

전력전자 시스템의 방열판 설계

김찬기*, 곽주식*, 우정욱*, 정길조*
전력연구원

Heatsink Design of Power Electronics System

C.K.Kim, J.S.Kwak, J.W.Woo, G.J.Jeong
KEPRI

Abstract

본 논문은 전력전자 시스템의 방열판 시스템에 대한 이론과 실제 시스템을 고찰하고 있다. 본 논문에는 공냉식과 수냉식 방열 시스템에 관한 내용이 있다.

1. 방열판 설계의 이론 및 검토

1.1. 열저항 모델링

전력용 반도체에 많은 열이 발생하면 전력용 반도체의 열저항이 증가하여 소자의 기능이 저하되며 심하면 터져버리는 경향이 있다. 일반적으로 전력용 반도체가 견딜 수 있는 임계 접합 온도는 $120^{\circ}\text{C} - 150^{\circ}\text{C}$ 정도이나 운전은 90°C 에서 안정한 동작을 하는 것으로 알려져 있다. 전력용 반도체의 방열방법으로는 자연 공냉식과 강제 공냉식 그리고 수냉식 방법이 있다. 이러한 냉각 방식중에서 공기를 이용한 냉각방식은 구조가 간단하고 보수 유지가 간단하기 때문에 산업현장에서 많이 이용됨에도 불구하고 시스템이 대용량화 하는 경우에는 방열판의 크기가 커지며 방열판의 방열능력은 어느 정도 크기에서는 포화되기 때문에 수냉식으로 냉각장치를 설계하고 있다. 그림 1은 전력 변환기의 열저항 모델을 나타내고 있는 것으로 발열량과 주위의 온도사이의 열저항 모델을 나타내고 있는 것으로써 I 부분은 접합점과 반도체 소자 케이스사이의 열저항을 나타내고 있는 것이며 II는 케이스와 방열판 사이의 열저항 모델을 나타내고 있으며 III는 방열판과 주위 온도사이의 열저항 모델을 나타내고 있다. 그리고 IV는 케이스와 주위온도사이의 열저항 모델을 나타내고 있다. 여기서 IV부분은 실제적으로 무시할 만큼 작기 때문에 보통 무시하는 경향이 있다. 또한 C_{jc} 는 접합점과 케이스사이의 열 콘텐서 모델을 나타내고 있으며 C_{cs} 는 케이스와 방열판 사이의 열 콘텐서 모델을 나타내고 있으며 C_{sa} 는 방열판과 주위의 온도사이의 열 콘텐서 모델을 나타

내고 있다. 이러한 콘텐서 모델은 실제 방열판을 설계하려는 경우에는 별로 필요하지 않는 면이 있으나 방열판의 방열 효과를 테스트하려는 경우에 얼마만큼의 시간 동안 열 부하 실험을 해야 할지를 결정해 주는 중요한 계수가 된다. 또한 저항 II는 방열판과 반도체 소자를 압축해 주는 압축 강도와 반도체 소자와 방열판 사이에 넣어 주는 접착제 또는 겹저항에 의해 변화되어 질 수 있기 때문에 가변저항으로 표현해 주었다.

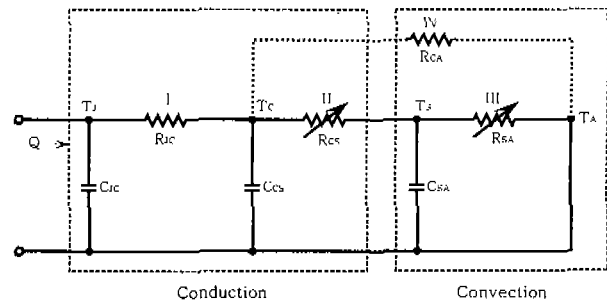


그림 1. 전력용 반도체 소자의 열 저항 모델링.

그리고 III는 방열판과 주위의 공기 온도에 관한 열저항 모델을 나타내 주는 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 열 전달 성분은 전도에 의한 열 전달이 주류를 이루며 저항 III은 대류에 의한 열 전달이 주류를 이룬다. 전력 변환 장치에서 저항 I과 저항 II는 거의 정해져 있으며 저항 III은 자연 냉각 시스템일 경우에는 방열판의 크기 에 대한 함수이고 강제 공냉 시스템일 경우에는 대류 즉 풍속에 대한 함수로 표현된다.

