

다양한 냉각방법에 따른 수평채널 내 전자부품의 열전달 특성

손영석[†] · 신지영^{*}

(원고접수일 : 2008년 4월 29일, 원고수정일 : 2008년 8월 29일, 심사완료일 : 2008년 9월 5일)

Heat Transfer Characteristics of Electronic Components in a Horizontal Channel According to Various Cooling Methods

Young-Seok Son[†] · Jee-Young Shin^{*}

Abstract : Heat transfer characteristics of protruding electronic components in a horizontal channel are studied numerically. The system consists of two horizontal channels formed by two covers and one printed circuit board which has three uniform protruding heat source blocks. A two-dimensional numerical model has been developed to predict the conjugate heat transfer, and the finite volume method is used to solve the problem. Five different cooling methods are considered to examine the heat transfer characteristics of electronic components according to the different cooling methods. The velocity and temperature of cooling medium and the temperature of the heat source blocks are obtained. The results of the five different cooling methods are compared to find out the most efficient cooling method in a given geometry and heat sources.

Key words : Heat transfer characteristics(열전달특성), Electronic components(전자부품), Horizontal channel(수평채널), Cooling method(냉각방법)

기호설명

그리스 문자

k : 열전도율 [W/m·K]

θ : 무차원온도

n : 법선좌표

하첨자

Q : 단위 길이당 발열량 [W/m]

T : 온도 [K]

f : 유체

u : 수평방향 속도 [m/s]

s : 고체

v : 수직방향 속도 [m/s]

∞ : 주위

x : 수평좌표

y : 수직좌표

[†] 교신저자(동의대학교 기계공학과, E-mail : ysson@deu.ac.kr, Tel : 051)890-1648)

^{*} 동의대학교 기계공학과

1. 서 론

최근 반도체 기술이 급속하게 발전함에 따라 전자 및 정보통신 장비의 소형화와 고성능화는 부품 당 소모전력의 밀도를 높이고 이에 따른 급격한 열 발생률의 증가를 초래한다. 전자장비는 장시간 신뢰성 있게 작동해야 하므로, 이러한 발열량의 증가는 전자장비의 발전에 가장 큰 걸림돌이 되고 있다. 전자장비 내부에서 발생한 열을 주위 냉각유체로 적절히 방출하여 부품의 온도를 허용온도 이하로 유지시키는 것이 전자장비에서 필수적 과제로 부각되고 있다. 그러므로 전자장비의 효율적인 냉각방법의 개발이 절실히 요구되고 있다.

전자장비의 냉각방법은 열전달 형태와 냉각유체에 따라 전도냉각, 자연대류 냉각, 강제대류 냉각, 액체냉각, 상변화를 이용한 냉각 등으로 분류된다.

전도냉각은 주로 노트북과 같은 소형 컴퓨터와 고발열량의 모듈을 냉각하는데 이용하기 위해 연구되어왔다⁽¹⁾⁻⁽²⁾.

자연대류 냉각은 신뢰도, 간편성 및 경제성 등은 우수하지만 열제거 능력이 타 냉각방법에 비하여 많이 떨어지기 때문에 비교적 작은 발열량의 전자장비에서만 사용된다⁽³⁾. 자연대류 냉각에 대한 기존의 연구를 살펴보면 Bar-Cohen and Rohsenow⁽⁴⁾는 등온조건과 일정 열유속 조건 하에서 완전발달된 유동의 Nusselt 수에 관해 연구하였다. Afrid and Zebib⁽⁵⁾은 단열 수직벽에 발열체가 부착되어 있을 때의 자연대류 열전달을 연구하였는데, 발열체의 크기가 클수록 냉각효과가 향상된다고 주장하였다.

강제대류 냉각은 자연대류 냉각보다는 냉각효과가 우수하지만 냉각팬에서 발생하는 소음, 진동 및 공간적인 제한 등으로 인하여 그 대안이 요구되고 있다. 공기를 냉각유체로 이용하는 강제대류 냉각 연구를 살펴보면 Davalath and Bayazitoglu⁽⁶⁾는 평행 평판 상의 직사각형 발열체 배열을 통과하는 2차원 열전달에 대해 연구하였으며, Young and Vafai⁽⁷⁾는 돌출된 열원을 갖는 채널에서 강제대류의 특성을 실험 및 수치해석을 통해 조사하였다. 그 외 수평채널에서 돌출된 발열체가 있을 때의 복합대류 열전달 특성이 연구되어왔다⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾.

