

**유한 요소 도구를 이용한 NPT IGBT의 열 특성 해석**

류세환, 이명수, 원창섭, 안형근, 한득영

**Analysis of Thermal Characteristics of NPT IGBT by using Finite element method**

Sehwan Ryu\*, Myungsoo Lee\*\*, Changsub Won\*, Deukyoung Han\* and Hyungkeun Ahn\*

\*건국대학교 전기공학과, \*\*기술표준원

**Abstract** - As the power density and switching frequency increase, thermal analysis of power electronics system becomes imperative. The analysis provides valuable information on the semiconductor rating, long-term reliability. In this paper, thermal distribution of the Non Punchthrough(NPT) Insulated Gate Bipolar Transistor has been studied. For analysis of thermal distribution, we obtained results by using finite element simulator, Ansys and thermal distributions from experiments.

**1. 서 론**

최근 전력 변화 시스템에서 사용 전력이 증가하고 스위칭 주파수가 높아짐에 따라 시스템에서 발생하는 열에 대한 분석이 필수 불가결한 요소가 되어가고 있다. 열 적 분석을 통한 결과들은 반도체 등급과 오랜 기간의 신뢰도 및 효과적인 히트싱크 제작에 여러 유용한 정보를 제공하고 있으며, 반도체 소자의 열 적 모델은 실제 소자의 작동상태 하에서 동작 접합 온도를 예측하기 위해 사용되고 있다[1][2]. 본 연구에서는 반도체 전력용 제어소자로서 널리 쓰이고 있는 IGBT 모듈의 열 적 분포를 유한요소 방법을 적용한 시뮬레이터, Ansys를 이용해서 제시하였다.

유한 요소법(FEM : finite element method)이나 유한 차분법(FDM : finite difference method)은 질량보존, 운동량, 에너지에 관한 방정식을 푸는데 사용된다. FEM은 Shammaas 등이 IGBT 모듈에서 열 적 열화효과를 모델링 하는 데 사용되었다. FDM은 Hefner에 의해 열전도 방정식을 이산화 하는데 사용되었으며, 다이내믹한 열전자적 IGBT 모듈을 유도하였다[3]. Hefner는 열적인 비선형성을 포함한 IGBT 모듈에 대한 열적 RC 회로망을 세우는데 유한차분법을 사용하였고, Tzer[4] 등은 유한요소법을 통한 병렬 접근을 사용하였다. Ammos[5] 등은 간단한 회로에 대한 IGBT 모듈을 대한 열 적 모델을 세우는데 유한요소법을 사용하였다.

본 논문에서 IGBT 모듈의 열적 분포 특성을 해석하기 위해 반도체 칩 부분은 실리콘으로 고정시키고, 절연층 물질과 히트싱크 물질을 다르게 하여 동일한 조건 하에서 각각 3D로 형태로 열적 분포를 제시하였고, 이러한 열적 분포를 얻기 위해 유한요소 해석 도구인 3-D 시뮬레이터 Ansys를 이용하였다. 또한 실제 열적 특성을 보여 주기 위해 열화상 적외선 촬영기를 이용해서 스위칭 시 소자에서 발생하는 열 분포를 촬영하였다.

**2. IGBT의 열적 모델링**

**2.1 IGBT 모듈의 열적 해석**

전력 변환 시스템의 FWD(free wheeling diode)와 IGBT의 접합 온도는 시스템의 열 적 분석 모델을 이용한 수치 해석적인 방법을 통해 얻을 수 있다.

스위칭 시 발생하는 열 손실 전력은 IGBT와 FWD의 열 적 모델의 세우는 데 전류 원으로 이용할 수 있고, 실험적으로 얻을 수 있는 열 적 모델의 파라미터들을 사용하게 되면 IGBT모듈의 열 적 동작을 설명하는 데 열 적 RC 회로망 모델을 적용할 수 있다.

열이 한 물질로부터 다른 물질로 이동하는 것에는 전도, 대류, 복사, 이러한 3가지 중 하나를 통해 전달된다. 전도는 두 물질이 물리적으로 접촉해있을 때 발생하며 대류는 물질이 기체나 유체에 둘러싸여있을 때 발생하고 방사는 열이 표면에서 방사하는 적외선에 의해 열을 잃는 것을 의미한다. 실제적인 적용에서는, IGBT 모듈은 heat sink나 자연적인 공기순화 또 강제적인 공기 순환에 의해 열을 식힌다. IGBT 모듈 안의 물질들의 다른 층 사이에는 전도열은 대류의 공기와 공기로 바로 빠지는 복사에 의해 바로 얻을 수 있다. 분석적인 방법을 이용한 열 적 분석은 반도체 장치의 동작온도를 예측하기 위해서 사용되고 있다. 이 방법들은 우리에게 중요한 파라미터들의 사용에 의한 보다 나은 물리적 통찰을 가져다 준다. 경계나 초기상태의 다양한 가설들은 열전도 방정식을 풀기 위하여 만들어졌다.