1.2. 방열판 설계의 수학적 배경

그림 1에서 반도체 소자의 접합 온도(T_j)와 대기 온도(T_a) 그리고 열전달량(Q)과 열 저항에 관한 수

식은 다음과 같다.

$$T_J = Q(R_{JC} + R_{CS} + R_{SA}) + T_a \quad (1)$$

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

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

$$R_{SA} = \frac{1}{k_3 A_{SA}} \quad (4)$$

A_{JC} 는 접합 점에서 케이스까지의 접촉 면적, A_{CS} 는 케이스에서 방열판까지의 접촉 면적 그리고 A_{SA} 는 방열판에서 대기 사이의 접촉 면적을 표현하고 있다. L_1 은 접합 점에서부터 케이스까지의 두께, L_2 는 케이스에서부터 방열판까지의 두께를 표현하고 있다. 또한 k_3 는 방열판의 대류에 의한 방열계수를 표현하고 있으며, k_1 은 접합 점에서 케이스까지의 열전도 계수, k_2 는 케이스에서부터 방열판까지의 열전도 계수를 나타내고 있다. 그림 1에서 R_{CA} 는 전력용 반도체 소자의 케이스와 대기 사이 저항으로써 일반적으로 무시할 수 있는 값이다.

식 (1), (2), (3), (4)로 부터 열 전달에 영향을 미치는 요소를 고려해 보면 다음과 같다.

첫 번째, 방열판 재질에 따른 열 전달율과 방열판의 표면적과 방열판의 효율 그리고 방열판의 온도와 주위 온도와의 차이를 들 수 있다.

두 번째로 방열판의 열전달율에 대하여 알아보면, 방열판의 열 전달율을 결정하는 요인으로서는 방열판의 구조와 방열판 주위의 공기 형태를 들 수 있다. 열 전달율을 결정하는 방열판의 구조로는 다음과 같이 분류 할 수 있다.

- 몰드 구조
 - 평면 구조(Flat plat)
 - 원통 구조(Hollow cylinder)
 - 타원 구조(Hollow sphere)
- 핀 구조
 - 삼각핀 구조(Triangle fins)
 - 직각핀구조(Rectangular fins)
 - 타원핀 구조(Circumferential fins)
 - 스피스 구조(Spins)

세 번째 주위의 공기형태는 방열판에 흐르는 공기가 laminar 인지 turbulent flow인지에 따라 열전달율이 달라진다. 따라서 방열판의 핀에凹凸을 두어 공기의 흐름을 turbulence하게 만든다.

네 번째로 고려해야 하는 요소로는 방열판의 표면적을 들 수 있다. 식 (1)에서 보는 바와 같이 방열판의 면적이 넓다는 것은 열 전달량이 많다는 것을 의미하며 높은 온도의 상승 없이 일시적으로 열을 방열판에 저장할 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 무한정 크게 방열판을 설계하는 것은 공간 문제와 기구 배치 문제에 있어서 문제를 유발시키며 커다란 방열판의 가장자리는 재질에 따른 열 저항 때문에 충분한 열을 방열 할 수가 없다.

표 1 몰드구조에 따른 방열판의 열 전달 계수결정

Geometry	S
Flat plate Cross-sectional area A Thickness L	A/L
Hollow cylinder Radii r1 and r2 Length L	$\frac{2\pi L}{\ln(r_2/r_1)}$
Hollow sphere Radii r1 and r2	$\frac{4\pi r_1 r_2}{r_1 - r_2}$

다섯 번째로 고려해야 하는 사항은 방열판의 재질에 의한 방열판의 효율로써 방열판의 효율은 전기의 도전율과 같은 특성을 지니고 있기 때문에 은(Silver)-구리(Copper)-금(Gold)-알루미늄(Aluminum)-실리콘(Silicon)-니켈(Nickel)순서로 방열판의 효율이 결정되어진다. 산업 현장에서 방열판은 일반적으로 알루미늄 판을 사용하는데 구리는 알루미늄보다 열 전달율이 약 80%정도 더 우수함에도 불구하고 가격적인 문제와 제작 상의 문제 때문에 잘 사용하지 않는다.