기체를 이용한 강제대류 냉각보다 냉각효과를 높이기 위해 액체를 이용한 냉각에 대한 연구가 수행되었고⁽¹¹⁾, 비등 및 응축을 통해 가장 큰 냉각효과를 얻을 수 있는 상변화를 이용한 냉각에 대해서도 연구가 수행되어왔다⁽¹²⁾⁻⁽¹³⁾.

이상에서 살펴보았듯이 기존의 연구는 각 냉각방법에 대한 연구를 수행하였으나, 주어진 시스템의 형상 및 발열량에서 어느 냉각방법이 더 효과적인 방식인지에 대한 비교 연구는 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 돌출된 발열체가 있는 인쇄회로기판의 상부 및 하부채널에 대류와 전도 열전달을 이용하는 경우, 5가지의 냉각방법을 적용하여 각각의 방법이 전자부품의 열전달 특성에 미치는 영향을 수치해석적으로 비교분석하여 효과적인 냉각방법을 알아보고자 한다.

2. 해 석

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 인쇄회로기판 상에

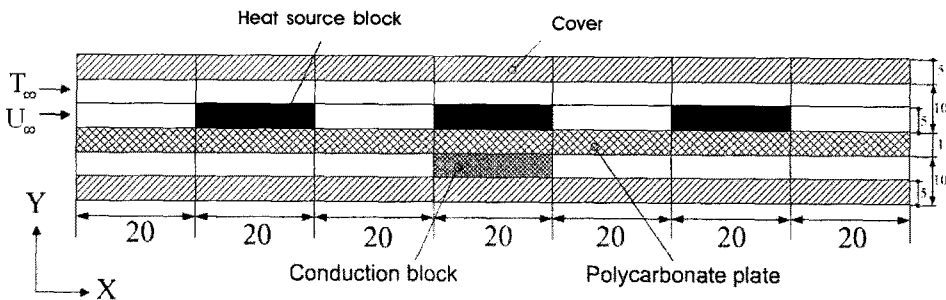


Fig. 1 Geometry and dimensions of the system (unit in mm)

Table 1 Physical properties of materials

	Density (kg/m ³)	Thermal conductivity (W/m·K)	Viscosity (kg/m·s)	Specific heat (J/kg·K)
Cover(acrylic)	1180	0.208	-	1644
Heat source (copper)	8933	401	-	385
Conduction block (aluminum)	2702	237	-	903
PCB (polycarbonate)	1205	0.199	-	1260
Air	1.1614	26.3×10^{-3}	1.846×10^{-5}	1007

3개의 발열체가 배치되어 있는 전형적인 전자부품의 기하학적 형상과 치수를 보여준다. 상부 및 하부 커버로 인하여 인쇄회로기판 상부 및 하부에 채널이 형성되어 있고, 상부채널에는 돌출된 열원이 존재하고 하부채널에는 해석경우에 따라 전도블록이 없는 경우와 있는 경우로 나누어진다. 각 구성요소의 재질과 물성치는 Table 1에 나타내었다.

계산영역 내의 속도 및 온도분포를 구하기 위하여 질량, 운동량 그리고 에너지보존법칙을 적용하였다. 즉, 2차원, 압축성, 가변 물성치의 Navier-Stokes 방정식과 에너지방정식, 2차원 열전도방정식^[14]을 지배방정식으로 사용하였다.

상부채널은 강제대류를 이용하므로 유동장의 입구 및 출구 경계조건으로, 입구에서는 균일한 수평방향속도 u_{∞} 와 주위온도 T_{∞} 를 주었으며 수직방향속도 $v_{\infty}=0$ 이다. 출구에서의 경계조건으로는 $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = 0$ 으로 주어 속도 및 온도의 수평방향 구배를 0으로 하였다.

