

IGBT소자의 열적 안정성을 고려한 방열설계

이준엽, 송석현
 현대중공업(주) 기계전기연구소

Thermal Design of IGBT Module with Respect to Stability

Joon-Yeob Lee and Seok-Hyun Song
 Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries., Co. Ltd.

ABSTRACT

Thermal design is required with considering thermal stability to verify the reliability of electric power device with using IGBT. Numerical analysis is performed to analyze the change in thermal resistance with respect to the various thermal density of heating element. Correlations between thermal resistance and heat generation density are established. With using these correlations, performance curve is composed with respect to the change in thermal resistance of cooling conditions for natural convection and forced convection.

Thermal fatigue is occurred at the inside and outside of IGBT by repeated heat load. The crack is occurred between base plate and ceramic substrate for the inside. When the crack length is 4mm, the failure is occurred.

Therefore, Thermal design method considering thermal density, thermal fatigue resistance is presented on this study and it is expected to thermal design with considering life prediction.

1. 서 론

반도체 소자를 사용하는데 있어서 설계 기술자는 열에 의한 여러 가지 문제를 해결하지 않으면 안되며, 전장품의 적정온도 유지는 소자의 안정적인 동작뿐만 아니라 파괴를 막기 위해서 반드시 필요하다. 전력변환기기 등에 이용되는 전력 반도체 소자로 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transister)가 주로 이용되고 있으며, 적절한 냉각방법을 이용하여 소자로부터 발생하는 열을 제거하기 위한 방열설계를 하고 있다. 초기 정상상태에서 IGBT 소자 Junction부의 허용온도 범위 내에서 안정적인 운전

만을 고려하여 설계하고 있으며, 설계여유는 통상적인 경험에 의하여 정해졌다. 그러나 운전시간이 지남에 따라, 반복 열부하에 의한 열피로(Thermal Fatigue)가 발생하여, 초기 설계된 전체의 열저항 허용치를 넘어 시스템의 불안정 및 IGBT 파괴를 초래하곤 한다. 따라서 본 연구에서는 IGBT를 이용하는 전력변환기기의 부하조건에 의한 피로열저항을 예측하고, 소자의 안정성 검토 및 수명을 고려한 최적의 방열 설계법을 도출하고자 한다.

2. 방열설계^[1]

2.1 열저항

2.1.1 발열밀도의 영향

일반적으로 발열원이 히트싱크 전면적에 걸쳐 발열 할 때, 소자의 온도상승 ΔT_{max} 는 그림1의 (a)와 같이 일정하나, 같은 발열량 Q 가 히트싱크의 일부에서 발열 할 때는 소자의 발열밀도가 높아져 Hot Spot되는 온도는 그림1의 (b)와 같이 나타난다. 이때 그림에서와 같이 발열소자의 열저항값 R_{total} 은 다음 식으로 표현된다.

$$R_{total} = R_0 + R_c \tag{1}$$

여기서, R_0 는 Average Thermal Resistance [$^{\circ}C/W$], R_c 는 Constriction Thermal Resistance [$^{\circ}C/W$]이다.

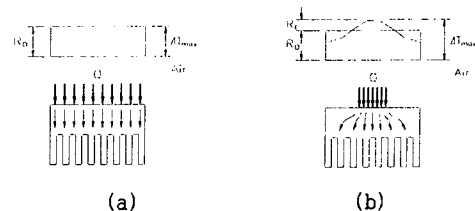


그림1. 히트싱크의 국소열저항 및 온도분포
 Fig.1 Local thermal resistance or temperature variation of heat sink shown with heat flow lines.

임의의 모델에 대하여 발열원의 면적을 변화시키며 수치해석을 진행하였으며, 이때 소자의 최대 온도는 그림2와 같다. 발열면적 변화에 따른 열저항 변화는 그림3과 같으며, 그림에서 소자의 발열밀도에 따라 히트싱크의 온도상승이 현저하게 변화됨을 알 수 있다.