여섯 번째로 고려되어야 하는 사항은 주위 온도와 방열판 사이의 온도 차이를 들 수 있다. 열역학에서 온도 차이 ΔT 는 전기회로에서 전위에 해당하는 요소로써 주위 온도가 낮으면 낮을수록 방열 효과는 높다는 것을 알 수 있다. 따라서 기후 조건에 따라 에어컨과 같은 냉방 시설이 추가되어야 할 지가 결정되어질 수 있다. 그러나 실제 방열 시스템을 설계하려 할 경우에 단순히 주위의 온도와 계산되어진 발열량만을 가지고 방열판을 설계하면 방열 시스템안에 대용량 전력 변환 시스템안에 존재하는 저항을 포함한 여러 발열 요소들의 의해 대용량 전력변환 시스템 내의 온도가 상승하기 때문에 이것에 대한 고려가 필요하다. 한편으로 스너버 저항과 같은 발열 요소의 정격을 여유 있게 해서 너무 과하게 발열이 되지 않게 한다.

이러한 사항 이외에 냉각 판을 설계하는데 있어서 고려되어야 하는 점은 다음과 같다.

1. 방열판에 위치하는 전력용 소자의 위치와 방열판의 상대적인 크기(지나치게 큰 방열판은 발열 소자에서 거리가 멀어질수록 방열판의 열 전달이 떨어진다.)
2. 방열판 주위에 접하는 공기의 양.
3. 방열판과 전력용 반도체 소자 사이의 압축 강도와 거칠기.

1.3. 싸이리스터의 선택

전력 변환기에 많이 사용되는 전력용 반도체 소자는 싸이리스터이다. 싸이리스터와 같은 반도체 소자는 전기 도체와는 다르게 열이나 썬지에 약하다. 따라서 자기의 정격 용량보다 2 ~ 3배정도 큰 소자를 선택하는 것이 일반적이다. 이러한 선택이 소용량에서는 자기 정격보다 큰 소자를 사용하는 것이 경제적으로 별이득이 없지만 대용량에서는 이야기가 달라진다. 예를 들어 STP 45N2800소자와 STP24L2800소자의 예를 들어보자

※STP 45N2800

- 전압내력 : 2800V
- 허용 전류 : 4500A
- 1000A기준으로 발생 손실 : 600W

※STP24L2800

- 전압 내력 : 2800V
- 허용 전류 : 2400A
- 1000A기준으로 발생 손실 : 1000W

위에서 보여주는 내용 중에서 1000A를 소모하는 시스템에서 위에서 보여 주는 2가지 종류의 싸이리스터를 놓고 시스템을 설계할 경우에는 STP 45N2800소자를 이용하면 방열판의 크기가 상당히 작아지고 방열판의 가격을 줄일 수 있다. 또한 싸이리스터가 스위칭할 경우에 생기는 썬지도 STP 45N2800소자의 경우가 훨씬 작기 때문에 소자에 가해지는 충격도 작다. 싸이리스터의 썬지를 줄이기 위해서 싸이리스터에 추가하는 것이 스너버 회로인데 썬지가 작으면 작을수록 스너버에서 발생하는 열량도 작아진다. 따라서 과거에는 대용량 전력용 반도체의 경우에는 보다 정교한 스너버 설계와 방열 성능이 우수한 방열 시스템을 필요로 하였으나 반도체 소자 개발 속도에 따라 이러한 점이 많이 해결되었다.

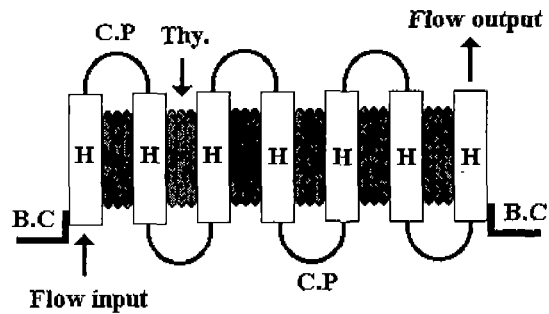
2. 수냉식 방열 시스템

2.1. 수냉식 방열판

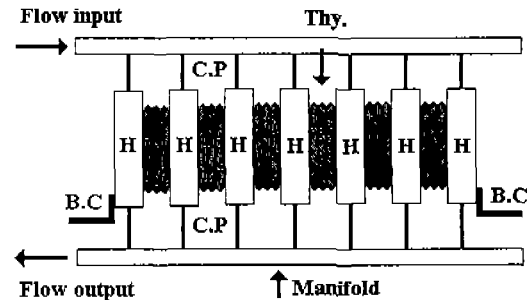
수냉식 방열 시스템은 공냉식보다 더 효율이 높으며 전력 변환 시스템을 작게 만들 수 있고 열 교환기

