

유입공기의 온도변화가 전자모듈의 냉각에 미치는 영향

Cooling effect of an electronic module with a variation of the inlet air temperature

이진호* 조성훈**
Jin-Ho Lee, Seong-Hoon Cho

ABSTRACT

The conjugate heat transfer from a protruding module in a horizontal channel with a variation of air temperature is experimentally investigated. It is an aim of this study is to estimate temperature difference between a module and air. This study is performed with a variation of parameters that are air temperatures ($T_i = 25\text{ }^\circ\text{C} \sim 55\text{ }^\circ\text{C}$), thermal resistance ($R_c = 158\text{ K/W}$), air velocities ($V_i = 0.1\text{ m/s} \sim 1.5\text{ m/s}$), and input power ($Q = 3\text{ W}, 7\text{ W}$).

The results show that as the thermal resistance increases, the effect of air temperatures are decreased. And input power was most effective parameter on the temperature difference between a module and air.

주요기술용어: Inlet air temperature(유입공기온도), Thermal resistance(열저항), Module(모듈), Input power(입력열량), Horizontal channel(수평채널)

1. 서론

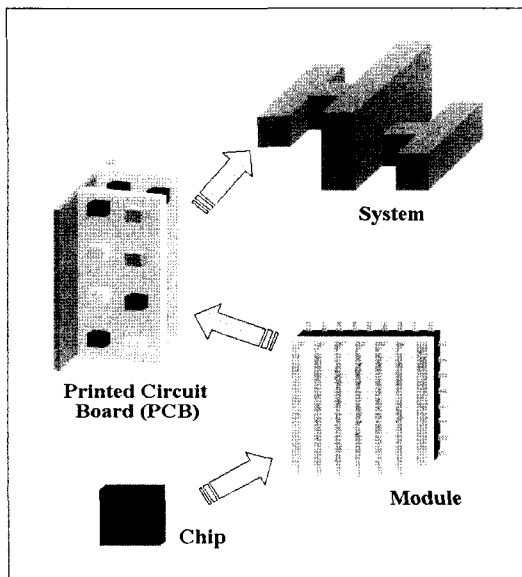
군사용 전자장비에 탑재되는 각종 전자부품들은 상용전자장비에 내장된 전자부품들보다 작동환경이 더 열악하다. 이때 군사용 전자장비는 주로 밀폐된 공간 또는 복사열에 노출된 상태에서 작동하는데, 다수의 고밀도 전자칩이 내장된 전자모듈이 정상적으로 작동이 되려면 모듈이 일정 온도 이하로 유지되어야 한다. 따라서 전자장비에 내장된 모듈은 대기의 온도, 습도,

기압, 염도, 공기중의 불순물, 기계 및 전기적 충격 등과 같은 사용환경요소에 의해 그 시스템의 신뢰성과 수명 등에 큰 영향을 받는다. 이들 요소 중 대기의 온도와 속도는 강제공냉식 전자장비설계시 매우 중요한 고려요소중의 하나이다.

최근 전자기술의 급격한 발전으로 반도체 회로패턴의 미세화 및 프로세스 기술이 크게 향상되었고, 그 결과 칩 당 소자의 집적도가 급격하게 증가되었다. 전자소자가 기본적인 논리연산을 하려면 전력이 필요하며, 이 때 공급된 전력은 소자내부의 전기저항 때문에 열이 발생한다. 소자로부터의 발열량은 칩 또는 모듈

* 육군 3사관학교 기계공학과 교수

** 경북대학교 대학원 기계공학부



[Fig. 1] Structural levels of an electronic computer

당의 집적도가 증가할수록 더욱더 증가하게 된다. 이로 인해 전자장비의 열적환경에 대한 요구조건은 날로 가혹해지고 있는 실정이다. 따라서 이러한 전자장비가 정상적으로 작동될 수 있도록 최적의 열설계를 해야한다. 이러한 분야를 전자패키징(electronic packaging)이라 하며, 그 설계 수준에 따라서 Fig. 1과 같이 4단계로 구분된다.