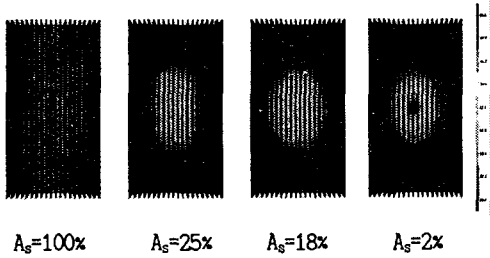


그림 2 발열밀도에 따른 히트싱크 온도분포
Fig. 2 Heat sink temperature contour with various heat source density

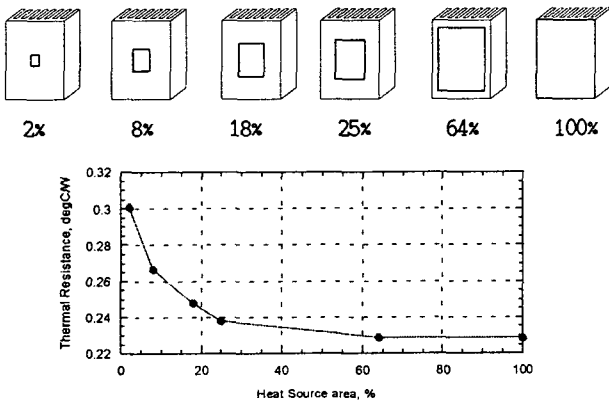


그림 3 발열밀도 변화에 따른 열저항 변화
Fig. 3 Thermal Resistance Profile with Various Heat Source Density

임의의 다수의 모델에 대한 수치해석 Data 분석을 통하여 상관계수를 도출하였으며, Added Thermal Resistance Ratio Factor, F_{Rr} 로 정의하였다. 식 (2)에서 R_c 는

$$R_c = F_{Rr} \cdot R_0 \quad (2)$$

이다. 한편 F_{Rr} 은 그림4와 같이 자연대류냉각 및 강제대류 냉각에 따라 그림과 같은 상관관계식으로 표현된다.

2.1.2 발열소자 위치영향

자연냉각시 발열소자의 국소 위치에 따라 히트싱크의 열저항 값은 현저한 차이를 나타내며, 특히 히트싱크 중앙에 위치한 경우보다 가장자리 및 코너에 위치한 경우 Hot spot되는 점에서는 최고 1.5~3배 정도의 온도상승 값을 가진다.

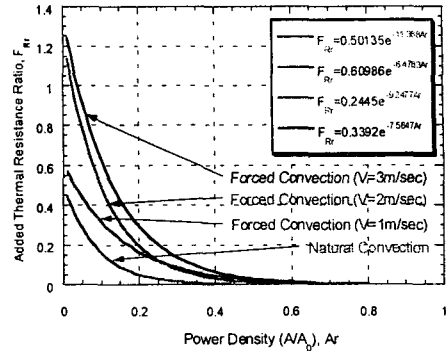


그림 4 발열밀도 및 대류조건에 따른 F_{Rr} 상관식
Fig. 4 Correlation of the F_{Rr} s under Various Heat Source Densities and Convection Conditions

이때, 국소 위치에서의 총 열저항값 R_{total} 은 다음 식으로 표현된다.

$$R_{total} = R_0 + C_f \cdot R_c \quad (3)$$

여기서, C_f 는 Correction Factor이며, R_c 는 식(2)와 Fig. 4로부터 구한다. 그림 5는 발열소자 위치에 따라, 히트싱크 중앙으로부터 Fin 길이 및 코너 방향에 걸쳐 C_f 값의 분포를 나타낸 것이다.

임의의 히트싱크에 대하여 발열소자 위치에 따라 열전달 수치해석을 수행하였으며, 해석결과 발열소자가 중앙에 위치했을 때의 온도상승 값은 20°C이나 코너부분에서의 온도상승 값은 38°C로써 약 2배의 값을 가짐을 알 수 있었다.

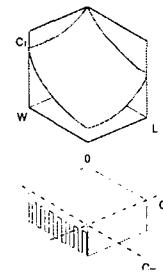


그림 5 발열위치에 따른 국소 상관인자
Fig. 5 Heat Sink Local Correction Factor Showing the Effect of Heat Source Location

그림 6은 범용 압출형 히트싱크에 대하여 발열밀도에 따른 Correction factor C_f 값의 평균값을 길이방향, 너비방향, 코너방향으로 정리한 것으로, 발열밀도가 높아짐에 따라 C_f 값이 상승됨을 알 수 있다. 예를 들어 발열소자의 면적이 히트싱크 Base면의 10%인 발열밀도를 갖는 경우, 방향에 따라 1.6, 1.7, 2.5의 C_f 값을 이용하여 열저항값을 예측 할 수 있다.

