

電子裝備의 熱設計에 관한 考察

朴重茂 · 鄭命永 / 産業技術指導室

〈요 약〉

전자장비가 요구되는 신뢰도 및 적절한 응답 속도를 가지기 위해서는 부품 및 장비에 대한 열설계를 통하여 장비의 온도를 특정지워야 한다. 본 고찰에서는 장비의 열설계에 대한 기본적인 사항으로서 열설계에 필요한 인자들을 소개하고 예로서 PCB의 열전달 과정을 해석함으로써 온도 제어를 위한 방법을 제시한다.

I. 서 론

전자장비에 열전달 기법을 적용할 때에는 장비가 허용될 수 있는 신뢰도를 가질 수 있도록 부품의 최대온도 및 최소온도를 한정하여야 한다. 또한 최근에는 전자회로의 속도가 증감함에 따라서 장비가 최대의 성능을 갖도록하기 위하여 부품사이의 온도 변화를 최소화하는 것도 중요한 문제로 대두되고 있다.

그러므로 전자장비에 있어서 열설계의 목적은 어떤 임의의 온도로 부품을 냉각시키는 것을 고려하기 전에 요구되는 신뢰도를 보장하는 예상 온도로 모든 상황에서 부품 온도를 제어하는 것이다.

본 고찰에서는 전자장비의 열설계에 필요

로하는 일반적인 고려 사항을 설명하고, 가장 바람직하다고 간주되는 초기 설계단계에서의 전자부품의 열설계를 위한 방법을 제안한다.

또한 후차적인 열설계로서 통신장비에서 널리 사용되고 있는 수직으로 배열되는 PCB의 열전달 과정을 해석하여 접합부의 최대 온도를 제어하는 방법과 자연 대류에 의한 냉각시에 가장 최적인 PCB사이의 간격을 계산하는 방법을 소개한다.

II. 전자장비의 열설계시 고려 사항

1. 열 저항

전자장비에서 고려되는 열저항은 보통 내부 저항과 외부저항으로 나눈다. 내부저항은 부품에 대하여 정의되는 것으로서 접합부와 부품의 외부 표면의 임의의 점 사이에 존재하는 열 저항이다.

대부분의 부품은 열흐름 경로가, 서로 다른 재질과 그것의 상호 접촉면을 통하여 이루어져 있으므로 전체 내부 저항은 직렬이나 병렬로 구성되는 전도 열저항의 합으로 표시된다. 그러므로 열저항을 줄이기 위해서는 상호 접촉면의 수가 적어야 하며 bonding과 sealing도 최소의 점

축 저항이 되도록 하여야 한다.

외부저항은 내부저항이 끝나는 부품의 표면상의 임의점과 대류 흐름에서의 목적점 사이의 열 저항으로 정의된다. 이러한 외부저항은 주로 인위적인 냉각 방법에 의하여 제어될 수 있는 저항으로서 시스템의 냉각시에 주로 고려하여야 한다.

2. 열전달 설계의 한계

전자장비의 열전달 설계를 제한하는 것으로는 경제성이 가장 중요한 요소이나 여기서는 reliability, serviceability, compatibility 를 고려하는 것이 적절하다.

가. Reliability

전자부품은 각 부품이 가지는 고유의 신뢰성으로 오랜 수명을 가지기 때문에 사용되는 냉각장치도 같은 정도의 수명을 가져야 함을 요구한다. 그러나 열전달 장치는 유체구동장치, 밸브, 스위치 등에서 높은 고장을 나타낸다. 이러한 고장을 최소로 하기 위해서는 알맞은 품질의 하드웨어를 사용하고 장치의 작동용량을 낮출 수 있는 안전률을 적용하는 것이 필요하다. 구동부를 가지는 장치에서는 신뢰성을 향상시키기 위하여 부품이나 시스템 레벨에서 redundancy 를 제공하여야 한다.

나. Serviceability

장비의 설계시에는 부품을 쉽게 부착하고 제거할 수 있도록 하여 장비의 시험, 수리, 대체를 효과적으로 행할 수 있도록 하여야 한다. 이것은 장비에 사용되는 열전달 장치의 크기, 형상에 상당한 제약을 가한다. 어떤 상황하에서는 사용되는 열전달 기법이 제한될 수 있다. 최근의 장비들은 수리를 위한 특수한 기술이 필요하므로 열전달 장치의 특성 및 방법은 부품의 교체에 지장을 초래하지 않도록 하여야 한다.