하부채널에서 경계조건은 냉각방식에 따라 다르다. 하부채널에서 자연대류를 이용하는 경우, 입구 및 출구에서 속도에 대한 경계조건은 $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = 0$, 즉 수평방향 구배를 0으로 주었다. 온도에 대한 경계조건으로는 입구 및 출구에서 계산영역으로 유동이 유입되는 경우에는 균일한 주위온도 T_{∞} 를 주었으며, 계산영역에서 유동이 유출되는 경우에는 $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ 으로 하였다.

하부채널에서 강제대류를 이용하는 경우 입구 및 출구에서의 경계조건은 강제대류를 이용하는 상부채널과 같다.

계산영역 좌우의 입구 및 출구에 있는 고체, 즉, 인쇄회로기판 및 상하부 커버에서의 경계조건으로 속도에 대해서는 $u=v=0$ 을 주었고, 온도에 대해서는 단열조건($\frac{\partial T}{\partial x} = 0$)을 적용하였다. 계산영역 상·하부의 경계조건으로는 상부 및 하부 커버의 바깥 면에 단열조건($\frac{\partial T}{\partial y} = 0$)을 주었다. 계산영역 내 고체와 유체의 경계면에서는 점착조건(no slip condition)을 적용하여 속도를 0으로 두었고, 재질이 다른 고체와 고체, 고체와 유체 경계면에서는 $k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} = k_f \frac{\partial T_f}{\partial n}$ 으로 하여 열유속이 일치하도록 하였다.

이상의 지배방정식 및 경계조건을 적용하여 해를 구하기 위한 수치해석 방법은 유한체적법(finite volume method)^[15]을 사용하였으며, 연속방정식은 SIMPLEX(SIMPLE Corrected)^[16]방법에 따라 압력 및 압력수정방정식을 생성하는데 사용되었다. 격자계는 비엇갈림(nonstaggered) 격자를 사용하며, 이러한 격자계에서 발생할 수 있는 압력진동 현상을 방지하기 위하여 모멘텀보간법(momentum interpolation)을 사용하였다. 차분방정식은 TDMA 알고리즘과 함께 ADI 방법을 사용하여 반복계산으로 해를 구한다. 반복계산 시 종속변수들의 수렴정도를 점검하기 위하여 모든 격

Table 2 Cooling methods in each case

	Upper channel	Lower channel
Case1	Forced convection	Natural convection
Case2	Forced convection	Forced convection
Case3	Forced convection	Natural convection with conduction block
Case4	Forced convection with 2 baffles	Natural convection
Case5	Forced convection with 1 baffle	Natural convection

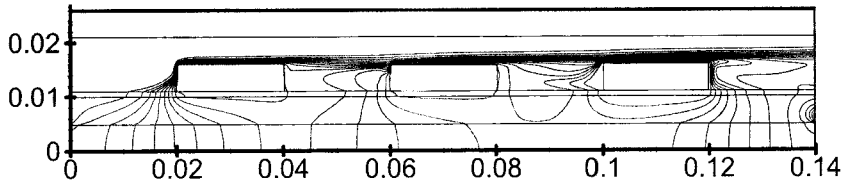


Fig. 2 Dimensionless temperature distribution (Case1: forced conv./natural conv.)

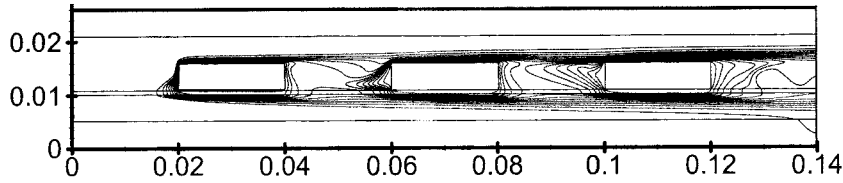


Fig. 3 Dimensionless temperature distribution (Case2: forced conv./forced conv.)

