

돌출된 열원이 있는 채널에서 대류와 전도열전달을 이용한 냉각특성

손 영 석[†], 신 지 영

동의대학교 기계·산업시스템공학부 기계공학전공

Cooling Characteristics of a Parallel Channel with Protruding Heat Sources Using Convection and Conduction Heat Transfer

Young-Seok Son[†], Jee-Young Shin

Division of Mechanical & Industrial System Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

(Received April 24, 2002; revision received September 12, 2002)

ABSTRACT: Cooling characteristics of a parallel channel with protruding heat sources using convection and conduction heat transfer are studied numerically. A two-dimensional model has been developed for numerical prediction of transient, compressible, viscous, laminar flow, and conjugate heat transfer between parallel plates with uniform block heat sources. The finite volume method is used to solve the problem. The assembly consists of two channels formed by two covers and one printed circuit board which has three uniform heat source blocks. Six different cooling methods are considered to find out the most efficient cooling method in a given geometry and heat sources. The velocity and temperature fields of cooling medium, the temperature distribution along the block surface, and the maximum temperature in each block are obtained. The results are compared to examine the cooling characteristics of the different cooling methods.

Key words: Cooling characteristics(냉각특성), Parallel channel(수평채널), Protruding heat source(돌출 열원), Numerical analysis(수치해석)

기 호 설 명

H : 높이 [m]
 k : 열전도율 [W/m·K]
 L : 길이 [m]
 n : 법선좌표
 Q : 단위 길이당 발열량 [W/m]
 T : 온도 [K]

t : 시간 [s]
 u : 수평방향 속도 [m/s]
 v : 수직방향 속도 [m/s]
 x : 수평좌표
 y : 수직좌표

그리스 문자

θ : 무차원온도

[†] Corresponding author

Tel.: +82-51-890-1648; fax: +82-51-890-2232

E-mail address: ysson@dongeui.ac.kr

하첨자

f : 유체

LC : 하부채널
 PCB : 인쇄회로기판
 s : 고체
 UC : 상부채널
 ∞ : 주위

1. 서 론

정보통신 및 전자산업 전 분야에 걸친 시스템의 소형화와 고성능화로 인해, 부품당 소모전력의 밀도가 높아지며 이에 따라 발열량이 급격히 증가하고 있다. 전자장비 내부에서 발생된 열이 주위 냉각유체로 적절히 방출되지 못하면, 장비 내부의 온도상승을 유발해 전자부품의 원활한 작동과 성능이 유지될 수 없기 때문에 효율적인 냉각방법의 개발이 요구된다.⁽¹⁾ 특히, 단위면적당 발열량이 급격히 증가하고 있기 때문에, 제품의 허용온도를 유지하는 등, 전자장비의 안정적인 작동을 위한 신뢰성을 확보하는 것이 중요하며, 기존의 냉각방법을 개선하는 차원에서 벗어나 다양한 냉각기술의 개발이 활발히 이루어지고 있다.

전자장비의 냉각기술은 열전달 형태와 냉각유체에 따라 다음과 같이 분류될 수 있다.⁽²⁾ 전도냉각은 노트북 내의 열의 소산 및 냉각을 위해 전도 블록 및 TCP(tape carrier package)와 같은 전도체를 이용한 경우와, 고발열량의 CPU 및 멀티칩 모듈을 냉각하기 위한 TCM(thermal conduction module)을 들 수 있다.^(3,4) 자연대류냉각은 온도차로 인한 유체 내부의 밀도차에 의해 발생하는 자연대류 유동을 이용하며, 발열량이 낮은 저용량 전자장비에서 주로 이용된다.⁽⁵⁾ 강제대류냉각은 자연대류냉각의 한계인 저용량 전자장비 이상의 발열량일 경우 이용되는 냉각방식이다.⁽⁶⁾ 액체냉각은 기체보다 비열이 큰 액체를 냉각유체로 사용하여 열전달률을 증대시킨 것이다. 액체냉각은 전자부품과 냉각유체가 직접 접촉하는 직접액체냉각과 전자부품이 냉각유체와 분리되어 있는 간접액체냉각으로 나눌 수 있다.⁽²⁾ 상변화를 이용한 냉각은 비등 및 응축과정을 통한 잠열의 효과를 이용하는 냉각방식이며, 가장 큰 냉각효과를 기대할 수 있다.⁽⁷⁾

