

대류와 전도 열전달을 이용한 전자부품의 냉각특성 수치해석

손영석 · 신지영

Numerical Analysis on Cooling Characteristics of Electronic Components Using Convection and Conduction Heat Transfer

Young-Seok Son and Jee-Young Shin

Key Words: Cooling Characteristics(냉각특성), Electronic Component(전자부품), Two-Dimensional Model(2차원 모델), Finite Volume Method(유한체적법)

Abstract

Cooling characteristics using convection and conduction heat transfer in a parallel channel with extruding heat sources 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 this problem. The considered assembly consists of two channels formed by two covers and one PCB which has three uniform heat source blocks. Five different cooling methods are considered to find efficient cooling method in a given geometry and heat source. The velocity and temperature fields, local temperature distribution along surface of blocks, and the maximum temperature in each block are obtained.

1. 서론

전자 및 정보통신 장비의 소형화와 고밀도화는 부품당 소모전력의 밀도를 높이고 이에 따른 급격한 열발생률의 증가를 초래하기 때문에 효율적인 냉각방법의 개발을 요구한다⁽¹⁾. 전자장비 내부에서 발생된 열이 주위 냉각유체로 적절히 방출되지 못하면 장비 내부의 온도상승을 유발해 전자부품의 원활한 작동과 성능이 유지될 수 없기 때문이다. 특히 단위 면적 당 열발생률이 급격히 증가하고 있기 때문에, 전자장비의 안정적인 작동을 위한 신뢰성을 확보하는 것이 중요하다. 이에 따라 제품의 허용온도를 유지하기 위한 다양한 냉각기술의 개발이 중요한 문제로 대두되고 있다.

전자장비의 냉각기술은 열전달 형태와 냉각유체에 따라 다음과 같이 크게 5가지 정도로 분류할 수 있다⁽²⁾.

전도냉각은 주로 고체를 통한 열확산에 기초한 것이며, 노트북 내의 열의 소산 및 냉각을 위해 알루미늄 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 유동에 기초하며, 발열량이 낮은 저용량 전자장비에서 주로 이용되는 냉각방식이다.

강제대류냉각은 자연대류냉각의 한계인 저용량 전자장비 이상의 발열량일 경우 이용되는 냉각방식이며, 강제대류에 의해 열전달률을 증대시킨 것이다⁽⁵⁾.

동의대학교 기계·산업시스템공학부 기계공학전공

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.

기존의 연구들은 진술한 각각의 냉각방식에 대해 연구를 수행하였으나, 주어진 전자장비 형상 및 발열량에서 어느 방법이 더 효과적인 냉각방식인지에 대한 비교 연구는 하지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 돌출된 열원이 있는 인쇄회로기판을 중심으로 상부 및 하부채널에서 주로 대류와 전도 열전달을 이용하는 경우, 전자부품의 냉각 특성에 미치는 영향과 효과적인 냉각방식을 알아보고자 한다. 이를 위해 고려한 냉각방법은 상부채널에서는 강제대류를 이용하고, 하부채널에서는 자연대류, 강제대류, 액체냉각, 전도블록을 이용하는 방식의 냉각특성과, 상부채널에 열전달 증진을 위해 배플을 설치하여 강제대류를 이용하고 하부채널에서는 자연대류를 이용하는 경우의 냉각특성을 복합열전달 해석하여 비교 분석하고자 한다.

2. 이론해석

2.1 해석모델

본 연구에서는 해석하고자 하는 전형적인 전자부품의 형상으로 인쇄회로기판 상에 3개의 발열체가 배치되어 있으며 상부 및 하부 커버로 인하여 인쇄회로기판 상부 및 하부에 채널이 형성되는 모델을 선정하였다. 상부채널에는 돌출된 열원이 존재하고 하부채널에는 해석경우에 따라 전도블록이 없는 경우와 있는 경우로 나누어진다. 이관수와 박철훈⁽⁶⁾은 돌출된 열원의 형상과 위치 등이 유동 및 열전달 특성에 미치는 영향을 수치적으로 해석하였으며, 이러한 인자들을 최적화한 결과를 제시하였다. 이 결과를 바탕으로 본 모델의 기하학적 형상과 치수를 $H_{UC}/H_{chip}=2$, $H_{UC}/H_{LC}=2$, $H_{UC}/H_{PCB}=10$, $H_{UC}/H_{cover}=20$, $H_{UC}/L_{chip}=1$, $L_{in}=L_{out}=L_s=L_{Alb}=L_{chip}=\dots$