Fig. 1은 전자장비의 구조를 간략화시킨 그림으로써 소자(chip), 모듈(module), PCB (Printed Circuit Board)와 시스템(system)의 4단계로 구성된다. 소자는 열적, 화학적, 광학적, 기계적인 과정을 통해 전자회로를 제공하는 실리콘 조각으로서 대기로부터 소자를 밀폐시키고 신호의 전송을 위해 전기선이 부착된 패키지에 장착된다. 패키지에는 열전달 효과를 증대하기 위한 방열핀이 부착되어 있고, 이때 다수의 소자를 포함하는 패키지를 모듈이라 한다. 패키지들은 서로 다른 패키지들을 전기적으로 연결하기 위해 회로망으로 구성된 PCB에 장착된다. 또한 PCB로 구성된 시

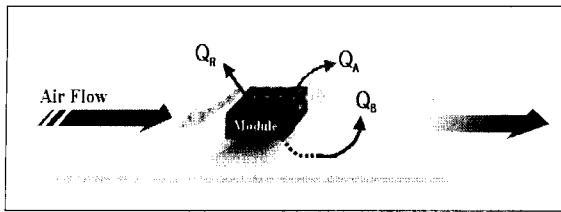
스템은 많은 외부장치와 연결되어 있다.

일반적으로 열적설계의 기본적인 목적은 상기의 4단계 구조에 있어서 소자의 온도를 운용온도범위 내에서 작동할 수 있도록 열적상황을 설정하는 것이다. 특히, 고온공기에 노출되기 쉬운 전자장비의 열적설계는 3단계 수준(PCB)의 해석이 매우 중요하다.

전자칩의 수명이나 신뢰도는 전자칩의 작동온도에 의해서 크게 좌우된다. Nelson 등⁽¹⁾의 연구에 의하면 전자칩의 작동온도를 설계온도보다 10°C 높일 때마다 반도체의 수명은 50% 이상씩 감소하는 것으로 알려져 있다. 또한 반도체 접합부(junction)에서 발생하는 온도는 반도체의 정상동작과 신뢰성에 영향을 미치므로 제품성능을 결정하는 중요한 요인이 된다. 그러므로 접합부의 최대한계온도는 상업용은 약 85~120°C 이하로, 군사용은 150°C(최대)이하로 유지시켜야 한다. 따라서 전자장비 내에서 발생하는 에너지의 소산에 미치는 영향요소에 관한 근본적인 이해가 필요하며, 이 열문제를 해결하는 것이 전자칩 개발의 매우 중요한 과제이다.

발생열량, 냉각유체의 속도, 시스템의 안정성, 신뢰성 그리고 경제성 등을 고려해볼 때 고성능 전자장비에는 강제대류공기냉각방식이 가장 적합한 방식이다. 그러나 소비전력문제와 팬의 소음문제는 기판을 통한 혼합 및 강제대류열전달 방식을 도입함으로써 해결할 수 있을 것이다. 그럼에도 불구하고 아직까지 이에 관한 연구는 매우 미흡하므로 이에 대한 연구가 필요하다.

모듈에서 발생한 열량은 Fig. 1에서와 같이 여러 경로를 통하여 유입공기로 발산된다. 주요 열전달 경로는 모듈 표면에서 주위의 공기로 직접 전해지는 대류열전달(Q_A)과 I/O핀(모듈지지부)을 통해 기판으로 전도된 후 다시 유입공기로 발산되는 복합열전달



[Fig. 2] Heat transfer paths from a simulated module to the channel air flow

(Q_B)이 있으며, 모듈 표면에서 복사열전달(Q_R)이 있다. 칩이 고용량화되어 핀의 수가 증가할수록 지지부를 통한 기판으로의 전도에 의한 열 이동은 중요한 변수가 된다. 또한 모듈 표면에서의 냉각효과는 공기 속도가 빠르거나 입구 공기 온도가 낮을수록 커진다. 그러나 실제 시스템에서 공기속도를 증가시키면 전력 소비가 증가하며, 소음, 먼지, 내구성저항 등의 많은 문제점을 발생한다.

전자장치 냉각에서 혼합 및 강제대류와 복합열전달의 중요성이 부각되기 시작하면서 최근까지 많은 연구가 수행되고 있다.

Graham 등⁽²⁾은 최초로 3차원 모듈에 대한 복합열전달의 중요성을 강조하였다. Kim 등⁽³⁾은 기판의 열전도계수가 전자장치냉각의 설계와 분석에서 중요한 인자가 된다고 하였다. 한편 Nakayama 등⁽⁴⁾은 I/O핀의 열저항을 이용하여 기판으로의 전도열전달의 중요함을 밝혔으며, Kim 등⁽⁵⁾은 수직 채널 내에서 단일 열원에 대한 복합열전달 특성을 연구하여 블록내의 최대온도에 미치는 레이놀즈수와 그라시호프수 및 열전도계수비 등의 상대적 영향력을 고찰하였다. Lee 등⁽⁶⁾은 혼합대류 유동내의 채널에 부착된 모듈로부터 공기유동으로의 복합열전달에 관한 실험적 연구를 수행하였다.