기존의 연구들은 전술한 각각의 냉각방식에 대해 연구를 수행하였으나, 주어진 시스템의 형상 및 발열량에서 어느 방법이 더 효과적인 냉각방

식인지에 대한 비교 연구는 이루어지지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 돌출된 열원이 있는 인쇄회로기판을 중심으로 상부 및 하부채널에 대류와 전도열전달을 이용하는 경우, 각각의 방식이 전자부품의 냉각특성에 미치는 영향을 비교·분석하여 효과적인 냉각방식을 알아보고자 한다. 이를 위해 고려한 냉각방법은 상부채널에서는 강제대류를 이용하고, 하부채널에서는 자연대류, 강제대류, 액체냉각, 전도블록을 이용하는 방식이다. 특히, 상부채널에 강제대류를 이용하면서 열전달 증진을 위해 배플을 2개 및 1개 설치한 경우를 고려함으로써 기존의 강제대류방식을 개선할 수 있는 가능성을 검토하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

본 연구에서 해석하고자 하는 전형적인 전자부품의 형상은 인쇄회로기판 상에 3개의 발열체가 배치되어 있으며, 상부 및 하부 커버로 인하여 인쇄회로기판 상부 및 하부에 채널이 형성되어 있는 모델이다. 상부채널에는 돌출된 열원이 존재하고 하부채널에는 해석경우에 따라 전도블록이 없는 경우와 있는 경우로 나누어진다. 이관수와 박철균⁽⁸⁾은 돌출된 열원의 형상과 위치 등이 유동 및 열전달 특성에 미치는 영향을 수치적으로 해석하여 최적화한 결과를 제시하였으며, 이 결과를 바탕으로 본 해석모델의 기하학적 형상과 치수를 $H_{UC}/H_{chip}=2$, $H_{UC}/H_{LC}=2$, $H_{UC}/H_{PCB}=10$, $H_{UC}/H_{cover}=20$, $H_{UC}/L_{chip}=1$, $L_{in}=L_{out}=L_s=L_{Alb}=L_{chip}=H_{UC}$ 라는 값을 선정하였다. 하부채널에 전도블록이 있는 모델의 기하학적 형상과 치수를 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 지배방정식 및 경계조건

상부 및 하부채널에서 냉각유체의 유동 및 대류열전달 특성과 고체상태인 인쇄회로기판, 발열체, 커버의 전도열전달 특성을 해석하였다. 계산영역 내의 속도 및 온도분포를 구하기 위하여 질량, 운동량, 그리고 에너지보존법칙을 적용하였다. 즉, 2차원, 과도상태, 압축성, 가변 물성치의 Navier-Stokes 방정식과 에너지방정식, 2차원 과