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 해석과 고체상태인 인쇄회로기판, 발열체, 커버의 전도열전달 해석을 수행하였다. 계산영역 내의 속도 및 온도분포를 구하기 위하여 질량, 운동량 그리고 에너지보존법칙을 적용한다. 즉, 2차원, 과도상태, 압축성, 가변 물성치의 Navier-Stokes 방정식과 에너지방정식, 2차원 과도 열전도방정식⁽⁷⁾을 계산영역에 적용한다.

유동장의 입구 및 출구 경계조건으로 상부채널은 강제대류를 이용하므로 입구에서는 균일한 수평방향속도 u_∞ 및 주위온도 T_∞ 를 주었으며 수직방향속도는 없으므로 $v_\infty=0$ 이다. 출구에서의 경계조건으로는 $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = 0$ ⁽⁸⁾으로 주어 속도 및 온도의 수평방향 구배를 0으로 하였다.

하부채널에서 경계조건은 냉각방식에 따라 다르다. 전도블록의 유무에 상관없이 하부채널에서 자연대류를 이용하는 경우 입구 및 출구에서 속도에 대한 경계조건으로는 $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = 0$ 으로 하여 수평방향 구배를 0으로 주었으며, 온도에 대한 경계조건으로는 입출구에서 계산영역으로 유동이 유입되는 경우에는 균일한 주위온도 T_∞ 를 주었으며 계산영역에서 유동이 유출되는 경우에는 $\partial T/\partial x=0$ 으로 하였다. 하부채널에서 강제대류 및 액체냉각을 이용하는 경우 입구 및 출구에서의 경계조건은 상부채널과 같다.

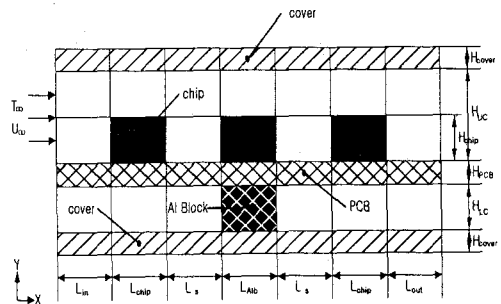


Fig. 1 Coordinate system and geometry

계산영역 좌우의 입구 및 출구에 있는 고체, 즉 인쇄회로기판 및 상하부 커버에서의 경계조건으로 속도는 $u=v=0$ 로 주었으며 온도에 대한 경계조건으로는 $\partial T/\partial x=0$ 으로 하여 단열조건을 주었다.

계산영역 상하부의 경계조건으로는 상부 및 하부 커버의 바깥면은 $\partial T/\partial y=0$ 으로 하여 단열조건을 주었다. 계산영역 내 고체와 유체의 경계면에서의 경계조건으로는 모든 고체 경계면에서는 점착조건(no slip condition)을 적용하여 속도를 0으로 두었고, 재질이 다른 고체와 고체, 그리고 고체와 유체 경계면에서는 $k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} = k_f \frac{\partial T_f}{\partial n}$ 으로 하여 열유속이 일치하도록 하였다.