대부분의 기존 연구들은 전자장비의 사용온도를 20°C ~ 25°C로 설정하였다. 그 이유는 대부분의 상용

전자장비를 30°C 이하에서 사용하기 때문이다. 그러나 군용전자장비의 경우에는 30°C 이상의 기온에서도 정상적인 작동이 요구되기도 한다. 따라서 기존의 연구 결과로는 고온공기(약 30°C에서 60°C 정도)에 의해 강제냉각되는 군용전자장비에 대한 방열특성을 예측하기가 어렵다.

본 연구에서는 군사용 전자장비에 주로 적용될 수 있는 유입공기의 온도($T_i = 25^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$)와 유입공기 속도($V_i = 0.1\text{m/s} \sim 1.5\text{m/s}$) 그리고 입력열량($Q = 3\text{W}, 7\text{W}$)의 변화에 따른 열전달 특성을 실험적으로 구명하였다. 그리하여 고온공기에 의해 냉각되는 모듈에 대한 열적인 최적설계 데이터를 제공하고자 한다.

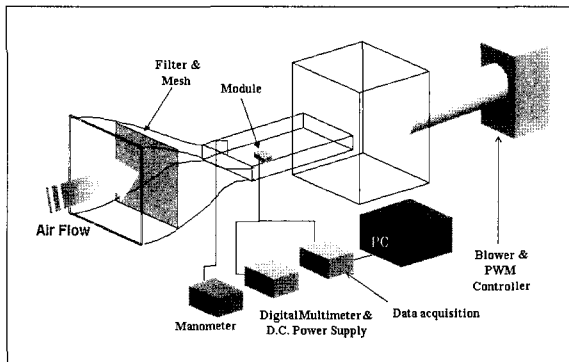
2. 실험 및 관련이론

2.1 실험장치

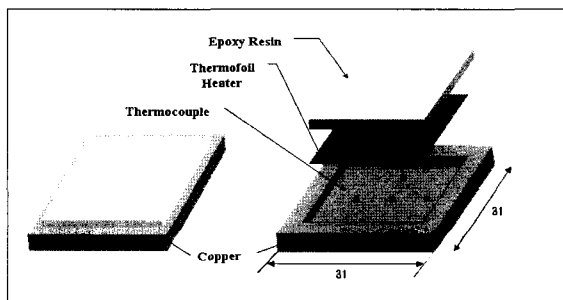
본 실험에서 사용한 장치들을 Fig. 3에 나타내었다. 실험장치의 우측 말단에 설치된 Blower에 의하여 실험실 내부의 공기가 Filter & Mesh, Honeycomb을 통해 흡입방식으로 시험부(test section)에 유입된다. 이 유입공기의 속도는 채널 입구에서 3cm 떨어진 곳의 채널중앙부에 설치된 피토크관(pitot tube)과 마이크로 마노미터(Furness, FCO510)를 이용하여 측정하였고, 공기의 속도는 PWM Controller를 통하여 조절하였다. 채널내부로 유입되는 공기의 속도를 균일하게 하기 위하여 필터(filter), 메쉬(mesh), 허니컴(honeycomb)을 풍동입구에 설치하였다.

이때 유입공기의 온도는 5개의 열전대를 시험부의 중앙에 등간격으로 설치하여 그 값을 평균하였다. 또한 유입공기의 온도차를 줄이기 위해 항온 챔버를 사용하여 설정온도를 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내로 유지하였다

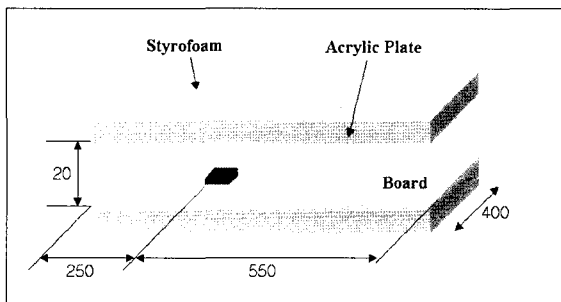
모듈의 발열을 위해 공급되는 전원은 직류전원 공



[Fig. 3] Experimental apparatus



(a) Simulated module



(b) Test section

[Fig. 4] Schematic of simulated module and test section(Units : mm)

급장치(HP, E3611A)와 디지털 멀티미터(HP, 8842A)로 이루어진다. 모듈 표면의 온도측정을 위해 Fig. 3에서와 같이 열전대를 모듈내부 4곳에 설치하였다. 그리고 온도측정을 위해 Data Acquisition (NetDAQ, FLUKE, 2645A)을 사용하고, PC로 측정데이터를 처

리하였다.