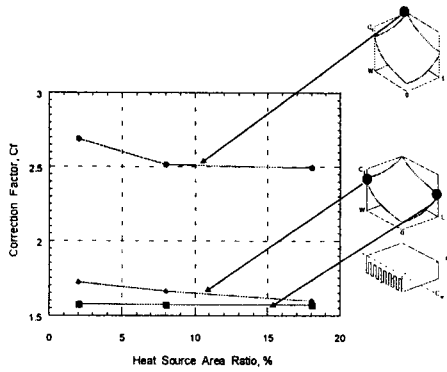


그림 6 발열위치에 따른 국소 상관인자 변화
Fig. 6 Heat Sink Local Correction Factor with Various Heat Source Location

수치해석의 결과를 검증하기 위하여, 임의의 모델에 대하여 열전달 특성실험을 실시하였으며, 수치해석을 통한 히트싱크의 방열특성을 정량적으로 분석하는 것에 대한 타당성을 확인하였다.

2.2 열피로

2.2.1 피로열저항

시스템의 운전 패턴에 따라 반복적인 열부하가 발생, 이에 따른 피로가 발생하며 전체적인 열저항의 증가로 시스템의 불안정을 초래한다. 그림 7은 피로발생후의 열저항 증가에 따른 Junction 온도 변화의 값을 나타낸 것이다.

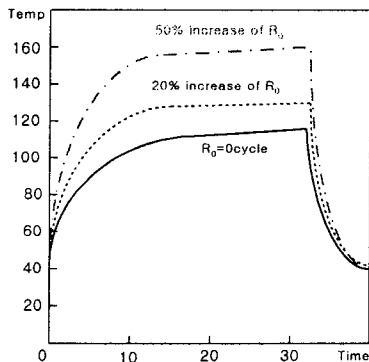


그림 7 열저항 증가에 따른 정선온도 변화
Fig. 7 Temperature excursion due to thermal resistance increase in the junction.

한편, 피로열저항을 고려한 N Cycle후의 전체 열저항값은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$R_{total} = R_0 + R_{fatigue1} + R_{fatigue2} \quad (4)$$

여기서, R_0 는 0cycle에서의 초기 열저항값이며, $R_{fatigue1}$ 은 N cycle후의 IGBT내부 Solder부의 피로에 의한 열저항 변화 값이며, $R_{fatigue2}$ 은 N cycle후

의 IGBT외부 Base와 Heat Sink 사이에서의 피로 열저항 변화 값이다.

그림 8은 IGBT소자 내부 및 외부에서 피로가 발생하는 부위이며, 내부는 Crack의 형태로 외부는 접촉열저항의 변화로 나타난다.

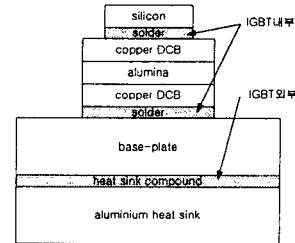


그림 8 IGBT소자 구성도

Fig. 8 Schematic diagram of a conventional IGBT module including heat sink.

2.2.2 Crack과 열저항변화

피로에 의한 IGBT소자 내부 Failure는 Silicon Die와 DCB(Direct Copper Bonded)사이의 Wire Bond의 단락, Base Plate와 Ceramic Substrate사이의 Crack에 의하여 발생한다. 그러나 최근의 제작사의 Bond Tool의 설계개선으로 인하여 Wire Bond 부의 Failure는 많이 개선되어 신뢰성 향상률도모하고 있다.

현재, Solder Joint부의 Crack에 의한 내부 Failure가 지배적이며, Crack길이에 따른 열저항 변화를 예측하기 위하여 다음과 같이 수치해석을 수행하였다. 그림 9는 수치해석을 위한 기하학적 모델링이며, 그림 10은 해석결과 이다.

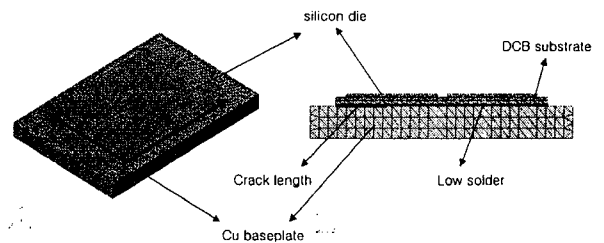
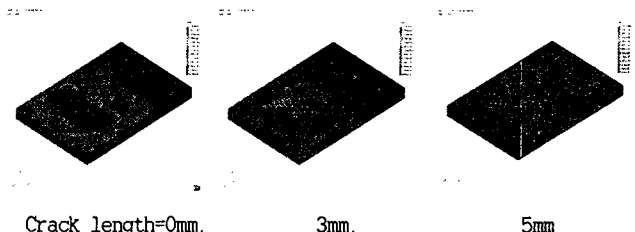


그림 9 수치해석을 위한 IGBT소자 모델링
Fig. 9 Geometry modeling of IGBT module for numerical analysis



Crack length=0mm, 3mm, 5mm

그림 10 Crack길이에 따른 IGBT소자 온도 분포

Fig. 10 Temperature contour with various crack length.