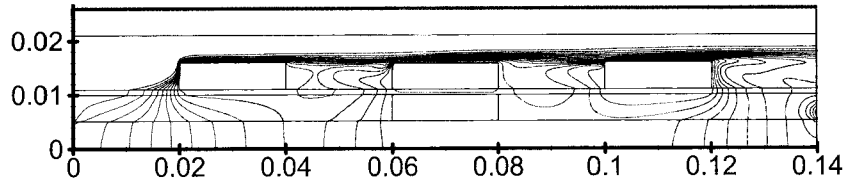


Fig. 4 Dimensionless temperature distribution (Case3: forced conv./conduction block)

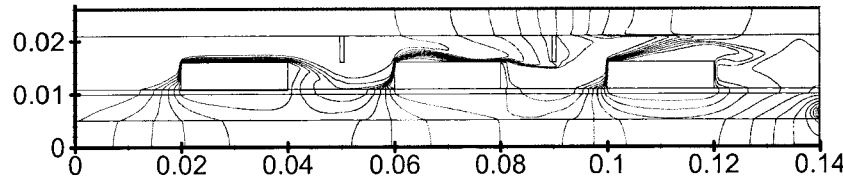


Fig. 5 Dimensionless temperature distribution (Case4: forced conv. with 2 baffles/natural conv.)

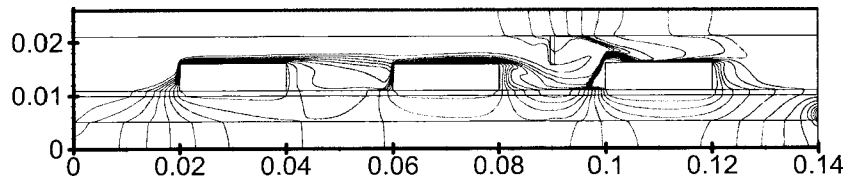


Fig. 6 Dimensionless temperature distribution (Case5: forced conv. with 1 baffle/natural conv.)

자점에서의 잔류량(residual)을 조사하였으며, 모든 방정식에 대한 잔류량이 10^{-4} 이하에 도달하면 수렴된 것으로 간주하였다.

이상의 지배방정식과 경계조건, 그리고 수치해석 방법을 이용하여 상부 및 하부채널에서 냉각유체의 유동 및 대류열전달 특성과 고체상태인 인쇄회로기판, 발열체, 커버의 전도열전달 특성을 해석하였다.

격자수와 시간증분의 변화에 따른 해석결과를 비교하여 계산결과와 격자수 및 시간증분에 대한 의존성을 분석하고, 이를 토대로 적절한 격자수로 350×115 , 시간증분으로 0.05초를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 고려한 5가지의 냉각방법을 Table 2에 정리하였다. 상부채널에는 강제대류를 이용하고, 하부채널에는 자연대류, 강제대류, 전도블록을 이용하는 방식이다. 특히, 상부채널에 강제대류를 이용하면서 열전달 증진을 위해 배플을 2개 및 1개 설치한 경우를 고려함으로써 기존의 강제대류 방식을 개선할 수 있는 가능성을 검토하고자 한다.

모든 경우에서 인쇄회로기판 상에 있는 3개의 돌출된 발열체는 각각 5 W의 균일한 열원을 가진다. 강제대류를 이용하는 경우 상부채널로의 유입속도는 1.2 m/s이며, 상부채널 높이를 기준으로 한 Reynolds수 755에 해당하는 층류유동이다. 각각의 경우 유동장 및 온도장, 그리고 각 발열체의 온도를 구하였다. 해석의 편의를 위하여 무차원온도를 다음과 같이 정의하였다.

$$\theta = \frac{T - T_{\infty}}{Q/k_f} \quad (1)$$

5가지 냉각방법에 대한 무차원 온도장을 Fig. 2 - Fig. 6에 나타내었다. 각 온도장은 최대온도와 최소온도를 포함하는 15개의 등간격인 등온선을 나타낸다. Fig. 2는 Case1에 대한 무차원 온도장을 나타낸다. 하부채널에서는 자연대류에 의한 영향으로 온도가 넓게 분포되고, 상부채널에서는 강제대류에 의한 영향으로 온도가 블록의 상부표면 근처에서 급격히 변화함을 알 수 있다. Fig. 3은

Case2에 대한 무차원 온도장을 나타내며, Case1과 달리 하부채널에서 강제대류를 이용하므로 온도가 인쇄회로기판 밑면 근처에서 급격히 변화하고 인쇄회로기판 밑면에 열경계층이 형성됨을 알 수 있다. 상부채널에서도 강제대류에 의한 영향으로 블록의 상부표면 근처에서 열경계층으로 인해 온도가 급격히 변화함을 알 수 있다.