를 전력용 반도체 소자로부터 분리 또는 멀리 설치할 수 있는 장점도 있다. 그러나 냉각재에 의한 전기적인 부식이나 응고의 문제점 그리고 주변 설비가 복잡하다는 단점을 가지고 있다. 수냉식 방열 시스템의 설계는 일반적으로 다음과 같은 방법이 있다.

- 1) 파이프로 서로 연결된 수냉식 방열판에 전력용 소자를 부착하는 방식.
- 2) 수냉식 방열판에 여러개의 전력용 소자를 부착하는 방식.
- 3) 냉각재에 직접적으로 전력용 소자를 담가 버리는 방식.



a) 스택 구조형 냉각 회로의 파이프 연결-직렬



b) 스택 구조형 냉각 회로의 파이프 연결-병렬

그림 2. 스택 구조형 냉각 회로의 파이프 연결
(C.P : 연결 파이프, Thy. : 전력용 소자, B.C : 부스바 연결 부위, H : 방열판)

전력용 소자는 냉각의 최적화를 위하여 양면 냉각 소자를 쓰는 것이 유리하기 때문에 그림 2와 같은 개별적인 또는 스택으로 만들고 있다. 또한 그림 2는 방열판 사이에 연결된 파이프 형태에 따른 방열 시스템의 구조로서 그림 2 a)와 같은 직렬 방식이 있고 그림 2 b)와 같은 병렬 구조가 있다. 그림 2에서 직렬 방식은 냉각재의 온도가 방열판 사이를 지날 때마다 증가하기 때문에 최종단에 있는 방열판의 냉각 효율이 떨어진다는 단점을 가지고 있으나 냉각재에 불순물이 존재하여 냉각판 연결 파이프의 구멍을 막아 고장을 일으키는 경우에는 고장부위를 쉽게 찾을

수 있다는 장점이 있다. 반면에 그림 2의 b)의 경우는 방열판의 냉각은 균일하게 되는 장점을 가지고 있으나 냉각판 파이프가 막히면 막히는 부위를 찾기가 어렵다는 단점을 가지고 있다. 따라서 수백 개의 전력용 소자를 가지고 있는 대용량 시스템에서는 파이프의 굵기가 큰 부분은 병렬 구조로 만들고 전력용 소자에 분배되어 들어가는 부분에서는 직렬 구조로 병행하여 사용하는 것이 일반적이다.

2.2. 수냉식 방열 시스템의 주변 장치

대용량 수냉식 시스템은 그림 3에 보는 바와 같이 구성되어 있다. 각 구성에 대하여 알아보면 다음과 같다.

1) 익스펜션 탱크(Expansion Tank)

냉각재가 누수 되는 양만큼을 보충하며 냉각재 양을 측정한다.

2) 메인 펌프(Main Pump)

냉각재를 순환시키는 펌프로써 시스템의 안정성을 위해 이중화되는 것이 보통이다.

3) 열 교환기(Heat Exchanger)

파이프를 통하여 유입되는 냉각재를 냉각시키는 장치로써 기본 원리는 강제 공냉식 방열판과 동일하다.

4) 전력용 반도체 소자 냉각용 방열판

5) 탈이온화장치(Deionizer)

전력용 소자는 단방향성 전위를 가지고 있기 때문에 냉각재를 이온화시키고 이온화된 전해질은 냉각 파이프와 방열판을 부식시킬 위험이 있기 때문에 이온을 제거하려는 목적이 있다.

6) 메인 필터(Main Filter)

탈 이온화 장치와는 별도로 냉각재에 포함되어 있는 불순물을 제거해주는 역할을 한다.

2.3. 수냉식 방열 시스템의 제어

수냉식 방열 시스템은 강제 공냉식 방열 시스템과 달리 이슬점 제어(Dew Point Control)를 해야 한다.

