상시료의 시험 평가 사양에 맞춰 정전류 1,200A까지 출력 할 수 있으며, 정밀도는 ±1%로 설계되었다. 또한 시험 시 전력 모듈 시료를 냉각, 고정시킬 수 있는 지그 및 인가되는 전류를 제어하기 위한 별도의 전력반도체, 데이터 취득 및 분석 제어를 수행하는 제어시스템 등으로 구성되어 있다.

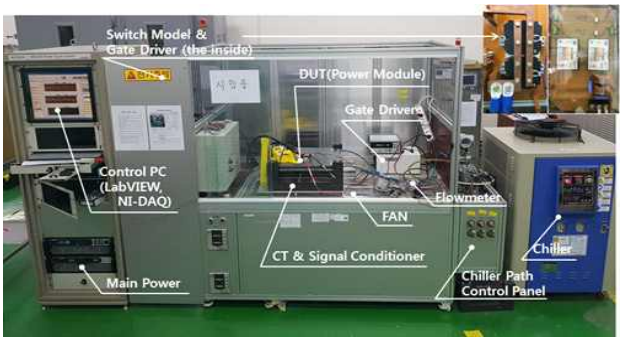

그림 1 개발된 파워 사이클러 시스템 사진
Fig. 1 Photograph of the developed power cycler system

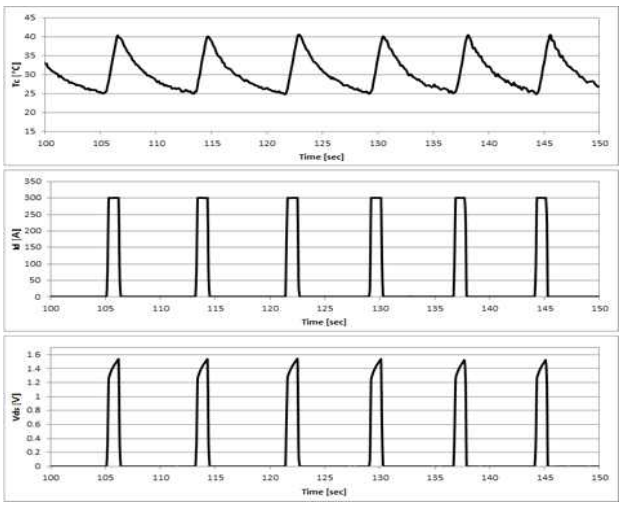

그림 2 케이스 온도, 드레인전류, 전압 파형
Fig. 2 Waveforms of the Tc, Id, Vds

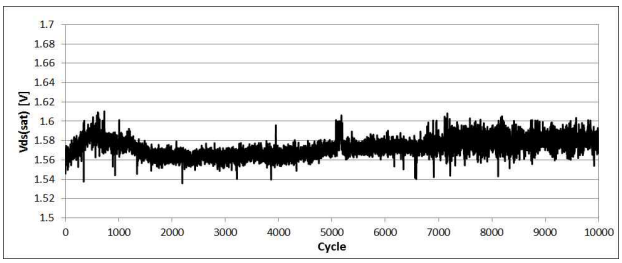

그림 3 케이스 온도, 드레인전류, 전압 파형
Fig. 3 Waveforms of the Tc, Id, Vds

우선 시험이 시작되면 전력모듈의 온도를 측정하여 현재 시점이 처음인지 진행 중인지를 판단한다. 시험이 처음 시작되었다면 전력 모듈의 초기 온도는 주위 환경온도로 충분히 소킹(Soaking)되어 있으므로 전원공급장치의 전류를 인가한다. 이후 시험이 계속 진행 중에 있다면 모듈의 온도가 최대 온도 보다 높을 경우에는 전류를 차단하며, 최소온도보다 낮을 경우에는 전류를 계속해서 인가하여 준다. 최대 온도 이후 전력 모듈의 온도가 냉각되고 있거나 최저 온도 이후 전력 모듈의 온도가 가열되고 있다면 전원공급장치의 On/Off 제어 신호는 이전 값을 유지하게 된다. 또한 알고리즘이 종료되기 직전에는 전원공급창치의 On/Off 상태를 이전 값으로 반환하며 루프가 순환한다.

