

전력전자 System의 Cooling 시스템 (1)

김찬기, 양병모, 정길조, 이형한
전력연구원

Cooling System of Power Electronics System (1)

Chan-Ki Kim, Byung-Mo Yang, *Gil-Jo Jung, Hyoung-Han Lee
KEPRI

NOMENCLATURE

- Q : 열 전달량,
- T_A : 대기 온도,
- T_J : 접합온도,
- A_{JC} : 접합점에서 케이스까지의 접촉면적,
- A_{CS} : 케이스에서 방열판까지의 접촉면적,
- A_{SA} : 방열판에서 대기사이의 접촉면적,
- L_1 : 접합점에서 케이스까지의 두께,
- L_2 : 케이스에서 방열판까지의 두께,
- h_c : 대류 열 전달 계수,
- k_1 : 접합점에서 케이스까지의 열전도계수,
- k_2 : 케이스에서 방열판까지의 열전도계수.

1. 서론

전력용 반도체를 신뢰성 있는 동작 범위 내에서 동작 시키려면 전력용 반도체의 표면 온도가 높아져 열 폭주 (Thermal Runaway)가 일어나지 않도록 제작사에서 제시하는 온도 범위에서 상시 작동할 수 있는 열 전달 장치를 가지도록 설계되어야 한다. 전력용 반도체에 많은 열이 발생하면 전력용 반도체의 열 저항이 증가하여 소자의 기능이 저하되며 심하면 터져 버리는 경향이 있다. 일반적으로 전력용 반도체가 견딜 수 있는 임계 접합 온도(Critical Junction Temperature)는 $120^{\circ}\text{C} - 150^{\circ}\text{C}$ 정도이나 운전은 90°C 에서 안정한 동작을 하는 것으로 알려져 있다. 전력용 반도체의 방열 방법으로는 자연 공냉식(Natural Air Cooling System)과 강제 공냉식(Air-Forced Cooling System) 그리고 수냉식 방법(Liquid Cooling System)이 있다. 그림 1은 방열량과 주위의 온도사이의 열 저항 모델을 나타내고 있는 것으로

써 I 부분은 접합 점과 반도체 소자 Case사이의 열 저항을 나타내고 있는 것이며 II는 반도체 소자 Case와 방열판 사이의 열 저항 모델을 나타내고 있으며, III는 방열판과 주위 온도사이의 열 저항 모델을 나타내고 있다. 그리고 IV는 Case와 주위 온도사이의 열 저항 모델을 나타내고 있다. 여기서 IV부분은 실제적으로 무시할 만큼 작기 때문에 보통 무시하는 경향이 있다.

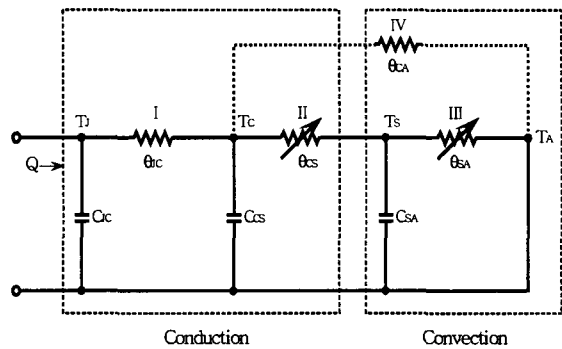


그림 1 방열판을 가진 사이리스터의 열저항 모델
Fig. 1 Thermal Equivalent Circuit with Heatsink.

또한 C_{JC} 는 접합 점과 Case사이의 열 콘덴서 모델을 나타내고 있으며 C_{CS} 는 Case와 방열판 사이의 열 콘덴서 모델을 나타내고 있으며 C_{SA} 는 방열판과 주위의 온도사이의 열 콘덴서 모델을 나타내고 있다. 이러한 콘덴서 모델은 실제 방열판을 설계하려는 경우에는 별로 필요하지 않는 면이 있으나 방열판의 방열효과를 테스트하려는 경우에 얼마만큼의 시간동안 열 부하 실험을 해야 할지를 결정해주는 계수가 된다. 또한 저항 II는 방열판과 반도체 소자를 압축해주는 압축강도와 반도체소자와 방열판사이에 넣어주는 접착제 도는 갭저항(Gap-Resistance)에 의해 변화되어 질 수 있기 때문에 가변저항으로 표현해 주었다. 그리고 III는 방열판과 주위의 공

기 온도에 관한 열 저항 모델을 나타내주는 것으로 풍속이나 공기의 형태 그리고 방열판의 형태 등에 따라 방열 효과가 결정되어 질 수 있기 때문에 가변저항으로 표현하였다.