Fig. 4는 수평채널을 구성하는 시험부와 모듈을 나타낸 그림이다.

Fig. 4 (a)의 모듈은 고밀도집적소자(VLSI chip)를 모사한 것으로써 31×31×4 mm의 정방형으로 만들어 깊이가 3mm인 정사각형의 자리면을 가공한 다음, 크기 25.4×25.4×0.5mm, 저항 147Ω(±0.01Ω)의 포일 히터(OMEGA, KHLV 101/10P)를 부착하였다. 그리고 동관면과 포일 히터 사이의 열저항을 줄이기 위하여 고전도율 접착제로 접착하고, 모듈 후면으로의 열손실을 줄이기 위하여 에폭시 수지를 저전도율 접착제를 이용하여 포일 히터의 후면에 부착하였다. 모듈 표면에서의 온도를 측정하기 위하여 Fig. 4 (a)에서처럼 모듈내부의 4개 지점에 K형 열전대를 부착하였다.

Fig. 4 (b)는 시험부를 나타낸 그림이다. 시험부는 길이 800mm, 폭 400mm, 두께 20mm의 투명 아크릴 판으로 제작하였다. 그리고 시험부 하부 아크릴판 위에 설치된 기판(board)은 아크릴판으로 제작하였다. 이때 기판의 기하학적 크기는 길이 800mm, 폭 400mm이고 두께는 5mm이다. 모듈은 Fig. 4 (b)에서와 같이 시험부 입구에서 250mm 떨어진 중앙에 위치하도록 하였다.

2.2 실험방법 및 범위

본 실험은 모듈지지부를 높이 3mm인 스테인리스 원관(외경 0.7mm)으로 만들고, 기판을 두께 5mm의 아크릴판으로 만들어 모듈에서 발생하는 열은 유입공 기로만 전달되도록 하였다. 따라서 기판으로의 전도열 전달량이 거의 없는($Q_B \approx 0.002 Q$) 단열조건에서 실험을 하였다.⁽⁹⁾

본 실험의 조건은 Table 1과 같다.

[Table 1] Experimental Condition

Parameter	Condition
Input power (Q)	3.0, 7.0 W
Inlet velocity (V_i)	0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5 m/s
Inlet air temperature(T_i)	25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 °C
Module support resistance (R_c)	158 K/W
Reynolds number (Re)	200 ~ 3000

2.3 관련이론 및 정의

모듈의 입력열량 Q 를 식(1)로 정의하였다.

$$Q = Q_A + Q_B + Q_R \tag{1}$$

여기서 Q_R 값은 Q 의 3~4%로 계산되었다.⁽⁹⁾

식 (2)는 모듈에서 공기로의 총열저항 R_t 를 나타낸 것으로, Kamal⁽⁷⁾ 등에 의하여 정의된 식을 사용하였다.

$$R_t = \frac{T_M - T_i}{Q} = \frac{\Delta T}{Q} \tag{2}$$

또한 모듈의 무차원온도 θ 는 입구공기온도를 기준으로 식(3)과 같이 정의하였다.

$$\theta = \frac{T_M - T_i}{T_i} = \frac{\Delta T}{T_i} \tag{3}$$

모듈지지부 열저항은 식(4)로 정의하였다.

$$R_c = \frac{h_c}{k_c \cdot S} \tag{4}$$

여기서 h_c (=0.003 m)는 모듈지지부의 높이, S 는 모듈과 지지부와의 접촉면적(m^2)이고, k_c 는 모듈지지부의 열전도율이다. 식 (4)에 의해 본 실험에서는 $R_c = 158K/W$ 로 계산되었다.

Reynolds수는 식(5)와 같이 정의하였다.

$$Re = \frac{V \cdot D_h}{\nu} \tag{5}$$

여기서 채널의 수력직경 $D_h = 4A_c/P$ 이고, A_c 는 채널의 유동 단면적($0.4 \times 0.02m^2$), P 는 채널의 둘레길이($0.084m$), ν 는 공기의 동점성계수이다.

또한 Nusselt수는 다음과 같이 정의된다.