2.3 수치해석 방법

이상의 지배방정식 및 경계조건을 적용하여 수치해석적으로 해를 구하기 위해 유한체적법(finite volume method)⁽⁹⁾을 사용하였으며, 압력장을 얻기 위해서는 SIMPLE(SIMPLE Corrected)방법⁽¹⁰⁾을 사용하였다. 본 수치계산에서는 수렴된 해를 구하기 위하여 각 계산당 $t = 4000 \sim 8000$ 초 정도의 계산이 필요하였으며, Pentium III PC에서 약 40~80 시간의 계산시간이 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에 사용될 코드의 타당성을 확인하기 위해, 3개의 돌출된 열원이 있는 수평채널에서 강제대류를 이용한 냉각에 대한 수치해석 결과인 Davalath와 Bayazitoglu⁽¹¹⁾의 연구결과와 비교하였다. Reynolds수는 750인 층류유동이며 블록간의 거리의 비가 0.5일 때 유동장과 무차원 온도장, 그리고 블록의 무차원 표면온도를 비교하였다. 이를 통해 본 연구에서 개발한 코드가 유체 유동 및 온도뿐만 아니라 발열블록의 온도도 타당하게 예측함을 알 수 있었다.⁽¹²⁾

격자수와 시간증분의 변화에 따른 해석결과를 비교하여, 계산결과와 격자수 및 시간증분에 대한 의존성을 분석하고 적절한 격자수로 350×115 , 시간증분으로 0.05초를 이용하였다.⁽¹²⁾

본 연구에서는 해석 모델의 냉각을 위해 주로

대류와 전도 열전달을 이용하는 경우, 각각의 냉각특성에 미치는 영향과 효과적인 냉각방식을 알아보고자 한다. 이를 위해 고려한 냉각방법은 상부 강제대류·하부 자연대류(case1), 상부 강제대류·하부 강제대류(case2), 상부 강제대류·하부 액체냉각(case3), 상부 강제대류·하부 전도블록(case4), 상부 배플 설치 강제대류·하부 자연대류(case5)인 5가지 경우에 대하여 냉각특성을 해석하고 각 방법에 따른 냉각성능을 비교하였다.

case1부터 case5까지 모든 경우에서 인쇄회로기판 상에 있는 3개의 돌출된 블록은 각각 5 W의 균일한 열원을 가진다. 강제대류를 이용하는 경우 유입속도는 0.0794 m/s이며 이는 Reynolds 수 1000에 해당하는 층류유동이다. 각각의 경우 유동장 및 온도장, 3개의 발열블록 표면을 따라 표면에서의 온도, 그리고 발열체인 각 블록에서의 최대온도를 구하였다. 해석의 편의를 위하여 무차원온도를 다음과 같이 정의하였다.

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

여기서 T 는 온도, T_∞ 는 주위온도, Q 는 블록의 발열량, 그리고 k_f 는 유체의 열전도율이다.

Fig. 2 ~ Fig. 6은 각 경우에 대한 무차원 온도장을 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. 각 블록의 전체적인 온도는 첫 번째 블록이 열전달이 가장 잘 일어나 온도가 가장 낮고, 두 번째

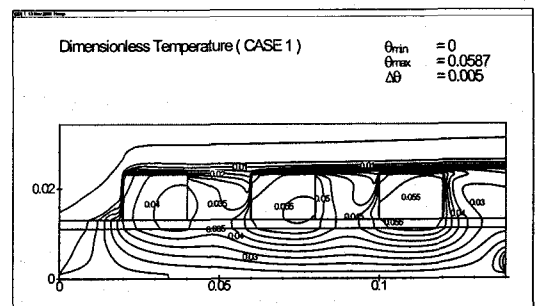


Fig. 2 Dimensionless temperature distribution (case1)

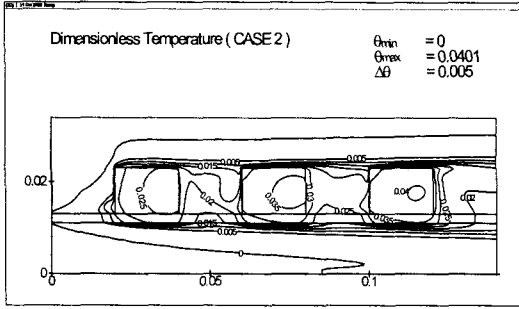


Fig. 3 Dimensionless temperature distribution (case2)

및 세 번째 블록이 이보다 조금씩 높아진다.