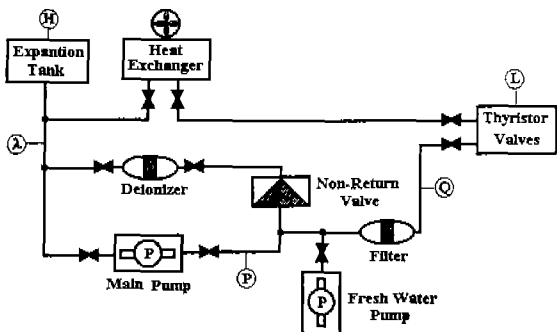


그림 3 단일 수냉식 방열 시스템의 구조도

강제 공냉식 시스템은 공기로 방열판을 냉각시키기

때문에 전력 변환 시스템에 이슬이 생길 위험이 없으나 수냉식 방열 시스템은 전력 변환 시스템의 자체 온도와 주위 공기 중의 습도에 의해서 전력 시스템에 이슬이 생겨 전력 변환 시스템의 절연 파괴를 가져올 수 있기 때문에 이슬점 온도를 계산하여 전력 변환 시스템에 절연이 파괴되는 것을 막아야 한다. 식 5는 이슬점 온도(T_d)를 구하는 식을 보여 주고 있다.

$$T_d = \frac{K}{(1/X - 1)}$$

$$X = \frac{\log(RH/100)}{17.27} + \frac{T_a}{T_a + K} \quad (5)$$

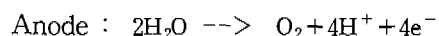
여기서, $K = 238.3$, RH 는 상대 습도, T_a 는 공기 온도를 말한다.

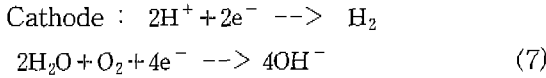
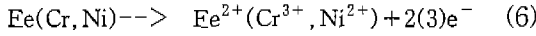
2.4. 냉각재의 비교

물은 유속이 빠르기 때문에 냉각 효과가 높다. 그러나 전해질에 의한 부식, 그리고 결빙의 문제가 있고 전해질은 대부분의 회로에서 전력용 소자가 다른 전위를 가지고 물을 통하여 전류의 흐름이 일어날 수 있기 때문에 발생되어 진다. 따라서 증류되고 탈 이온화된 물이 사용하여야 하고 수냉회로는 구리나 청동과 같은 금속으로 제작되어야 한다. 결빙의 위험은 글리코젤과 같은 성분을 물에 합성하여 냉각재로 이용하면 결빙점이 내려가기 때문에 많이 사용하는 방법이다. 반면에 기름은 물보다는 안전하지만 물보다 점성 계수(Viscous Factor)가 높기 때문에 냉각 효과가 떨어진다. 전해질에 의한 전류가 흐름이 발생하지 않고 결빙의 문제가 없다. 그러나 가연성이 있기 때문에 사용에 주의해야 하며 비가연성 기름은 높은 독성을 가진다. 대용량 수냉식 방열 시스템에서 순수한 물을 냉각재로 사용하는 경우보다 글리코젤과 같은 부동액을 순수한 물에 혼합하여 냉각재로 이용하면 순수한 물보다 냉각 점이 낮아지는 특성이 있다.

2.5. 수냉식 시스템에서 전해질의 영향

다른 부도체와 다르게 물은 전해질에 의한 도체이다. 이것은 물에 전기가 흐를 때 화학적인 반응이 생긴다는 사실을 의미하며 수냉식 시스템에서는 이러한 전기 화학적인 문제를 고려해야 한다. 물에서 전기의 흐름에 도움을 주는 전하는 H^+ 이온과 OH^- 이온이다. 또한 물에 다른 물질이 녹아 있으면 물은 용매로 작용한다. 그림 2에서 본 바와 같이 스택 구조형으로 수냉식 방열 시스템을 만들 경우 사이리스터 양쪽 냉각 파이프에는 누설 전류가 금속 커플링을 통하여 흐른다. 이러한 전류는 금속 표면에 화학적인 부식을 가져온다, 이러한 작용은 애노드쪽 과 캐소드쪽에 식 6과 식 7과 같은 화학 반응식이 성립한다.