Fig. 4는 Case3에 대한 결과를 나타낸다. 하부채널에 열전도율이 높은 알루미늄 재질의 전도블록을 사용하므로 전도블록이 없는 Case1과 달리 하부채널에서 전도블록근처의 온도분포는 균일하며 세 번째 블록의 온도가 첫 번째 블록의 온도보다 상대적으로 높으므로 세 번째 블록 하단에 자연대류에 의한 온도층의 분포가 나타나고 있다.

상부채널의 발열체 사이 중간에 배플을 2개 설치한 Case4에 대한 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 배플이 발열체 사이의 유동에 영향을 미치며, 발열블록 상부면에서의 열경계층 두께는 블록 표면을 따라 증가하다가 배플에 의해 유동방향이 블록 측면방향으로 바뀌어 따라 열경계층의 두께가 감소함을 알 수 있다. 배플 수에 따른 냉각효과를 보기 위해 Case5에서는 두 번째와 세 번째 발열체 사이에 1개의 배플만 설치하였으며, 이에 대한 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 2개의 배플을 설치한 Case4와 비교하여 보면, 두 번째 블록 및 세 번째 블록 주위의 열경계층이 변화함을 알 수 있다.

본 연구에서 고려한 5가지의 각기 다른 냉각방법이 냉각특성에 미치는 영향과 효과적인 냉각방식을

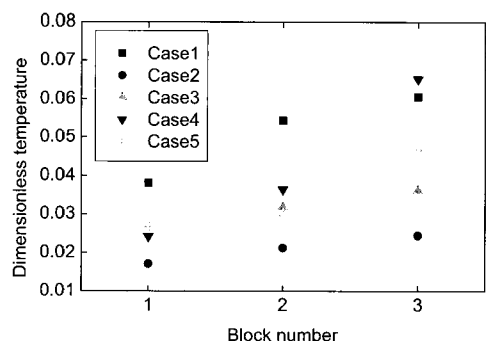


Fig. 7 Dimensionless temperature of the block for each case

알아보기 위해, Case1부터 Case5까지의 각 경우에 대해 발열블록의 무차원온도를 Fig. 7에 함께 나타내었다.

고려한 5가지의 냉각방식에서 각 발열블록의 온도변화 경향은 비슷하게 나타났다. 상부채널의 강제대류에 의한 영향으로 첫 번째 블록에서 열전달이 가장 잘 일어나 온도가 가장 낮고, 두 번째 및 세 번째 블록이 이보다 조금씩 높아짐을 알 수 있다. 하부채널에도 강제대류를 이용하는 Case2는 하부채널에 자연대류를 이용하는 Case1의 경우보다 블록의 온도가 저하함을 볼 수 있으며, 이는 하부채널에서 냉각유체에 의한 강제대류로 열전달량이 증대되기 때문이다.

Case3은 하부채널에 열전도율이 높은 알루미늄 재질의 전도블록을 사용한 것으로, 알루미늄 전도체에 의한 열전달로 인해 냉각효과가 증가하여 발열블록의 온도가 낮아진 것을 알 수 있다. 또한 하부채널의 전도블록에 의해 열전달이 활발하게 이루어지기 때문에, 각 발열블록에 도달한 상부채널의 유체온도가 Case1보다 낮아서 대류열전달이 증가한 것으로 판단된다.