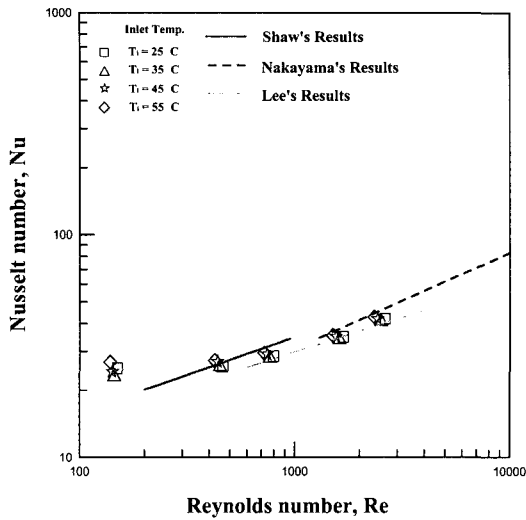
$$Nu = \frac{h \cdot L}{k} \tag{6}$$

여기서 h 는 모듈의 전체 표면적을 기준으로 한 대류열전달계수, L 은 모듈의 길이, k 는 공기의 열전도계수이다.

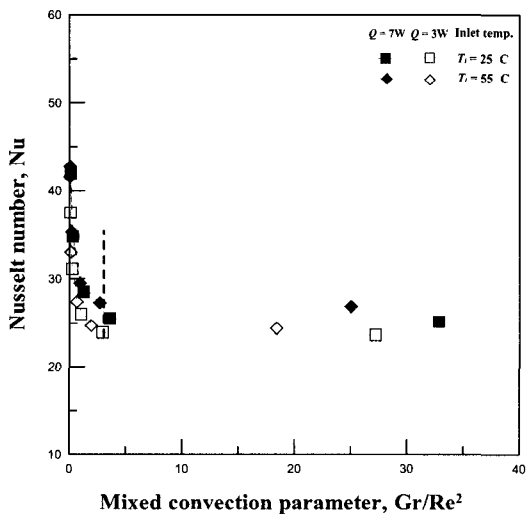
유입공기의 모든 물성치는 막온도(film temperature, T_f (= $(T_M + T_i)/2$))를 기준으로 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 Nakayama 등⁽²⁾과 Lee 등⁽⁶⁾ 그리고 Shaw 등⁽¹²⁾에 의해 제안된 결과의 곡선과 비교하기 위해 나타낸 그림이다. 이 결과는 본 실험에서 이용한 모듈의 형상과 치수를 이용하여 수정하였다. 본 실험의 결과와 Nakayama 등의 결과와는 최대 7% 이내, Lee 등과는 2% 이내, 그리고 Shaw 등과는 5% 이내로 잘 일치함을 알 수 있었다.



[Fig. 5] Relations between Reynolds number and Nusselt number



[Fig. 6] Relations between mixed convection parameter and Nusselt number

Fig. 6에 입력열량 Q 가 3, 7W일 때, 혼합대류변수 Gr/Re^2 에 따른 Nusselt수 Nu 의 변화를 나타내었다. 이 때 Grashof수는 식(7)과 같다.

$$Gr = \frac{g\beta(T_M - T_i)D_h^3}{\nu^2} \quad (7)$$

여기서 β 는 공기의 열팽창계수, g 는 중력가속도이다. 본 실험에서 계산된 Gr 의 범위는 $6.69 \times 10^5 \sim 9.94 \times 10^5$ 이다.

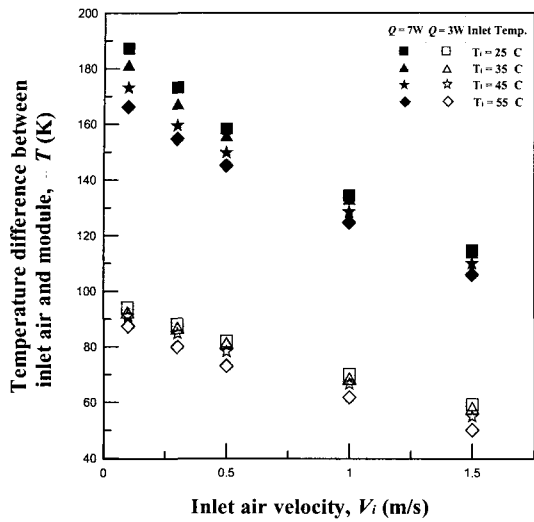
Nu 는 $Gr/Re^2 = 0.01 \sim 0.4$ 사이에서는 거의 선형적으로 급격히 감소하고, $0.4 \sim 1.2$ 에서는 비선형적으로 서서히 감소하며 1.2 이상에서는 거의 일정함을 나타내었다. 이것은 $0.01 \leq Gr/Re^2 < 0.4$ 범위에서는 강제대류열전달이 지배적이고, 1.2 이상에서는 자연대류 열전달이 지배적인 영역임을 의미한다. 또한