2.3 SiC 전력반도체 개발품 평가 수행

전력반도체 모듈 개발업체에서 개발한 SiC 파워 모듈을 대상으로 파워사이클러를 이용하여 시험을 수행하였다. 개발된 전력모듈은 사이즈를 최소화하기 위해 상측 및 하측 스위치가 각각 케이스 Top면 및 Bottom면에 장착되어 있는 구조로, 본 논문에서는 하측 스위치를 대상으로만 파워사이클 시험을 진행하였다. 시험 전류는 개발업체에서 제공한 패키징 온도에 따른 최대 허용전류를 고려하여 300A를 인가하였으며, 게이트 전압 Vgs는 20V로 항시 풀 턴온시켰다. 최대 접합온도는 100℃, 최소 접합온도는 25℃로 JESD22-A122에서 Test Condition A 조건에 준하는 ΔTj=75℃에 맞게 시험을 실시하였다. 전력모듈은 실제 어플리케이션에 맞게 수냉 냉각을 적용하였으며, 수냉 지그는 칠러에 의해 15℃로 유지되었다. 시험의 종료조건은 수행된 총 사이클 수가 목표 사이클에 해당하거나 드레인-소스 간 전압이 초기 전압 대비 20% 상승하였을 경우이다. 그림 2는 파워사이클 시험 시 케이스 온도 변화에 따른 드레인 전류 및 드레인-소스 전압의 변화를 나타내고 있다. 설정된 온도에 따라 특정 온도 이하로 떨어질 경우 Id 전류가 인가되어 Vds 전압이 상승하며, 특정 온도 이상 상승할 경우 다시 Id 전류가 차단되어 Vds 전압이 0V로 떨어지고 있다. 시험 파형을 통해 파워 사이클 시험 동작이 정상적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다. 그림 3은 파워사이클 시험 결과인 사이클에 따른 Vds(sat) 전압 변화를 나타내고 있다. 사이클 초기에는 전압이 급하게 증가하였지만 다시 낮아진 이후 완만한 증가세를 보이며 안정적으로 10,000사이클에 도달하였다. 종료 직전 Vds(sat)는 평균 1.546V 였으며, 초기 설정 전압 대비 약 2.1% 상승한 1.579V로 사이클이 종료되었다.

3. 결 론

본 논문에서는 대용량 전력반도체 모듈의 신뢰성 평가 항목 중 하나인 파워사이클 시험평가를 위한 파워 사이클러 개발에 대해 기술하였다. 개발된 파워 사이클러는 기존 상용제품과 PC 기반의 범용 제어 계측 프로그램을 이용하여 개발함으로써, 별도의 부품 개발에 소요되는 연구개발비 및 개발 기간을 단축할 수 있어, 저가이면서도 전력반도체 시장의 빠른 변화에 대응할 수 있는 장점을 가졌다. 개발된 장비를 활용하여 현재 개발 중인 전기차용 SiC 전력 모듈에 대한 파워사이클 평가를 진행하였으며, 장시간 사이클 시험동안 장비가 안정적으로 운용됨을 확인하였다.

본 논문은 산업통상자원부에서 주관하는 “(2세부)전기자동차 및 신재생에너지용 1200V급 Trench용 SiC 모듈 개발(과제번호: 10080502)” 사업의 지원 하에 수행됨

참 고 문 헌

[1] TU Chemnitz et al., "Power Cycling with High Temperature Swing of Discrete Components based on Different Technologies", Proceedings of the PESC04, Germany, pp. 2593-2598, 2004.

[2] A. Morozumi et al., "Reliability Design Technology for Power Semiconductor Modules", Fuji Electric Review, vol. 47, no. 2, pp. 54-57, 2001.