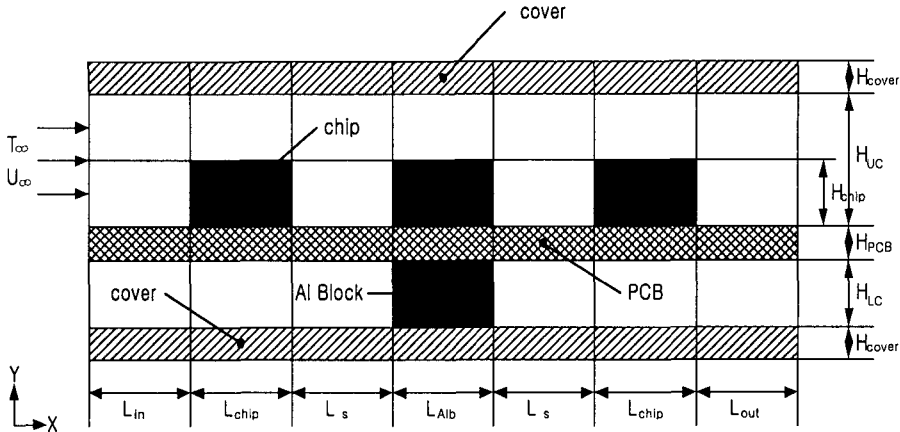


Fig. 1 Coordinate system and geometry.

도 열전도방정식⁽⁹⁾을 계산영역에 적용하였다.

상부채널은 강제대류를 이용하므로 유동장의 입구 및 출구 경계조건으로, 입구에서는 균일한 수평방향 속도 u_∞ 와 주위온도 T_∞ 를 주었으며 수직방향 속도 $v_\infty=0$ 이다. 출구에서의 경계조건으로는 $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = 0$ ⁽¹⁰⁾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 입·출구에서 계산영역으로 유동이 유입되는 경우에는 균일한 주위온도 T_∞ 를 주었으며, 계산영역에서 유동이 유출되는 경우에는 $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ 으로 하였다. 하부채널에서 강제대류 및 액체냉각을 이용하는 경우 입구 및 출구에서의 경계조건은 강제대류를 이용하는 상부채널과 같다.

계산영역 좌우의 입구 및 출구에 있는 고체, 즉 인쇄회로기판 및 상·하부 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 0

으로 두었고, 재질이 다른 고체와 고체, 고체와 유체경계면에서는 $k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} = k_f \frac{\partial T_f}{\partial n}$ 으로 하여 열유속이 일치하도록 하였다.

2.3 수치해석 방법

이상의 지배방정식 및 경계조건을 적용하여 수치해석적으로 해를 구하기 위하여 유한체적법(finite volume method)⁽¹¹⁾을 사용하였으며, 연속방정식은 SIMPLEC(SIMPLE Corrected)⁽¹²⁾ 방법에 따라 압력 및 압력수정방정식을 생성하는 데 사용된다. 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. 반복계산시 종속변수들의 수렴 정도를 점검하기 위하여 모든 격자점에서의 잔류량(residual)을 조사하였으며, 모든 방정식에 대한 잔류량이 10^{-4} 이하에 도달하면 수렴된 것으로 간주하였다.

본 수치계산에서는 수렴된 해를 구하기 위하여 각 계산당 $t=4000 \sim 8000$ 초 정도의 계산이 필요하였으며, Pentium III PC에서 약 40~80시간의 계산시간이 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에 사용한 코드의 타당성을 검증하기

위해, 3개의 돌출 열원이 있는 수평채널에서 강제대류를 이용한 냉각에 대한 수치해석 결과인 Davalath and Bayazitoglu⁽¹³⁾의 연구결과와 비교하였다. Reynolds 수는 750인 층류유동이며 블록간의 거리의 비가 0.5일 때 유동장과 무차원온도장, 그리고 블록의 무차원 표면온도를 비교하였다. 유동장 및 온도장을 비교하여 보면 전체적인 유동분포 및 온도분포가 동일함을 확인할 수 있었다. 블록 표면의 무차원온도도 거의 비슷한 분포를 보임을 확인하였으며, 최대오차는 약 5%였다. 이를 통해 본 연구에서 개발한 코드가 유체 유동 및 온도뿐만 아니라 발열블록의 온도도 타당하게 예측함을 알 수 있었다.

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

본 연구에서는 주로 대류와 전도열전달을 이용하는 경우, 각각의 방식이 냉각특성에 미치는 영향과 효과적인 냉각방식을 알아보고자 한다. 이를 위해 고려한 냉각방법을 Table 1에 정리하였으며, 6가지 경우에 대하여 냉각특성을 해석하고 각 방법에 따른 냉각성능을 비교하였다.