다. Compatibility

열전달 장치와 전자장비의 일반적인 적용 사이에는 상호 적합성이 있어야 한다. 유해하거나 부식성이 있거나 가연성이 있는 기체는 제외되어 장비에 나쁜 영향을 끼치지 말아야 하며, 모든 표면은 안전한 온도내에서 유지되어야 한다. 장비가 작동하는 환경에 대한 적합성을 고

려함으로써 우연한 사고에 견딜 수 있도록 하여야 한다. 또한 열전달 용량의 증가에 대한 고려를 함으로써 장비 성능의 악화나 새로운 기능 부가에 따른 고장을 막을 수 있어야 한다.

Ⅲ. 초기 설계 단계에서 전자부품의 열설계

1. 부품의 온도 특성

부품이 사용될 수 있는 온도의 상한은 사용되는 환경에서 소수의 부품들이 짧은 시간동안 작동되는 온도로서 정의하며 부품의 재료와 전기적인 응력의 함수이다. 여기서는 가장 일반적인 반도체, 커패시터, 저항기의 온도에 의한 영향 및 대표적인 고장의 원인을 소개한다.

가. 반도체

반도체는 높은 온도에서 가공되며 SiO₂로 구성되어 있으므로 다른 부품에 비하여 높은 온도에서도 작동할 수 있다. 그러나 반도체는 높은 온도에서 오랜 시간동안 작동할 때에는 고장이 발생하며 그것의 형태로는

- 피로에 의한 wire bond failure
- Metalization failure
- Junction short

를 들 수가 있다.

나. 커패시터

커패시터는 사용되는 재료의 특성상 매우 낮은 온도로 제한 되어야 하며 보통 125℃ 이하의 온도에서 작동될 수 있도록 하여야 한다. 커패시터의 고장은

- Shorts between plates
- Separation of plates from leads
- Fractured seals

에 의하여 발생한다.

다. 저항기

저항기는 커패시터에 비하여 높은 온도에서 작동이 가능하지만 대부분의 탄소저항기는 150℃, 금속필름 세라믹 저항기는 300℃ 이하에서 사용하여야 한다. 온도에 기인하는 고장 형태로는

- Separation between metalization and lead
- Fractured case

가 있다.

2. 부품의 선정 방법

전술한 부품들이 시스템에서 고장을 일으키지 않도록 하기 위하여서는 시스템 온도 상황에 알맞은 전자부품의 적절한 선정이 설계의 초기 단계에서 이루어져야 한다. 이것을 만족하게 수행하기 위해서는 시스템 외부조건, 요구되는 시스템 신뢰도, 시스템에서 모든 전자부품의 전력과 전압의 측정이 이루어져야 한다.

설계의 목적은 전기적인 특성을 위하여 선정되는 부품이, 사용되는 시스템에서 어떠한 상황에 놓이게 될지를 예측하여 부품 특성을 예측되는 환경에 일치시키는 것이다.

시스템의 전력소비는 시스템 온도를 가장 높은 외부 주위 온도 이상으로 상승시킨다. 이때 전력을 소산하는 시스템 내부의 부품은 시스템 온도 이상으로 높은 온도를 갖게 된다. 가장 높게 예측되는 부품온도가 선정을 위한 기준이 된다. 이러한 온도에 대한 예측은 기대되는 설계에 부합하는 균일한 전력분포를 가진 육면체의 밀폐계를 사용하여 행할 수 있다. 부품에 사용되는 전력의 총합으로 이루어진 시스템의 총전력이 육면체의 각면에 기대되는 전력으로 나누어 적용될 때에 각 면에서의 온도는 열전달의 해석을 통하여 계산된다.

이러한 온도 분포가 결정된 후에 부품과 벽사이의 열저항을 측정함으로써 각 부품의 온도는 계산될 수 있다. 그다음에는 각 부품의 허용 작동온도를 결정하여야 하는데, 이때에는 $MTBF = 1/\lambda m$ (λm : constant failure rate)인 전체 시스템의 신뢰도 요구 조건을 이용한다. 요구되는 고장률을 알고 있을 경우에는 온도의 함수로서의 λ_b (base failure rate)를 계산할 수 있다. λ_b 를 사용하여 고장률을 핸드북을 참고하여 요구되는 고장률과 예상되는 부품온도를 비교하여서 요구되는 고장률에 부합되는 부품 온도가 예상되는 시스템 온도보다 낮을때 그 부품의 사용을 결정한다.

3. 밀폐계의 온도 예측 방법

위의 방법에 의하여 부품 표면의 온도를 계산하기 위하여서는 밀폐계 내부의 온도 분포에

대한 계산을 행하여야 한다.