그림 1에서 저항 I와 저항 II에 작용하는 열전달 성분은 전도에 의한 열 전달이 주류를 이루며 III은 대류에 의한 열 전달이 주류를 이룬다. 전력 변환장치에서 저항 I과 저항 II는 거의 정해져 있으며 III은 자연 냉각식일 경우에는 방열판의 크기에 대한 함수이고 강제 공냉식의 경우에는 대류 즉 풍속에 대한 함수로 표현된다.

그림 1은 방열판에 부착된 사이리스터의 열 등가회로를 나타낸 것으로 사이리스터 접합 점에서 열 전달량 Q와 접합온도 T_J는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$T_J - T_A = Q(\theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA}) \quad (1)$$

$$\theta_{JC} = \frac{L_1}{k_1 A_{JC} \eta_1} \quad (2)$$

$$\theta_{CS} = \frac{L_2}{k_2 A_{CS} \eta_2} \quad (3)$$

$$\theta_{SA} = \frac{1}{h_c A_{SA} \eta_3} \quad (4)$$

식 (1) ~ (4)에서, η_1, η_2, η_3 는 $\theta_{JC}, \theta_{CS}, \theta_{SA}$ 의 효율이다. 식 (1)로부터, T_J를 떨어뜨리기 위해서는, 가변저항으로 표현된 열 저항 θ_{SA} 를 감소시켜 대기 열량 Q를 빠르게 전달할 필요가 있다. 이것은 냉각시스템의 효율은 사이리스터의 열전달 능력에 달려있다는 것을 의미한다. 만약 θ_{CS} 와 θ_{SA} 가 영(零)이라고 가정하면, 케이스 온도 T_C는 대기 온도 T_A와 같아진다. 따라서, 방열판의 크기를 무한대로 만들면, 반도체소자의 접합 점의 온도는 대기 온도와 같아지고, 열에 의한 반도체소자의 소손은 없다는 것을 의미한다. 열 저항 θ_{CS} 는 접촉저항으로 으로 구성된 표면저항과 간극(갭) 저항의 complex 합이다. 이러한 저항은 두 물체사이의 접촉면이 불균일한 표면이 서로 맞대어 있기 때문에 발생한다. 또한, 저항 θ_{CS} 는 케이스와 방열판사이의 놓여진 절연물의 전체 저항을 포함할 것이다. 높은 접촉저항은 열 저항의 증가를 가져오기 때문에 열전달이 어려워지고 낮은 접촉저항은 실리콘 웨이퍼의 기계적인 스트레스와 열 팽창력이 다르기 때문에 발생하는 기계적인 파손의 우려가 존재하기 때문에 반도체 소자를 밴딩하는 경우에는 주의를 요한다. 그림 1에서 공 냉식 방열판의 성능을 결정하는 요소는 다음과 같다.

1. 냉각 공기에 노출된 표면적
2. 방열판의 설계, 즉, 사이리스터에서 방열하는 표면적

지의 열전달의 효율

3. 방열판 재질
4. 사이리스터 표면과 접촉하는 방열판의 면적
5. 방열판에서의 사이리스터의 위치
6. 주위 대기의 온도
7. 핀 표면에 걸치는 공기 흐름의 양
8. 공기 흐름의 형태(평이한 흐름 혹은 와류)

2. 방열판의 실제적 설계

A. 대전력 컨버터에서 방열판의 설계

대용량 컨버터는 대기 온도가 25°C인 경우를 가정하고 열악한 상태에서는 50°C에서 동작된다는 가정 하에서 설계된다. 그리고 사이리스터 접합 점의 최대 온도는 사이리스터가 피크 전압이나 전류에 의해 발생하는 순시적인 열에 의해서 손상될 수 있기 때문에 대체적으로 온도 90°C보다 낮은 70°C로 제한되도록 한다. 그림 2는 본 논문에서 다루려는 대용량 사이리스터 컨버터회로를 보여주고 있다.