Case 1부터 case 6까지 모든 경우에서 인쇄회로기판상에 있는 3개의 돌출블록은 각각 5W의 균일한 열원을 가진다. 강제대류를 이용하는 경우 유입속도는 0.794 m/s이며 이는 Reynolds 수 1000에 해당하는 층류유동이다. 각각의 경우 유동장 및 온도장, 3개의 발열블록 표면을 따라 표면에서의 온도, 그리고 발열체인 각 블록에서의 최대 온도를 구하였다. 해석의 편의를 위하여 무차원 온도를 다음과 같이 정의하였다.

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

Table 1 Cooling methods in each case

	Upper channel	Lower channel
Case 1	Forced convection	Natural convection
Case 2	Forced convection	Forced convection
Case 3	Forced convection	Liquid cooling
Case 4	Forced convection	Conduction block
Case 5	Forced convection with 2 baffles	Natural convection
Case 6	Forced convection with 1 baffle	Natural convection

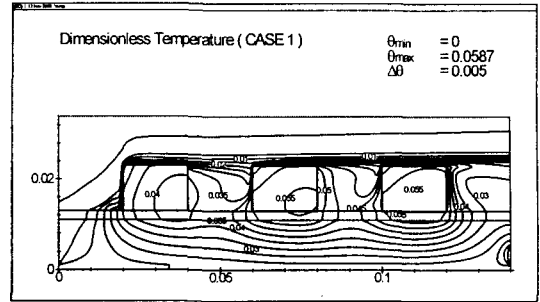


Fig. 2 Dimensionless temperature distribution (case 1: forced conv./natural conv.).

Figs. 2~7에 각 경우에 대한 무차원온도장을 나타내었다. Fig. 2는 case 1에 대한 무차원온도장을 나타낸다. 하부채널에서는 자연대류에 의한 영향으로 온도가 넓게 분포되고, 상부채널에서는 강제대류에 의한 영향으로 온도가 블록의 상부 표면 근처에서 급격히 변화함을 알 수 있다. 각 블록의 전체적인 온도는 첫번째 블록이 열전달이 가장 잘 일어나 가장 낮고, 두번째 및 세번째 블록이 이보다 조금씩 높아진다.

Fig. 3은 case 2에 대한 무차원온도장을 나타내며 case 1과 달리 하부채널에서 강제대류를 이용하므로 인쇄회로기판 밑면에 열경계층이 형성되어 온도가 인쇄회로기판 밑면 근처에서 급격히 변화한다. 상부채널에서도 강제대류에 의한 영향으로 블록의 상부 표면 근처에서 열경계층으로 인해 온도가 급격히 변화함을 알 수 있다. 각 블록의 전체적인 온도는 case 1과 마찬가지로 첫번째 블록에서 열전달이 가장 잘 일어나 온도가 가장 낮고, 두번째 및 세번째 블록이 이보다 조금씩 높아짐을 알 수 있다. 하부채널에도 강제대류를 이용하는 case 2는 하부채널에 자연대류를 이

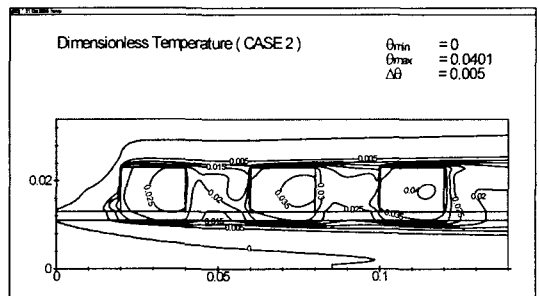


Fig. 3 Dimensionless temperature distribution (case 2: forced conv./forced conv.).