각 면의 온도가 결정되고 난 후에 내부의 온도 분포는 대류에 대한 Boussinesq approximation에 의한 다음의 지배 방정식을 해석함으로써 계산한다.

가. 연속 방정식

$$\nabla \cdot V = 0$$

나. Navier-Stokes 방정식

$$\frac{DV}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 V - g\alpha \Delta T$$

다. 에너지 방정식

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = -\text{div} H$$

V : 유동장의 속도 벡터

P : 압력

g : 중력 가속도

ν : 동점성 계수

α : 팽창 계수

ρ : 밀도

C_p : 정압비열

H : $-K \text{ grad } T$ (K : 열전도도)

위의 세 식을 control-volume formulation에 의하여 discretization 함으로써 다음 형태의 식을 얻는다.

$$a_p \phi_p = \sum a_{nb} \phi_{nb} + b$$

여기서 ϕ 는 속도나 온도를 나타내고 a 는 계수, 첨자 nb 는 p 의 neighbor point를 나타낸다. 이식을 유한 차분법에 의하여 계산하면 밀폐계 내부의 온도 분포를 알 수 있다.

IV. PCB의 열해석

1. PCB의 열전달 과정

자연 대류 상태에 놓인 PCB의 열전달 과정은 <그림 1>의 개략도에서 다음 방법으로 그 온도를 계산한다.

$T_J - T_1$: 접합부와 케이스 사이의 온도차이

$$T_J - T_1 = R_J Q_1 \dots \dots \dots (1)$$

$T - T_1$: 케이스와 PCB의 접촉면 사이의 온도차이

열흐름은 lead를 통해서와 케이스와 PCB의 접촉면을 통하여 발생하기 때문에 저항은 병렬의 합으로 이루어진다.

$$T_1 - T_2 = R_2 Q_1 \dots \dots \dots (2)$$

$$R_2 = \frac{1}{\frac{AK}{L} + \frac{1}{R_1}}$$

$T_2 - T_3$: PCB 양면 사이의 온도 차이

$$T_2 - T_3 = Q_1 \times \frac{t}{AcKp} \dots\dots\dots (3)$$

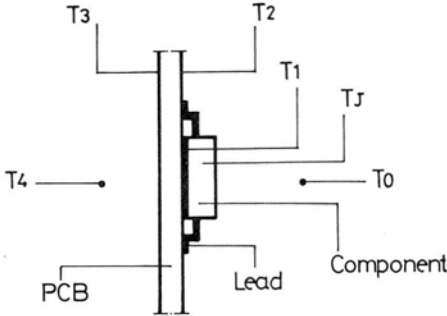
$T_3 - T_4$: PCB와 주흐름 사이의 온도 차이

$$T_3 - T_4 = \frac{Q_1}{h_3Ac} \dots\dots\dots (4)$$

$T_1 - T_4$: 부품과 주흐름 사이의 온도 차이

$$T_1 - T_4 = \frac{Q_2}{h_0Ac} \dots\dots\dots (5)$$

위의 식 (1)~(5)에서 고장의 주된 발생점인 접합부의 온도를 결정할 수 있으며, 접합부 온도를 제어하기 위해서는 주흐름의 온도를 낮추는 것이다.



- R_j : 접합부와 케이스 사이의 열저항
- R_1 : 부품과 board 사이의 접촉저항
- A_c : 부품 면적
- L : lead의 유효 길이
- A : lead의 단면적
- K : lead의 열전도도
- Q : 부품의 열소산량 ($Q_1 + Q_2$)
- h_3 : 부품의 열전달 계수
- h_2 : PCB의 열전달 계수
- t : PCB 두께
- Kp : PCB의 열전도도

〈그림 1〉 PCB의 개략도

2. PCB의 최적 간격

주 흐름의 온도를 낮추기 위해서는 PCB사이의 유동을 크게하여 최대의 열전달률을 발생시켜야 한다. 자연 대류 냉각에서 PCB사이의 유동은 2차원 channel 유동이라고 간주하는 것이 적절하다. 이때 PCB의 열소산은 다양한 방법으로 모델화될 수 있지만 비대칭 isoflux의 형태가 가장 보편적이다.

이러한 상황에서 열전달을 최대화 하기 위한 PBC의 간격은 다음과 같다. PCB의 간격이 줄어들때 그 사이의 유동은 차츰 적어지나 단위 체적당 평판의 총면적은 증가한다. 유동이 적어짐에 따라서 열전달 계수는 적어지지만 총 열전달률은 열전달 계수와 전열면적과의 곱이 최대인 곳에서 발생하므로, 총 열전달률이 최대인 PCB의 간격이 존재한다.