Fig. 3은 case2에 대한 무차원 온도장을 나타내며 case1과 달리 하부채널에서 강제대류를 이용하므로 인쇄회로기판 밑면에 열경계층이 형성되어 온도가 인쇄회로기판 밑면 근처에서 급격히 변화한다. 상부채널에서도 강제대류에 의한 영향으로 블록의 상부표면 근처에서 열경계층으로 인해 온도가 급격히 변화함을 알 수 있다. 각 블록의 전체적인 온도는 case1과 마찬가지로 첫 번째 블록이 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 내부의 온도가 저하함을 볼 수 있으며, 이는 하부채널에서 냉각유체에 의한 강제대류로 열전달량이 증대되기 때문이다.

case3에 대한 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 하부채널에 냉각유체로 액체인 물을 사용하므로 공기를 사용하는 case2와 달리 하부채널에서 인쇄회로기판 밑면 근처에서의 급격한 온도변화는 보

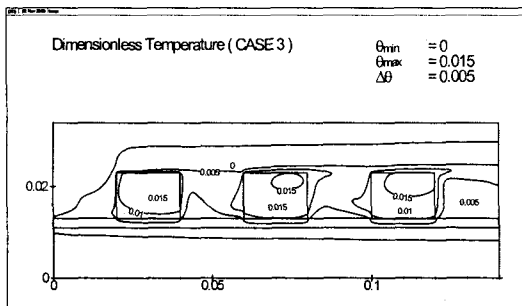


Fig. 4 Dimensionless temperature distribution (case3)

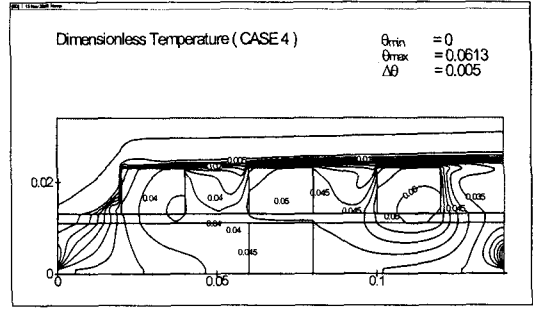


Fig. 5 Dimensionless temperature distribution (case4)

이지 않고, 전체영역의 온도도 상당히 낮다는 것을 알 수 있다. 따라서, 기체를 냉각유체로 사용하는 경우보다 액체를 냉각유체로 사용하는 것이 냉각성능이 더 우수하다는 사실을 알 수 있다. 각 블록의 전체적인 온도는 거의 비슷한 형태를 지니며 이는 상부채널에서 공기에 의한 강제대류의 효과보다 하부채널의 액체냉각에 의해 냉각특성이 좌우될 수 있다는 사실을 보여준다.

Fig. 5는 case4에 대한 결과를 나타낸다. 하부채널에 열전도율이 높은 알루미늄 재질의 전도블록을 사용하므로 전도블록이 없는 case1과 달리 하부채널에서 전도블록근처의 온도분포는 균일하며, 첫 번째 블록과 세 번째 블록 하단에서 자연대류에 의한 온도층이 형성되는 것을 볼 수 있다. 특히 세 번째 블록의 온도가 첫 번째 블록의 온도보다 상대적으로 높으므로 자연대류에 의한 온도층의 분포가 더욱 잘 나타나고 있다.

case5에 대한 결과는 Fig. 6에 나타내었다. case1과 달리 상부채널에 배플을 설치하였으므로 발열블록 상부면에서의 열경계층 두께는 블록 표

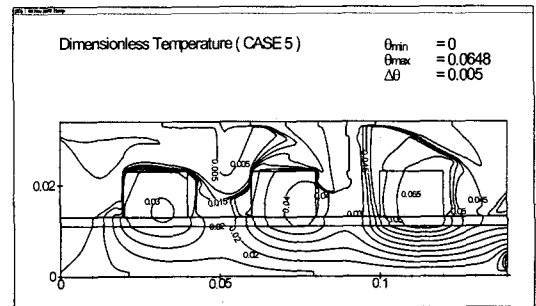


Fig. 6 Dimensionless temperature distribution (case5)