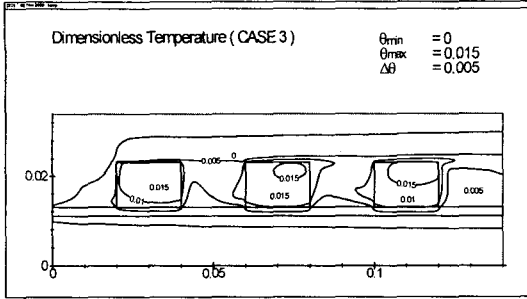


Fig. 4 Dimensionless temperature distribution (case 3: forced conv./liquid cooling).

용하는 case 1의 경우보다 내부의 온도가 저하함을 볼 수 있으며, 이는 하부채널에서 냉각유체에 의한 강제대류로 열전달량이 증대되기 때문이다.

Case 3에 대한 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 하부채널에 냉각유체로 액체인 물을 사용하며, 고전도체의 관 내부를 유동하도록 하여 인쇄회로기판과 접촉하지 않도록 하였다. 공기를 사용하는 case 2와 달리 하부채널에서 인쇄회로기판 밑면 근처에서의 급격한 온도변화는 보이지 않으며, 전체 영역의 온도도 상당히 낮다는 것을 알 수 있다. 따라서, 기체보다 액체를 냉각유체로 사용하는 것이 냉각성능이 더 우수하다는 사실을 확인할 수 있다. 각 블록의 전체적인 온도는 거의 비슷한 형태를 지니며 이는 상부채널에서의 공기에 의한 강제대류의 효과보다 하부채널에서의 액체 냉각에 의해 냉각특성이 좌우된다는 사실을 보여 준다.

Fig. 5는 case 4에 대한 결과를 나타낸다. 하부채널에 열전도율이 높은 알루미늄 재질의 전도블

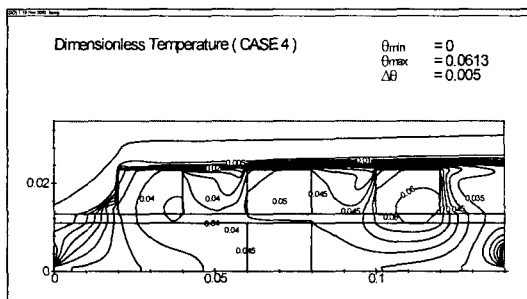


Fig. 5 Dimensionless temperature distribution (case 4: forced conv./conduction block).

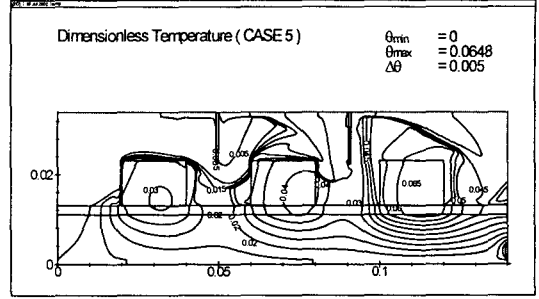


Fig. 6 Dimensionless temperature distribution (case 5: forced conv. with 2 baffles/natural conv.).

록을 사용하므로 전도블록이 없는 case 1과 달리 하부채널에서 전도블록 근처의 온도분포는 균일하며, 첫번째 블록과 세번째 블록 하단에서 자연대류에 의한 온도층이 형성되는 것을 볼 수 있다. 특히 세번째 블록의 온도가 첫번째 블록의 온도보다 상대적으로 높으므로 자연대류에 의한 온도층의 분포가 더욱 잘 나타나고 있다.