따라서 주기적으로 탈이온화 장치를 가동하여야 한다. 그림 4는 사이리스터의 더워진 냉각재를 강제 팬을 이용하여 대기로 냉각시키는 열 교환기를 보여 주고 있다. 열 교환기의 팬 설계는 여유율을 고려하여 전체 냉각량의 50%를 담당하는 팬 2개와 50%의 냉각 능력을 가진 보조팬 1개로 구성하던가 아니면 전체 냉각량의 33%를 담당하는 팬 3개와 33%의 냉각 능력을 가진 보조팬 1개로 구성하는 것이 일반적인 구성이며 본 시스템에서는 $n+1(50\% \times 2 + 50\%)$ 의 시스템 설계를 가지고 있다.

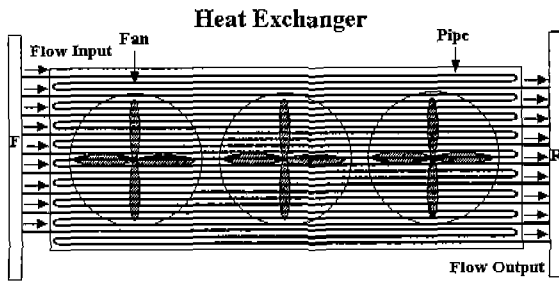


그림 4 열 교환기의 외관도

그림 5에서 T_m 은 물의 평균온도, U_m 은 물의 평균유속, D 는 열 교환기의 직경, T_A 는 공기의 대기 온도 그리고 U_A 는 공기의 유속을 표현하고 있다.

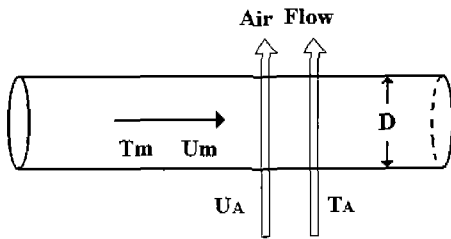


그림 5. 열 교환기의 강제 공냉

물의 Reynolds 수는 식 8과 같이 구해 질 수 있다.

$$Re_w = \frac{U_m D}{\nu_w} \quad (8)$$

Nusselt(열 전도율과 열 전달율과의 비율) 수는 식 9와 같이 구해질수 있다.

$$Nu_w = 0.023 Re_w^{0.8} Pr_w^{0.3} \quad (9)$$

$$h_w = \frac{k_w Nu_w}{D} \quad (10)$$

마찬가지로 공기의 Reynolds수는 식 11과 같이 구해 질 수 있고,

$$Re_A = \frac{U_A D}{\nu} \quad (11)$$

Nusselt 수는 식 12와 같이 구해질수 있다.

$$Nu_A = (0.4 Re_A^{0.5} + 0.06 Re_A^{2/3}) Pr^{0.4} \quad (12)$$

$$h_A = \frac{k Nu}{D} \quad (13)$$

결론적으로 열 저항 R_w 는 식 14와 같이 구해질수 있으며 열 교환기의 냉각능력은 식 16으로 부터 추론할 수 있다.

$$R_w = \frac{1}{1/h_w + 1/h_A} \quad (14)$$

$$Q = AR\Delta T = \pi DR(T_i - T_o) \quad (15)$$

$$T_i = \frac{Q}{\pi DR} + T_o \quad (16)$$

참고 문헌

- [1] H.P.Lips, "Water Cooling of HVDC Thyristor valves", IEEE Tran. on Power Delivery, Vol.9, No.4, Oct. 1994, pp.1830~1837.
- [2] P.O. Jackson, etc.3, "Corrosion in HVDC valve cooling systems", IEEE Tran. on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, April, 1997, pp.1049~1052.
- [3] F.P. Incropera, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 3rd Edition,
- [4] D. Finney, "The Power Thyristor and its Applications", Mc-Graw-hill, 1980.
- [5] A. F. Mills, "Heat Transfer", Richard D. IRWIN, INC.,1992.
- [6] Thyristor Data Book, ABB INC. 1995.
- [7] M. Necati ozisik, "Heat Transfer-a Basic Approach", McGraw-Hill, 1981.
- [8] Yoshio Shimoda and Hidetaka Satoh, "Waveform dependence of Surge-handling Capability and Failure Analysis for Semiconductor Lighting Surge Protectors", Japan Journal of Application of Physics, Vol. 34, pp. 5993 ~ pp.5997, 1995.