해석결과로부터 Crack부에서 열의 응력 집중이 나타나며, Crack길이에 따라 그 정도가 심화됨을 알 수 있다. 그림 11은 Chip의 발열량에 따른 Crack길이와 열저항변화율의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 Crack길이가 4mm일대 열저항의 변화가 급격하게 증가하며, 이러한 현상은 Chip의 발열량 증가에 따라서도 유사하게 나타남을 알 수 있었다. 보통 IGBT의 방열설계시 Junction온도를 100°C~110°C 기준으로 설계하며, 소자 Failure의 기준을 125°C로 본다면 열저항 증가율이 기준대비 약 1.1이 되는 시점의 Cycle수가 소자의 수명이 됨을 예측할 수 있다.

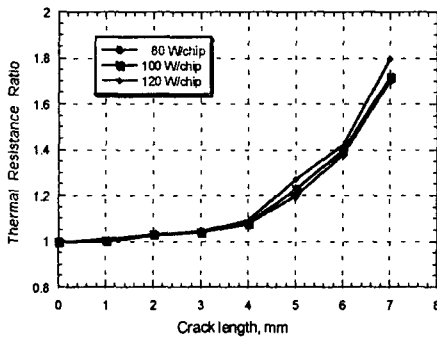


그림 11 Crack길이에 따른 정선부 열저항 변화
Fig. 11 Predicted thermal resistance of junction with various crack length.

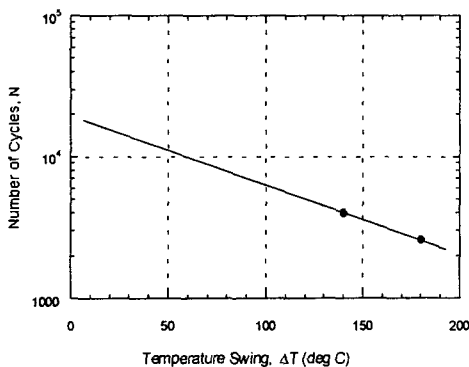


그림 12 작동 온도폭과 Failure 사이클수와의 관계
Fig. 12 Trend of failure cycles on temperature swing(ΔT)

한편, J.M. Thebaud 등^[2]에 의하여 Thermal Shock 테스트를 이용한 수명예측 실험의 일부가 진행되었으며, 실험된 DATA를 본 연구와 관련하여 정리한 것이 그림 12이다. 그림에서 표시된 직선은 전체 열저항이 10% 상승된 시점(Fatigue에 의한 Crack길이가 4mm지점)이며, 이때의 Failure Cycle수를 예측할 수 있다.

3. 결 론

IGBT소자를 이용하는 전력변환기기의 신뢰성을 위해서는 소자의 열적 안정성 검토를 고려한 방열설계가 필요하며, 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

먼저 발열소자의 발열밀도 변화에 따른 열저항 변화분석을 위하여 전산수치해석을 수행하였으며, 이를 이용하여 자연대류 및 강제대류 냉각 조건 ($V=1m/sec, 2m/sec, 3m/sec$)에서의 설계 상관식을 도출하였다. 또한 소자의 위치가 히트싱크의 너비방향, 길이방향, 코너방향으로 위치할 때의 열저항 증가율을 도출하였다.

반복 열부하에 의하여 IGBT소자의 내부 및 외부에 열적피로가 발생한다. 내부에서는 Base Plate와 Ceramic Substrate사이에 Crack이 발생하며, Crack길이가 4mm일 때 소자의 Failure시점이 되고, 이때 열부하 온도폭과 사이클수와의 상관관계 그래프로부터 소자의 수명을 예측할 수 있다.

한편, 소자 외부인 Base Plate와 Heat Sink Base 사이의 열적피로에 의한 피로열저항 변화도 중요하며, 현재 당사에서 실험이 진행중이다.

따라서, 본 연구에서 IGBT소자의 발열밀도, 위치 및 내/외부의 피로열저항을 고려한 방열설계법을 제시함으로써, 수명예측을 고려한 방열설계가 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] J.Y. Lee, "Thermal Analysis for Commercial Heat Sinks", Report of the HHI, 2002, February.
- [2] J.M. Thebaud, E. Woirgard, C. Zardini, K.H. Sommer, "Thermal Fatigue Resistance Evaluation of Solder Joints in IGBT Power Modules for Traction Applications," Power Electronics Specialists Conference, 2000. PESC 00. 2000 IEEE 31st Annual, Vol. 3, pp. 1285-1290, 2000.