Case 5에 대한 결과는 Fig. 6에 나타내었다. Case 1과 달리 상부채널의 발열체 사이 중간에 배플을 2개 설치하였다. 발열블록 상부면에서의 열경계층 두께는 블록 표면을 따라 증가하다가 배플에 의해 유동방향이 블록 측면방향으로 바뀌에 따라 열경계층의 두께가 감소하며, 두번째 블록에서도 이와 유사한 현상을 보이고 있다. 상부채널에 배플이 없는 case 1과 비교하여 보면, 배플 설치에 따른 유동방향 변화의 영향으로 첫번째 블록과 두번째 블록 온도의 저하를 볼 수 있다. 그러나 세번째 블록에서는 첫번째와 두번째 블록에서의 열전달량이 증가하여 이미 온도가 상

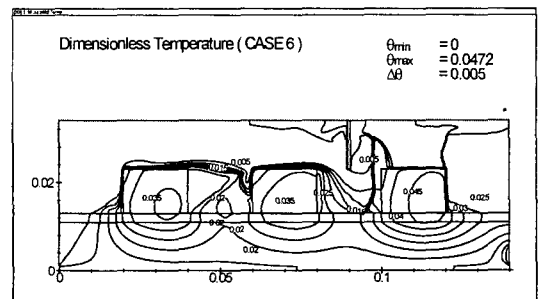


Fig. 7 Dimensionless temperature distribution (case 6: forced conv. with 1 baffle/natural conv.).

승한 냉각유체와 접하기 때문에 블록온도가 급격히 상승한다. 그러므로, 상부채널에 2개의 배플을 설치함으로써 첫번째와 두번째 블록에서는 냉각효과의 증대를 가져올 수 있으나 세번째 블록에서는 오히려 냉각효과가 감소할 수도 있다는 것을 알 수 있다.

배플 수에 따른 냉각효과를 보기 위해 case 6에서는 두번째와 세번째 발열체 사이에 1개의 배플만 설치하였으며, 이에 대한 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 2개의 배플을 설치한 case 5와 비교하여 보면, 첫번째 및 두번째 블록의 온도는 비슷하게 유지하면서도 세번째 블록의 온도가 저하되는 것을 알 수 있다.

이상의 연구결과에서 알아 본 6가지의 각기 다른 냉각방법에서 각 경우의 냉각특성에 미치는 영향과 효과적인 냉각방식을 알아보기 위해 case 1부터 case 6까지의 각 경우에 대해 블록 표면에서의 무차원온도와 각 블록에서의 최대온도를 비교하여 각 경우의 냉각성능을 비교 분석하였다. 블록표면의 무차원온도는 블록의 표면을 따라서 좌측 하단부터 우측 하단까지를 각 블록당 나타낸 것이다. 즉, 첫번째 블록부터 블록의 좌측 표면을 따라 하단에서 상단까지, 상부 표면을 따라 좌측에서 우측까지, 그리고 우측 표면을 따라 상단에서 하단까지를 첫번째, 두번째, 세번째 블록의 순으로 나타내었으며, 블록 사이에 존재하는 간격에서의 온도는 나타내지 않고 3개의 블록 표면온도만 연속적으로 나타내었다.

Fig. 8에 나타나 있듯이 냉각성능은 case 3(상부강제대류/하부액체냉각)의 경우가 가장 좋으며, case 1(상부강제대류/하부자연대류)은 가장 나쁘게

나타남을 알 수 있다. Case 4(상부강제대류/하부전도블록)의 경우 전도블록을 설치한 두번째 블록의 온도가 낮아졌으므로, 전도블록의 설치에 따른 냉각성능 증대시 유리하다는 사실을 알 수 있다. 즉, 발열량이 각기 다른 발열체가 존재할 경우 고발열량 블록 하부에 전도블록을 설치하는 것이 효과적인 냉각방법이 될 수 있다. 또한 case 3의 경우 블록의 표면온도가 거의 비슷하게 나타나며, 이는 시스템 전체를 고려한 냉각일 경우 유리하다는 것을 보여준다. Case 5(상부 배플 2개 설치 강제대류/하부자연대류)의 경우 상류측 2개의 발열블록에서는 현격한 냉각성능의 증대를 볼 수 있으나, 배플 설치에 따른 하류에서의 압력강화로 인한 속도감소와 상류측에서의 대류열 전달 증가로 인한 하류측 냉각유체의 온도상승은 오히려 하류측 블록의 냉각성능을 저하시키는 결과를 가져온다. Case 6(상부 배플 1개 설치 강제대류/하부자연대류)의 경우 상류측 배플 1개를 제거함으로써 case 5의 문제점인 하류측 발열블록의 온도상승을 방지할 수 있다.