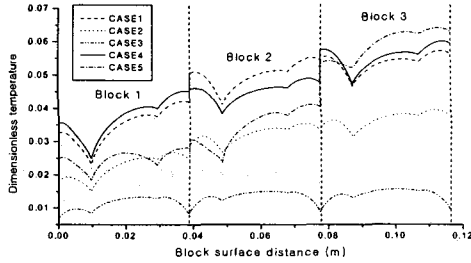


Fig. 7 Dimensionless temperature along block surface for each case

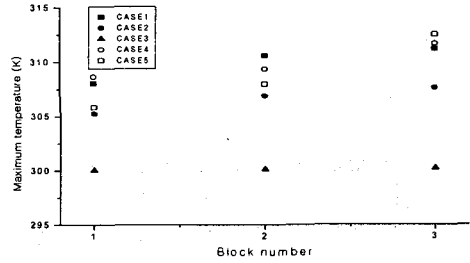


Fig. 8 Maximum temperature at each block for each case

면을 따라 증가하다가 배플에 의한 유동방향이 블록 축면방향으로 바뀌에 따라 그 영향으로 인해 열경계층의 두께가 감소하며, 두 번째 블록에서도 이와 유사한 현상을 보이고 있다.

이상의 연구결과에서 알아 본 5가지의 각기 다른 냉각방법에서 각 경우의 냉각특성에 미치는 영향과 효과적인 냉각방식을 알아보기 위해, case1부터 case5까지의 각 경우에 대해 블록표면에서의 무차원온도와 각 블록에서의 최대온도를 비교하여 각 경우의 냉각성능을 비교분석 하였다. 블록표면의 무차원온도는 블록의 표면을 따라서 좌측하단부터 우측하단까지를 각 블록 당 나타낸 것이다. 즉, 첫 번째 블록부터 블록의 좌측표면을 따라 하단에서 상단까지, 상부표면을 따라 좌측에서 우측까지, 그리고 우측표면을 따라 상단에서 하단까지를 두 번째, 세 번째 블록의 순으로 나타내었으며, 블록 사이의 간격에서의 온도는 나타내지 않고 3개의 블록 표면온도만 연속적으로 나타내었다.

Fig. 7에 나타나있듯이 냉각성능은 case3(상부 강제대류, 하부 액체냉각)의 경우가 가장 좋으며, case1(상부 강제대류, 하부 자연대류)은 가장 나쁘게 나타남을 알 수 있다. case4(상부 강제대류, 하부 전도블록)의 경우 전도블록을 설치한 두 번째 블록의 온도가 낮아졌으므로 전도블록의 설치에 따른 냉각성능 증대 시 유리하다는 사실을 알 수 있다. 즉 발열량이 각기 다른 발열체가 존재할 경우 고발열량 블록 하부에 전도블록을 설치하는 것이 효과적인 냉각방법이 될 수 있다. 또한 case3의 경우 블록의 표면온도가 거의 비슷하게 나타나며, 이는 시스템 전체를 고려한 냉각일 경우 유리하다는 것을 보여준다. case5(상부 배플

설치 강제대류, 하부 자연대류)의 경우 상류측 발열블록에서는 현격한 냉각성능의 증대를 볼 수 있으나, 배플 설치에 따른 하류에서의 압력강화로 인한 속도 감소와 상류측에서의 대류열전달 증가로 인한 하류측 냉각유체의 온도상승은 오히려 하류측 블록의 냉각성능을 저하시키는 결과를 가져온다.