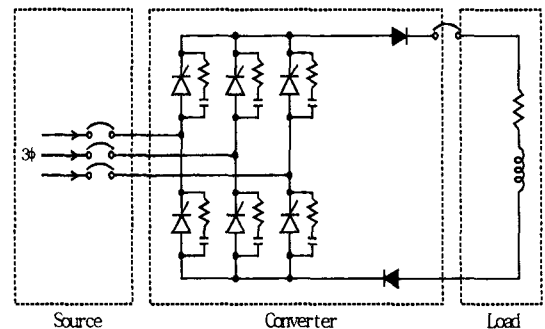


그림 2 대용량 컨버터

Fig. 2 High Power Converter

B. Noise and Vibration Reduction Method

강제 공냉 방식은 팬에 의하여 잡음과 진동이 발생할 수 있다. 큰 잡음은 제조품의 상업적 가치를 감소하고, 임계 진동은 직접적으로 사이리스터 파괴를 야기한다. 그러므로 팬에 기인한 잡음과 진동은 강제 공냉 방식을 설계하는 경우에서 고려되어야 한다.

첫째로 방열판의 잡음은 air-borne noise, structure-borne noise와 pipe resonance noise로 구성되어 있다. air-borne noise는 팬 자체의 잡음이고, structure-borne noise는 팬 진동에 의하여 발생하는 방열판 잡음이고, pipe resonance noise는 팬 잡음이 방열판의 air duct에 의하여 증폭되어진 잡음이다. 그림 3은 방열판 구조에 의한 방열판 잡음의 원리를 나타낸다.

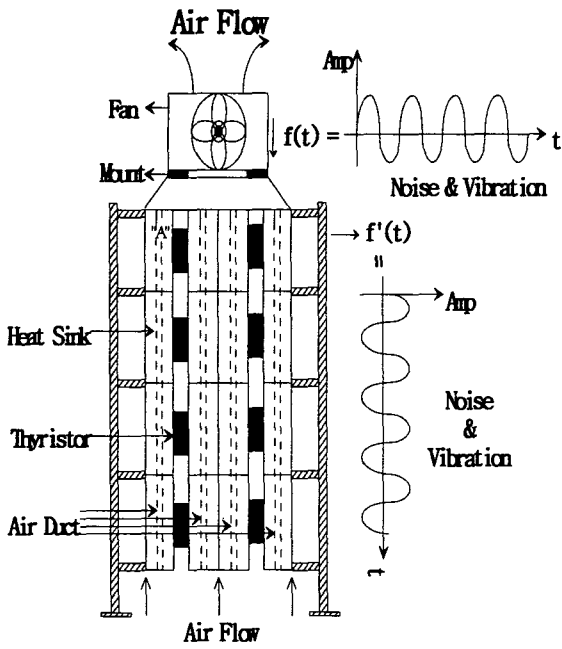


Fig. 3. Heat sink construction

Air-borne noise

air-borne noise의 잡음 주파수는 다음과 같다.

$$f_b = \frac{Bkade\ Num. \cdot Blade\ RPM}{60Hz} \quad (5)$$

Pipe resonance

식 (6)는 pipe resonance frequency를 나타낸다.

$$f_p = \frac{C}{2 \cdot l} \quad (6)$$

여기서 C는 343m/sec이고 l는 파이프의 길이이다.