반도체 칩은 균일한 초기 온도를 가진 반 무한한 고체이고, 맨 위 표면에서의 열의 흐름을 시간의 함수라 가정을 하면 문제를 해결할

수 있고, 실리콘의 두께가 무한하고 열원은 표면에서의 무한히 얇은 층이라 할 때 앞에서의 가정들은 제거함으로써 구할 수 있다.

**2.2 열적 RC 회로망**

전자요소에 관해 열 전달 과정에서 열전도가 중요한 원인이 되고, 대류나 복사는 무시된다. 동질 등방성 매질에서는 전도가 아래와 같이 묘사된다.

$$\nabla \cdot (k(\nabla T)) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

(k=열전도성, ρ=밀도, c=비열, T=온도)

수직의 파워 소자인 IGBT에서 두께(L)는 다른 크기보다 작고, 실리콘 칩에서의 전도도와 같은 열 특성은 온도에 대해 독립적으로 간주된다. 위 두개의 가정은 식(1)은 아래와 같이 간략화 된다.

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

(x=열 전달 과정의 축 방향)

장치의 열 적 부분의 RC 회로망은 식(2)과 전송라인 미분방정식 사이의 유사성에 근간을 둔다.

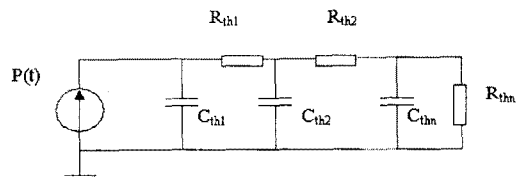
$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = CR \frac{\partial V}{\partial t} \quad (3)$$

전송라인은 RC 병렬 회로망에 의해 설명되기 때문에 장치의 열 적 부분은 병렬 회로망에 의해 묘사된다. 식(2)과 식(3)에 근거를 두어 열과 전기적 변수는 표1에서 보여주고 있다.

**<표 1> 열적-전기적 변수의 유사한 특성**

	열량	전기량
관통변수	Heat transfer rate, q, watts	Current, i, amp
교차변수	Temperature, T, K or C, degC/watt	Voltage, v, amps
손실요소	Thermal resistance, R <sub>th</sub> , degC/watt	Elect. Resistance, R, ohms
저장요소	Thermal capacitance, C <sub>th</sub> , joules/degC	Elect. Capacitance, C, farads

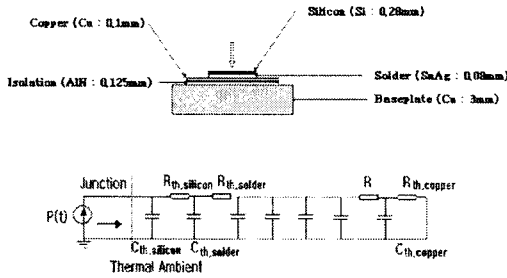
IGBT와 같은 파워 트랜지스터에서는 실리콘 칩부터 히트싱크까지의 열전도선로(path)로 묘사된 그림 1와 같은 전송선로 등가회로를 이용한다. IGBT나 diode에서 소모되는 전력은 열 적 회로에서 자극 전류 원처럼 동작한다.



**<그림 1> 열 특성 전송라인 등가회로**

그림 1에서 보여지는 회로에서의 R과 C는 단위길이 당 열 적 저항과 열 적 커패시터이다.

열적 RC 회로망의 변수 값은 그림 2에서 보여주는 구조의 부분에 의해 발견된다. 각각의 구조는 IGBT 모듈에서 물질의 다른 층들과 상응한다. 다음의 방정식들은 각각의 층들의 열 적 저항과 커패시턴스 추정하는데 사용된다.