Fig. 9는 6가지 냉각방법에서 각 블록당의 최대온도를 나타낸 것이다. 하부에 액체냉각을 이용하는 case 3의 경우가 최대의 냉각성능을 보여주며, 다음으로는 하부에 공기로 강제대류를 이용하는 case 2가 냉각성능이 비교적 우수하며, 하부에 자연대류만을 이용하는 case 1의 냉각성능이 가장 낮음을 알 수 있다.

상부에 강제대류를 이용하고 하부에 자연대류를 이용하는 case 1을 기준으로 냉각성능을 향상시킬 수 있는 방안으로 case 4~case 6을 검토하였다. 하부에 전도블록을 이용한 경우인 case 4의

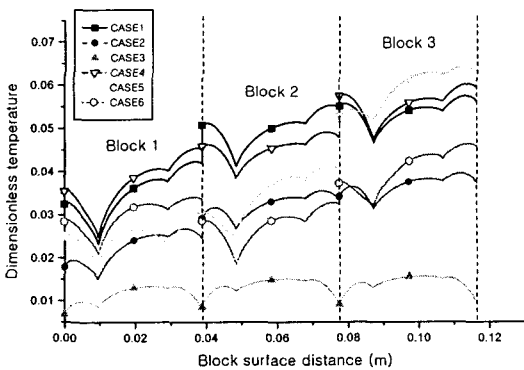


Fig. 8 Dimensionless temperature along block surface for each case.

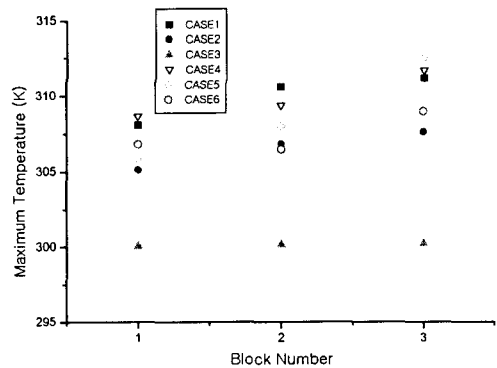


Fig. 9 Maximum temperature at each block for each case.

경우 전도블록을 설치한 두번째 발열블록에서만 온도의 저하를 볼 수 있고, 그의 발열블록에서는 전도블록이 하부에서의 자연대류 열전달을 방해하므로 오히려 약간 상승하였다. 상부채널에 2개의 배플을 설치한 경우인 case 5의 경우 첫번째와 두번째 발열블록에서는 상당한 냉각효과를 가져올 수 있으나, 하류측에 있는 세번째 발열블록에서는 온도상승이 나타나 오히려 냉각효과가 감소함을 알 수 있다. 상부채널에서 하류측 1개의 배플만 설치한 경우인 case 6의 경우 첫번째 발열블록에서 약간의 냉각효과를 가져올 수 있으며, 두번째 및 세번째 발열블록에서는 상당한 냉각효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 전형적인 전자부품 형상인 일정 열발생을 갖는 돌출된 열원이 있는 수평채널에서, 전자부품의 냉각을 위해 전도와 대류를 이용한 다양한 냉각방법을 적용하고 이를 비교 분석하였다. 이를 위해 6가지 경우에 대하여 각각 해석을 수행하여 냉각특성을 조사하고 각 방법에 따른 냉각성능을 비교 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동일한 기하학적 구조와 열원일 경우 잘 알려진 바와 같이 자연대류보다는 강제대류의 냉각성능이 더 양호하며, 냉각유체의 경우 기체보다는 물과 같은 액체의 냉각성능이 더 양호함을 보였다. 그러므로, 전자부품의 발열량에 따라서 발열량을 효과적으로 소산시킬 수 있는 냉각유체의 공급형태와 냉각유체의 선택이 필요하다는 것을 알 수 있다. 하부채널에서의 액체냉각이 전체적인 냉각특성을 좌우하며 각 블록의 온도가 거의 비슷하게 나타나므로, 시스템 전체를 고려한 냉각일 경우 가장 효과적인 냉각방법이다.