Gr/Re^2 가 0.4에서 1.2 사이에서는 자연대류와 강제대류가 동시에 일어나는 혼합대류 유동영역을 의미한다. Kang 등⁽⁸⁾은 수직 또는 수평기판 위에 2차원 가열블럭이 탑재된 경우 혼합대류 유동영역이 혼합대류변수 $Gr/Re^{5/2} = 0.9 \sim 1.1$ 의 범위에서 나타남을 밝혔다.

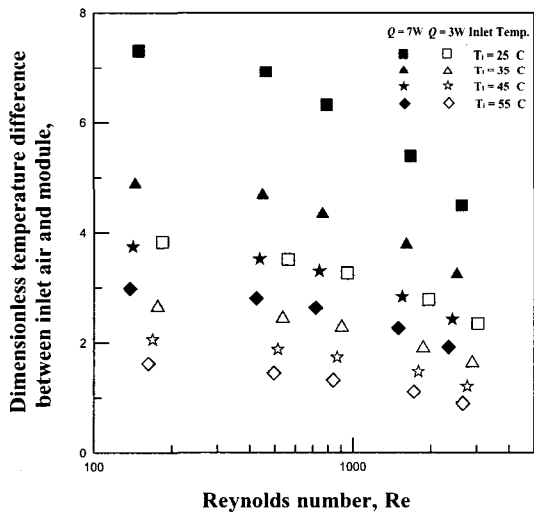
이와 같이 기존의 연구결과와 본 실험 결과와의 차이는 모듈의 기하학적 형상, 공기속도 그리고 입력열량 등의 실험조건이 다소 차이가 있기 때문이다.

Fig. 7은 입력열량 Q 가 각각 3W, 7W이고, 입구 공기온도가 각각 25°C, 35°C, 45°C, 55°C일 때 입구 공기 속도 V_i 에 따른 모듈과 입구공기의 온도차 ΔT 의 관계를 나타낸 그림이다.

V_i 가 증가함에 따라서 ΔT 는 거의 선형적으로 감소한다. 그러나 그 감소폭은 Q 가 7W인 경우가 3W인 경우보다 더 크다. 이는 Q 가 커지면 모듈의 온도가 더 높아져서 속도에 의한 대류열전달 영향이 커지기 때문이다. 한편 입구공기의 온도 T_i 가 커지면 ΔT 는 감소한다. 왜냐하면 T_i 가 커지면 모듈에



[Fig. 7] Temperature differences between inlet air and module vs. inlet air velocities for different inlet air temperatures at $R_c = 158\text{K/W}$



[Fig. 8] Dimensionless temp. difference vs. Reynolds number for different temperature at $R_c = 158\text{K/W}$

서 공기류로의 대류열전달이 감소하여 모듈의 온도가 상승하나 그 절대량이 T_i 의 상승폭보다 작기 때문에

ΔT 는 감소한다.

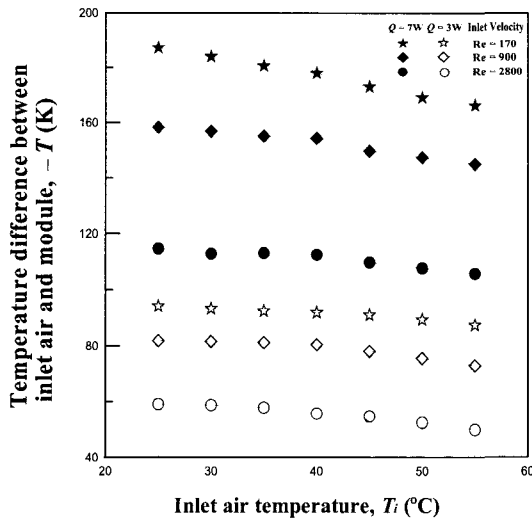
Fig. 8은 Fig. 7과 동일한 조건에서 레이놀즈수 Re 에 따른 식 (3)에서 정의한 모듈의 무차원온도 θ 의 변화를 나타낸 그림이다.