Case4는 상부채널의 발열블록 중간에 배플을 2개 설치한 경우를 나타낸다. 상부채널에 배플이 없는 Case1과 비교하여 보면, 배플 설치에 따른 유동방향의 변화와 그에 따른 대류열전달 증가의 영향으로 첫 번째 블록과 두 번째 블록의 온도가 저하된 것을 볼 수 있다. 그러나 세 번째 블록에서는 첫 번째와 두 번째 블록에서의 열전달량이 증가하여 이미 온도가 상승한 냉각유체와 접하기 때문에 블록 온도가 급격히 상승한다. 그러므로 상부채널에 2개의 배플을 설치함으로써 첫 번째와 두 번째 블록에서는 냉각효과의 증대를 가져올 수 있으나 세 번째 블록에서는 오히려 냉각효과가 감소할 수도 있다는 것을 알 수 있다. 즉, Case4의 경우 상류 측 2개의 발열블록에서는 현격한 냉각성능의 증대를 볼 수 있으나, 배플 설치에 따른 하류에서의 압력강화로 인한 속도 감소와 상류 측에서의 대류 열전달 증가로 인한 하류 측 냉각유체의 온도상승은 오히려 하류 측 블록의 냉각성능을 저하시키는 결과를 가져온다.

Case5에서는 배플 수에 따른 냉각특성을 고찰하기 위해 두 번째와 세 번째 발열블록 사이에 1개의 배플만 설치하였다. 첫 번째와 두 번째 발열블록 사이의 배플을 제거함으로써 첫 번째 발열블록의 온도는 Case4보다 다소 상승하였으나, 두 번째와 세 번째 발열블록의 온도는 Case4보다 저하함을 알 수 있다. 특히 상류 측 배플 1개를 제거함으로써 Case4의 문제점인 세 번째 발열블록의 온도가 급격하게 상승하는 것을 방지할 수 있다.

이상에서 고려한 5가지 냉각방식을 서로 비교하여 보면, 하부채널에 강제대류를 이용하는 Case2의 경우가 최대의 냉각성능을 보여주며 하부채널에 자연대류만을 이용하는 Case1의 냉각성능이 가장 낮음을 알 수 있다. 상부채널에 강제대류를 이용하고 하부채널에 자연대류만을 이용하는 Case1을 기준으로 냉각성능을 향상시킬 수 있는 방안으로 Case3 - Case5를 검토하였다. 하부에 전도블록을 설치한 경우인 Case3의 경우 전체적으로 발열블록의 온도가 저하하므로, 하부채널에 높은 열전도율을 갖는 전도블록을 설치할 수 있으면 전체적인 냉각성능이 상당히 향상될 수 있음을 알 수 있다.

상부채널에 2개의 배플을 설치한 경우인 Case4의 경우 첫 번째와 두 번째 발열블록에서는 상당한 냉각효과를 가져올 수 있으나, 하류 측에 있는 세 번째 발열블록에서는 온도상승이 나타나 오히려 냉각효과가 감소함을 알 수 있다. 상부채널에 하류 측 1개의 배플만 설치한 경우인 Case5의 경우 3개의 발열블록 모두에서 상당한 냉각효과의 증대를 가져올 수 있으며, 특히 2개의 배플을 설치한 Case4의 문제점인 세 번째 발열블록의 온도가 급격하게 상승하는 것을 방지할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 수평채널 내 일정한 열발생을 갖는 돌출된 발열체가 있는 전형적인 전자부품 형상에서, 전자부품의 냉각을 위해 5가지의 다양한 냉각방법을 적용하고 각 방법에 따른 냉각성능을 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동일한 기하학적 구조와 열원을 갖고 배플을

설치하지 않은 경우, 자연대류보다는 강제대류를 이용하는 것이 냉각성능이 더 우수하다는 것을 확인하였고, 발열체 하단 면에 높은 열전도율을 갖는 전도블록을 설치할 경우 전체적인 냉각성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 그러므로 하부채널에 강제대류를 이용할 수 없는 형태의 기하학적 구조를 가진 전자장비의 경우 전도블록을 설치하면 상당한 냉각성능의 향상을 볼 수 있다.

(2) 상부채널에서 공기에 의한 강제대류를 이용하는 경우, 발열체 중간에 배플을 설치하여 냉각유체의 흐름을 열원 쪽으로 유도하면 전체적으로 상당한 냉각효과와 상승을 볼 수 있었다.