(2) 발열체 하단면에 전도블록을 설치할 경우 해당 발열체의 냉각성능 향상을 기대할 수 있으므로, 하부채널에 강제대류가 적합하지 않은 형태의 기하학적 구조를 가진 전자장비의 경우 고 발열량의 칩에서 효과적으로 열을 소산시킬 수 있다. 그러나 다른 발열체에서 약간의 온도상승을 수반할 수 있으므로 열전달 성능예측에 의한 안정적인 작동온도 보장이 필수적이다.

(3) 상부채널에서 공기에 의한 강제대류를 이

용하는 경우 열원 중간에 배플을 설치함으로써 냉각유체의 흐름을 열원 쪽으로 유도하여 국부적인 냉각효과와 상승을 볼 수 있었다. 또한 발열체 사이에 2개의 배플을 설치한 경우와 하류측 1개의 배플만 설치한 경우가 전반적으로 상이한 냉각성능을 나타냄을 알 수 있었다. 특히, 상류측에서의 활발한 열전달이 냉각유체의 온도상승으로 이어지고 이로 인해 하류측 발열체의 온도가 과도하게 상승할 수도 있기 때문에, 배플 수 및 위치의 선정이 매우 중요한 설계변수임을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2001년도 동의대학교 자체 학술연구 조성비의 지원을 받아 작성되었음.

참고문헌

1. Oktay, S., Hannemann, R. and Bar-Cohen, A., 1986, High Heat from a Small Package, *Mechanical Engineering*, Vol. 108, No. 3, pp. 36-42.
2. Incropera, F. P., 1988, Convection Heat Transfer in Electronic Equipment Cooling, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 1097-1111.
3. Nakayama, W., 1998, Recent Japanese Thermal Solutions for Portable Computers, *Electronics Cooling Online*.
4. Xie, H., Aghazadeh, M., Lui, W. and Haley, K., 1996, 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.
5. Bar-Cohen, A. and Rohsenow, W. M., 1984, Thermally Optimum Spacing of Vertical Natural Convection Cooled Parallel Plates, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 116-123.
6. Aung, W., 1991, *Cooling Techniques for Computers*, Hemisphere Publishing Corporation.
7. Park, K. A. and Bergles, A. E., 1986, Boiling Heat Transfer Characteristics of Simulated Microelectronic Chips with Detachable Heat

- Sinks, Heat Transfer in Electronic Equipment, ASME-HTD, Vol. 57, Bar-Cohen ed., pp. 95-102.
8. Lee, K. S. and Park, C. G., 1998, Analysis of Laminar Forced Convection for Optimal Design of Parallel Plates with Protrusions, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 126-136.
 9. Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 1996, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th ed., John Wiley & Sons Inc., New York.
 10. Behnia, M. and Dehghan, A. A., 1998, Natural Convection Cooling of Multiple Heat Sources in Parallel Open-Top Cavities Filled with a Fluorinert Liquid, Journal of Electronic Packaging, Vol. 120, pp. 73-81.
 11. Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation.
 12. Van Doormaal, J. P. and Raithby, G. D., 1984, Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows, Numerical Heat Transfer, Vol. 7, pp. 147-163.
 13. Davalath, J. and Bayazitoglu, Y., 1987, Forced Convection Cooling across Rectangular Blocks, Journal of Heat Transfer, Vol. 109, pp. 321-328.