Re 가 증가함에 따라서 θ 는 전반적으로 감소한다. 이 때 θ 는 $Re = 150 \sim 1000$ 에서는 서서히 감소(평균 11% 감소)하다가 $Re = 1000 \sim 3500$ 에서는 급격히 감소(평균 25% 감소)한다. 또한 θ 는 공기의 속도가 저속($Re = 150 \sim 1000$)일 때에는 유입공기의 온도에 의한 영향을 많이 받는다. 그러나 Re 가 1000 이상인 경우에는 그 영향이 매우 작아진다. 특히 Re 가 약 5000이상일 때에는 입구공기온도의 영향이 거의 없을 것으로 예측된다.

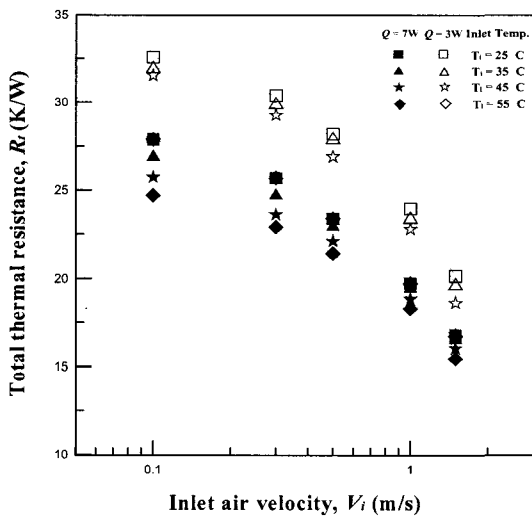
이는 Re 가 1000($V_i \approx 0.5\text{m/s}$)이상이 되면 부력에 의한 자연대류 영향이 거의 없기 때문이며, 입구공기온도에 의한 영향에 비해 공기속도에 의한 영향이 상대적으로 커지기 때문으로 사료된다. 따라서 온도변화가 공기에 의해 혼합 강제 냉각되는 전자장비 내에서 Re 는 약 1000 이상으로 유지하는 것이 공기의 온도상승에 따른 영향을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 9는 입력열량 Q 가 각각 3W, 7W이고, 레이놀즈수 Re 가 각각 170, 900, 2800일 때, 유입공기온도 T_i 변화에 따른 모듈과 유입공기와의 온도차 ΔT 의 관계를 나타낸 그림이다.

T_i 가 증가함에 따라서 ΔT 는 선형적으로 감소한다. ΔT 의 감소폭은 Q 가 3W일 때보다 7W일 때가 약간 더 크다. 이는 Q 가 증가하면 모듈의 온도가 상승하여 모듈 주위를 유동하는 공기의 가열로 인한 부력에 의한 열전달 촉진효과가 향상되기 때문으로 추



[Fig. 9] Temperature difference versus inlet air temperature for different velocities at $R_c = 158 \text{ K/W}$



[Fig. 10] Thermal resistance versus inlet air velocity for different temperature at $R_c = 158 \text{ K/W}$

측된다. 한편 Re 가 커지면 T_i 의 증가에 따른 ΔT 의 감소폭이 감소한다. 왜냐하면 Re 가 커지면 부력에 의한 자연대류영향이 급격히 감소하기 때문이다.

Fig. 10은 Fig. 9와 같은 조건에서 입구공기속도 V_i 의 변화에 따른 모듈의 총열저항 R_t 의 관계를 나타낸 그림이다.

V_i 가 증가하면 R_t 는 V_i 가 0.1m/s에서 0.5m/s ($Re \approx 1000$)까지는 서서히 감소하다가 0.5m/s 이상에서는 급격히 감소한다. 이는 V_i 가 0.5m/s 이상이 되면 부력보다 공기의 구동력이 훨씬 더 커지게 되고, 그 결과 모듈주위의 열경계층이 얇아져서 열저항이 급격히 감소하기 때문이다

4. 결론

군용 전자장비 내에 전자모듈이 수평채널내에 부착되어 있을 때, 유입되는 공기의 온도 ($T_i = 25 \sim 55^\circ\text{C}$)와 유입공기의 속도 ($V_i \approx 0.1 \sim 1.5 \text{ m/s}$), 그리고 입력열량 ($Q = 3 \text{ W}, 7 \text{ W}$)의 변화에 따른 냉각특성을 구명한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

첫째, 유입공기온도 변화에 따른 수평채널 단열기판에 탑재된 전자모듈에 대한 열전달 상관식을 Fig. 5에서 다음과 같이 구하였다.

$$Nu = 2.53 \cdot Re^{0.35} \quad (8)$$

식 (8)의 적용범위는 $750 \leq Re \leq 3200$, $0.01 \leq Gr/Re^2 < 0.7$ 이다.