계산식으로는 총 열전달률 Q_T 는

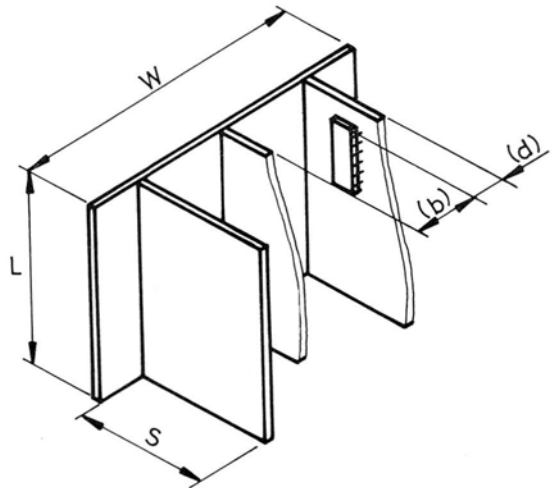
$$Q_T = [2 LSW / (b+d)] [\Delta T] [Nu \cdot \frac{k}{b}] \dots\dots\dots (6)$$

이다.

여기서

$$Nusselt\ Number\ Nu = [6/Ra + 1.88/Ra^{1/4}]^{-1/2}$$

이며 Rayleigh Number $Ra = \rho^2 g \beta C_p b^5 q / \mu K^2 L$ 이다. (β : 체적 팽창계수, μ : 점성계수, q : 표면 열유출량)



〈그림 2〉 PCB의 배열도

식 (6)에 Nu와 Ra를 대입하여 정리하면

$$\frac{Q_T}{LSW\Delta T} = 2K \frac{1}{b^2 + bd} \left[\frac{6}{Rb^5} + \frac{1.88}{R^{0.4}b^2} \right]^{-0.5} \dots\dots\dots (7)$$

(단, $R = \rho^2 C_p g \beta q / \mu L K^2$)

최대값을 얻기 위하여 식(7)을 b에 대하여 미분하여 0으로 두면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial b} \left(\frac{Q_T}{LSW\Delta T} \right)$$

$$= 2K \frac{\partial}{\partial b} \left\{ \frac{1}{b^2 + bd \left(Rb^5 + R^{0.4} b^2 \right)^{0.5}} \right\}$$

$$= 2K (3b + 9d - 1.88R^{0.6} b^4)$$

$$= 0$$

$$b + 3d = 0.627 R^{0.6} b^4 \quad \dots\dots\dots(8)$$

여기서 d를 무시하면 PCB의 최적 간격은

$$b = 1.168 R^{-0.2} \quad \dots\dots\dots(9)$$

이다.

V. 결 론

본 고찰에서는 전자장비의 신뢰성을 향상시키기 위하여 열설계에 대한 사항을 설명하였다.

열설계의 가장 근본적인 대책은 설계의 초기 단계에서 시스템에 알맞는 부품을 선정하는 것이다.

부품의 선정을 위해서는

1. 초기 설계 단계에서 부품의 온도 예상값을 결정
2. 부품의 필요로 하는 고장률 결정
3. 부품 고장률 온도와 예상되는 부품 온도를 결정하여야 하며 이를 위하여 밀폐계에서의 온도 예측 방법을 제안하였다.

또한 제 2 단계 열설계의 한 방법으로써 사용되는 시스템에서의 온도를 제어하기 위하여 PCB를 실례로 들어 그 열전달 과정 및 최대의 열

전달을 이루기 위한 PCB의 최적 간격을 계산하였다. 앞으로의 열설계는 열해석뿐만 아니라 신뢰성과 functionality 및 cooling hardware 측면에서의 연구가 많이 이루어져야 할 것이다.

〈参 考 文 献〉

1. Black, E. P. & E. M., Daley, "Thermal Design Considerations for Electronic Components," ASME Publication 70-DE-17, 1970.
2. Bergles, A. E., R. C., Chu, and J. H. Seely, "Survey of Heat Transfer Techniques Applied to Electronic Equipment," ASME paper 72-WA/HT-39, 1972.
3. Watson, D., Thermal Study of Circuit Assembly, Microelectron. Reliab., 1973.
4. Cohen, A. Bar & W. M. Rohsenow, Thermally Optimum Arrays of Cards and Fins in Natural Convection, "IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1983.
5. Patanker, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill Book Co., 1980.