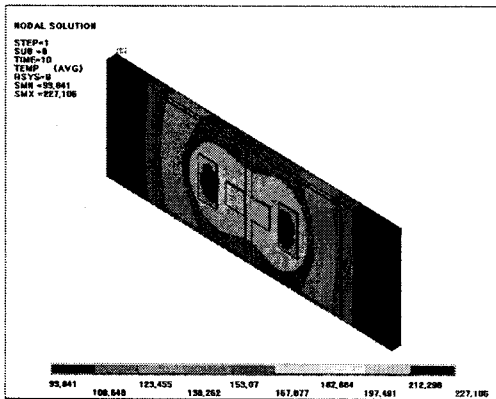


〈그림 2〉 IGBT의 물리적 구조를 기반으로 한 열적 RC 회로망

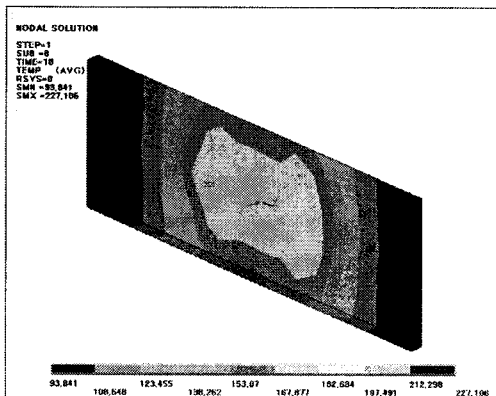
### 2.3 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 3과 4는 히트 싱크를 연결하지 않았을 때의 IGBT 모듈의 열 분포를 나타내고 있다. 그림 7은 모듈의 윗부분을 나타내고 있고, 반도체 칩 부분의 온도는 230℃까지 올라가는 것을 알 수 있고. 그림 8에서 나타나듯이 모듈의 바닥에서의 온도는 약 150℃로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 때 반도체 칩에 적용한 에너지 손실은 과도 특성 해석을 통해 얻어진 전압-전류 특성 곡선에 의해 얻었다.

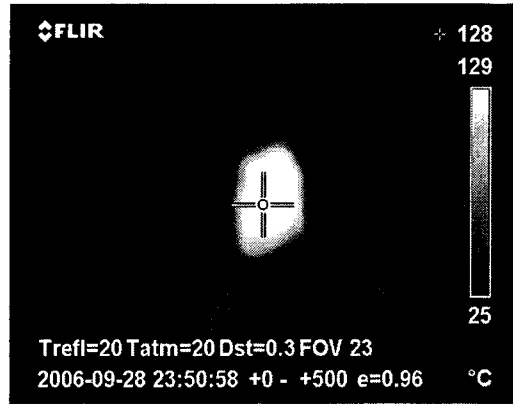
그림 5와 6은 실제 실험을 통해 IGBT에서 발생하는 열의 분포 사진을 촬영한 것이다. 히트 싱크를 사용하지 않았을 때의 IGBT에서 발생하는 열적 특성을 실험으로 보여주고자 하였다. IGBT 소자의 앞면에 나타나는 온도는 약 129℃가 나타났으며 뒷면에 히트싱크가 연결되어 있는 부분은 약 60℃ 정도이며, 없는 부분은 121℃ 정도로 나타났다.



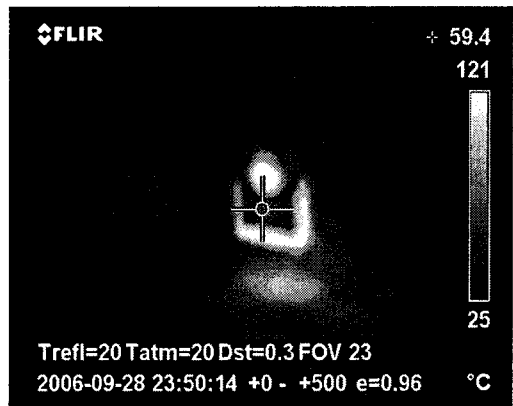
〈그림 3〉 Ansys를 이용한 IGBT 모듈 앞면의 열적 분포



〈그림 4〉 Ansys를 이용한 IGBT 모듈 뒷면의 열적 분포



〈그림 5〉 NPT IGBT의 앞면의 열 분포



〈그림 6〉 NPT IGBT의 뒷면의 열 분포

### 3. 결 론

본 논문은 IGBT의 열 특성을 유한요소도구인 Ansys를 이용해서 IGBT 모듈에서 발생하는 열 분포 해석과 실제 실험을 통해 과도 상태 시 NPT IGBT에서 발생하는 열 분포 특성을 열화상 적외선 촬영기를 이용해서 나타내었다. 향후 실험 결과를 토대로 정확한 모델링을 구현한다면 이러한 열 분포 해석을 통해 물성적 기반으로 제시되는 과도 특성 모델링의 결과를 검증할 수 있으며 나아가 소자의 열적 문제로 발생하는 여러 가지 문제를 해결할 수 있는 방안을 제시하는데 초석이 되리라 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] B. Jayant Baliga, "Trends in power semiconductor devices", I EEE trans. on Electron Devices, vol. 43, pp. 1717-1731, Oct. 1996.
- [2] Kuang Shen, Stephen J. Finney, and Barry W, Williams, "The rmal stability of IGBT High- frequency operation", IEEE Tran s. on Industrial Electronics, vol. 47, pp. 9-16, Feb. 2000.
- [3] Allen R, Hefner and David L. Blackburn, "Thermal Componen t models for electrothermal network simulation", IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, vol. 17, Sep. 1994.
- [4] Jia Tzer and loc Vu-Quoc, "A rational formulation of thermal circuit models for electrothermal simulation-Part I: Finite element method", IEEE Trans. on Circuit and Systems I : Fundamental and Applications, vol. 43, pp. 721-732, Sep. 1996.
- [5] Anis Ammous, Sami Ghedira, Bruno Allard, Herve Morel, and Denise Renault, "Choosing a thermal model for electrothermal simulation of power semiconductor devices", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 14, pp. 300-307, Mar. 1999.
- [6] Ansys 열전달 해석, (주)대성에스앤이, 2002.