Fig. 8은 5가지 다른 냉각방법에서 각 블록당의 최대온도를 나타낸 것이다. 하부에 액체냉각을 이용하는 case3의 경우가 최대의 냉각성능을 보여주며, 다음으로는 하부에 공기로 강제대류를 이용하는 case2가 냉각성능이 비교적 우수함을 알 수 있다. case1을 기준으로 살펴보면 전도블록을 이용한 경우인 case4의 경우 전도블록을 설치한 두 번째 발열블록에서만 온도의 저하를 볼 수 있고, 그 외 발열블록에서는 전도블록이 하부에서의 자연대류 열전달을 방해하므로 오히려 약간 상승하였다. 상부채널에 배플을 설치한 경우인 case5의 경우 첫 번째와 두 번째 발열블록에서는 상당한 냉각효과를 가져올 수 있으나 하류측에 있는 세 번째 발열블록에서는 급격한 온도상승이 나타나 오히려 냉각효과가 감소함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 전형적인 전자부품 형상인 일정한 열발생을 갖는 돌출된 열원이 있는 수평채널에서 전자부품의 냉각을 위해 다양한 냉각방법을 적용하고 이를 비교 분석하였다. 이를 위해 5가지 경우에 대하여 각각 해석을 수행하여 냉각특성을 조사하고 각 방법에 따른 냉각성능을 비교

검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동일한 기하학적 구조와 열원일 경우 자연 대류보다는 강제대류의 냉각성능이 더 양호하며, 냉각유체의 경우 기체보다는 물과 같은 액체의 냉각성능이 더 양호함을 보였다. 그러므로, 전자 부품의 발열량에 따라서 발열량을 효과적으로 소산시킬 수 있는 냉각유체의 공급형태와 냉각유체의 선택이 필요하다는 것을 알 수 있다.

2. 발열체 중 최대 온도를 보이는 열원 하단면에 전도블록을 설치할 경우 양호한 냉각성능을 기대할 수 있다. 하부채널에 강제대류가 적합하지 않은 형태의 기하학적 구조를 가진 전자장비의 경우 고발열량의 칩 하부에 전도블록을 설치하면 효과적으로 열을 소산시킬 수 있다.

3. 상부채널에서 공기에 의한 강제대류를 이용하는 경우 열원 중간에 배플을 설치함으로써 냉각유체의 흐름을 열원 쪽으로 유도하여 국부적인 냉각효과의 상승을 볼 수 있었다. 상류측 발열블록에서는 현격한 냉각성능의 증대를 볼 수 있었으나, 하류측 블록의 냉각성능은 저하시키는 결과를 가져왔다.

참고문헌

- (1) S. Oktay, R. Hannemann, and A. Bar-Cohen, 1986, "High Heat from a Small Package", Mechanical Engineering, Vol. 108, No 3, pp. 36~42.
- (2) F. P. Incropera, 1988, "Convection Heat Transfer in Electronic Equipment Cooling", Journal of Heat Transfer, Vol. 110, pp. 1097~1111.
- (3) W. Nakayama, 1998, "Recent Japanese Thermal Solutions for Portable Computers", Electronics Cooling Online.
- (4) H. Xie, M. Aghazadeh, W. Lui, and K. Haley, 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) W. Aung, 1991, "Cooling Techniques for Computers", Hemisphere Publishing Corporation.
- (6) 이관수, 박철균, 1998, "돌출부를 갖는 평행평판의 설계를 위한 층류 강제대류 해석", 공기조화·냉동공학 논문집, 제10권, 제1호, pp. 126~136.
- (7) F. P. Incropera and D. P. DeWitt, 1996, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 4th ed., John Wiley & Sons Inc., New York.
- (8) M. Behnia and A. A. Dehghan, 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.
- (9) S. V. Patankar, 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Corporation.
- (10) J. P. Van Doormaal and G. D. Raithby, 1984, "Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows", Numerical Heat Transfer, Vol. 7, pp. 147~163.
- (11) J. Davalath and Y. Bayazitoglu, 1987, "Forced Convection Cooling across Rectangular Blocks", Journal of Heat Transfer, Vol. 109, pp. 321~328.
- (12) 권귀동, 2001, "돌출된 열원을 갖는 채널에서 대류와 전도 열전달을 이용한 냉각특성", 공학석사학위 논문, 동의대학교 대학원.