둘째, 모듈의 무차원 온도 θ 는 유입공기의 속도가 저속 ($Re = 150 \sim 1000$)일 때에는 유입공기의 온도에 의한 영향을 많이 받는다. 그러나 Re 가 1000 이상인 경우에는 그 영향이 매우 작아진다. 또한 Re 가 약 5000 이상일 때에는 입구공기온도의 영향이 거의 없

을 것으로 예측된다.

셋째, 유입공기속도 V_i 가 증가하면 모듈의 총열저항 R_t 는 $V_i = 0.1\text{m/s} \sim 0.5\text{m/s}$ 에서는 서서히 감소하다가 $V_i \geq 0.5\text{m/s}$ 이상에서는 급격히 감소한다. 따라서 V_i 가 약 0.5m/s ($Re \geq 1000$) 이상인 경우에는 입구공기의 온도에 따른 영향이 급격히 감소한다. 따라서 고온공기에 노출되기 쉬운 전자장비의 공기냉각에서는 Re 가 1000 이상으로 냉각을 하는 것이 유입공기의 온도의 영향을 줄일 수 있다고 판단된다.

끝으로 전도기판에 탑재된 모듈에서 고온공기로의 대류 및 혼합열전달에 대한 냉각특성을 조사하기 위한 기초 데이터를 제공하였다. 특히, 본 연구결과는 열악한 냉각환경하에서도 시스템의 열안정성이 요구되는 군용전자장비의 열적 설계시 중요한 자료로 활용될 수 있다.

참 고 문 헌

1. Nelson L. A., Sekhon K. S. and Fritz J. E., 1978, Direct Heat Pipe Cooling of a Semiconductor Devices, Int. Heat Pipe Conf., pp.373~376.
2. Graham, K. and Witzman S., 1988, Analytical correlation of thermal design of electronic packages, Cooling Technology for Electric Equipment, pp.249~264.
3. Kim, S. H and Anard, N. K., 1994, Turbulent heat transfer between a series of parallel plates with surface-mounted discrete heat sources, Journal of Heat Transfer, Vol. 116, pp. 577~587.
4. Nakyama, W. and Park, S. H., 1996, Conjugate heat transfer from a single surface mounted block to forced convective air flow in a channel, Journal of Heat Transfer, Vol. 118, pp. 301~309.
5. Kim, E. K., Baek, B. J., Pak, B. C., Cho, B. S., 1996, Conjugate Heat Transfer in a Vertical Channel with Protruding Heat Source, Trans. KSME (B) Vol. 20, No. 2, pp.741~751.
6. Lee, J. H., Riu, K. J., Lee, B. H., 2000, Cooling Effect of a module in a Horizontal Channel with a Variation of Thermal Resistance and Material of board, Proceedings of the SAREK 2000 Summer Annual Conference(I), pp.164~171.
7. Kamal K. Sikka, Timothy S. Fisher, Kenneth E. Torrance, and Charles R. Lamb, 1997, Effects of Packaging Orientation and Mixed Convection on Heat Transfer from a PQFP, IEEE Trans. on components, packaging, and manufacturing technology - Part A, Vol 20, No. 2, pp.152~159.s
8. Kang, B. H. and Jaluria, Y., 1990, Mixed convection transport from an isolated heat source module on a horizontal plate, Journal of Heat Transfer, Vol. 112, pp.653~661.
9. 이진호, 1999, 모듈에서 기판으로의 전도열전달을 고려한 혼합대류열전달, 경북대학교 학위논문
10. H. Shaukaullah, Wayne R. Storr, Bernt J. Hansen. and Michael A. Gaynes, 1996, design and Optimization of Pin Fin Heat Sinks for Lo

- w Velocity Applications, IEEE Transaction on components, packaging, and manufacturing technology-Part A, Vol 19, No. 4, pp.486~494.
11. 이진호, 조성훈, 2000, 고온공기에 노출된 군용 전자장비내 전자모듈의 냉각특성, 한국군사과학기술학회 추계학술대회논문집 Volume I, pp. 547~554.
12. Shaw, H. J. and Chen, W. L., 1991, Study on the laminar mixed convective heat transfer in Three-Dimensional Channel With a Thermal Source, Journal of Electronic Packaging, Vol. 113, pp.40~49.