(3) 발열체 사이에 2개의 배플을 설치한 경우보다 하류 측에 1개의 배플만 설치한 경우, 하류 측 발열체의 냉각성능이 더 우수하였고 전반적인 냉각성능도 더 우수하게 나타났다. 그러므로 냉각성능 향상을 위해 배플을 설치할 때 배플 수 및 위치의 선정이 매우 중요한 설계변수임을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2007학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(과제번호:2007AA167).

참고문헌

- [1] H. Xie, M. Aghazadeh, W. Lui, and K. Haley, "Thermal Solutions to Pentium Processors in TCP in Notebooks and Sub-Notebooks", IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, Vol. 19, No. 1, pp. 54-65, 1996.
- [2] W. Nakayama, "Recent Japanese Thermal Solutions for Portable Computers", Electronics Cooling Online, 1998.
- [3] W. Aung, Cooling Techniques for Computers, Hemisphere Publishing Corporation, 1991.
- [4] A. Bar-Cohen and W. M. Rohsenow, "Thermally Optimum Spacing of Vertical Natural Convection Cooled Parallel Plates", Journal of Heat Transfer, Vol. 106, pp. 116-123, 1984.
- [5] M. Afrid and A. Zebib, "Natural Convection Air Cooling of Heated Components Mounted on a Vertical Wall", Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 15, pp. 243-259, 1989.
- [6] J. Davalath and Y. Bayazitoglu, "Forced Convection Cooling across Rectangular Blocks", Journal of Heat Transfer, Vol. 109, pp. 321-328, 1987.
- [7] T. J. Young and K. Vafai, "Experimental and Numerical Investigation of Forced Convective Characteristics of Arrays of Channel Mounted Obstacles", Journal of Heat Transfer, Vol. 121, pp. 34-42, 1999.
- [8] T. C. Hung and C. S. Fu, "Conjugate Heat Transfer Analysis for the Passive Enhancement of Electronic Cooling through Geometric Modification in a Mixed Convection Domain", Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 35, pp. 519-535, 1999.
- [9] A. Dogan, M. Sivrioglu, and S. Baskaya, "Investigation of Mixed Convection Heat Transfer in a Horizontal Channel with Discrete Heat Sources at the Top and at the Bottom", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, pp. 2652-2662, 2006.
- [10] M. M. Mohamed, "Air Cooling Characteristics of a Uniform Square Modules Array for Electronic Device Heat Sink", Applied Thermal Engineering, Vol. 26, pp. 486-493, 2006.

[11] H. Bhowmik, C. P. Tso, K. W. Tou, and F. L. Tan, "Convection Heat Transfer from Discrete Heat Sources in a Liquid Cooled Rectangular Channel", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, pp. 2532-2542, 2005.

[12] K. A. Park and A. E. Bergles, "Boiling Heat Transfer Characteristics of Simulated Microelectronic Chips with Detachable Heat Sinks", *Heat Transfer in Electronic Equipment*, ASME-HTD, Vol. 57, pp. 95-102, 1986.

[13] A. G. Agwu Nnanna, "Application of Refrigeration System in Electronics Cooling", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, pp. 18-27, 2006.

[14] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed., John Wiley & Sons Inc., New York, 2007.

[15] S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

[16] J. P. Van Doormaal and G. D. Raithby, "Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows", *Numerical Heat Transfer*, Vol. 7, pp. 147-163, 1984.

저 자 소 개



손영석 (孫永洙)

1960년 5월생. 1983년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학사), 1986년 연세대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1994년 미국 The University of Texas at Austin 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 1986-1990년 한국원자력연구소 연구원, 1994-1997년 한국원자력연구소 선임연구원, 1997-현재 동의대학교 기계공학과 교수.



신지영 (申智榮)

1967년 7월생. 1990년 서울대학교 기계공학과 졸업(공학사), 1992년 동대학원 졸업(공학석사), 1996년 동대학원 졸업(공학박사), 1996-1998년 현대엔지니어링 주식회사, 1998-1999년 서울대학교 정밀기계설계공동연구소, 1999-현재 동의대학교 기계공학과 부교수.