Structure-bone noise

팬과 방열판 사이의 스프링 상수와 댐핑 상수인 질량은 structure-borne noise를 결정한다. 그러므로 만약 스프링 상수가 변하면, 잡음은 감소될 수 있다. 방열판의 Natural Frequency는 다음과 같다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (7)$$

여기서 k는 스프링 상수, M은 전체 팬 질량

식 (8)은 스프링 상수의 설계기법을 나타내고, 전달률 (T_r)의 식은 다음과 같다.

$$T_r = \frac{\sqrt{1 + [2 \cdot \zeta \cdot (\frac{\omega}{\omega_n})]^2}}{\sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_n})]^2 + [2 \cdot \zeta \cdot (\frac{\omega}{\omega_n})]^2}} \quad (8)$$

여기서, $\zeta = \frac{C_e}{2 \cdot \sqrt{k \cdot m}}$, $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$

ω = Forced Excitation Frequency

3. SIMULATION FOR HEATSINK DESIGN

그림 4에서 그림 7은 Heat transfer code인 FLUENT를 이용하여 방열판의 열분배의 결과를 나타낸다. 그림 5는 주변 온도가 25[°C]에서 2개의 팬을 갖는 방열판의 분석적인 결과를 나타낸다. 그림 7은 팬 1이 중지한 경우에서의 시뮬레이션이고 그림 8은 팬이 없는 경우이다. 마지막으로 그림 9는 팬이 없고 주변 온도가 50[°C]인 경우의 결과이다.

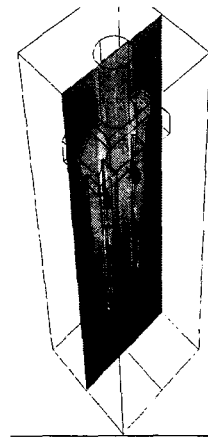


Fig. 4. Temperature distribution of heatsink (environment temperature : 25°C, with 2 fans)

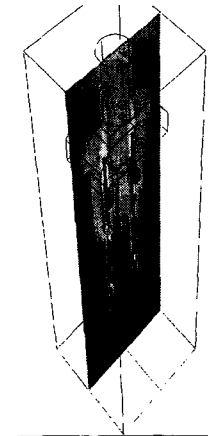


Fig. 5. Temperature distribution of heatsink (environment temperature : 25°C, with 1 fan)



Fig. 6. Temperature distribution of heatsink
(environment temperature : 25°C, without fan)

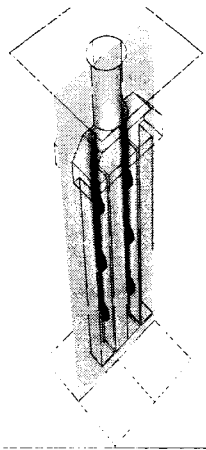
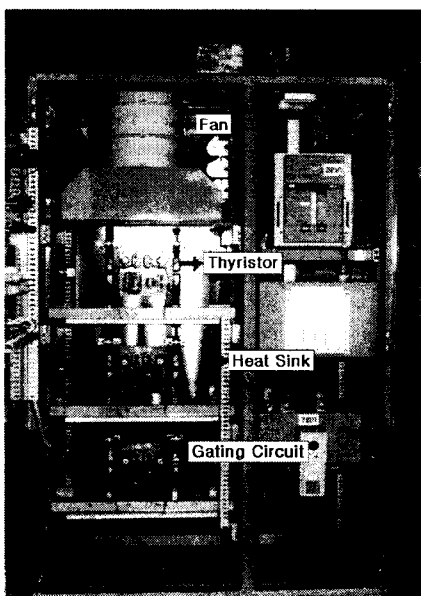


Fig. 7. Temperature distribution of heatsink.
(environment temperature : 50°C, without fan)



a) Front of the converter

Fig. 8. Implemented heatsink of high power converter

4. 결 론

효율적인 방열시스템을 개발하였다. 전형적인 방열판에서 팬의 잡음과 진동을 제거하고, 접합저항과 갭 저항을 포함한 효율적인 방열판 시스템으로 대체하였다. 또한, 본 논문에서 제안된 방식은 IGBT나 GTO 컨버터에 적용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] D. Finney, "The Power Thyristor and its Applications", McGraw-Hill, 1980.
- [2] A. F. Mills, "Heat Transfer", Richard D. IRWIN, INC., 1992.
- [3] M. Necati ozisik, "Heat Transfer - a Basic Approach", McGraw-Hill, 1981.