

# 유동과 열전달 특성을 고려한 수평 전자회로 기판의 설계조건에 관한 수치적 연구

## A Numerical Study of Design Condition for Horizontal Electronic Circuit Boards Flow and Heat Transfer Characteristics

전 운 학\* 이 행 남\*\* 김 현 모\*\*\*  
U. H. Chun, H. N. Lee, H. M. Kim

### ABSTRACT

Flow and heat transfer characteristics in a horizontal electronic circuit board are studied numerically. The board has the arrays of heated blocks and the spaces between the plates and blocks are changed.

Air is used as cooling fluid, of which prandtl number is 0.7. The velocity distributions, temperature distributions, Nusselt numbers and dimensionless friction factors are obtained on the spaces between the plates and the blocks, for the cases of Rayleigh number, 0 and  $10^5$ . When Rayleigh number is so large, such as  $10^5$ , that the effect of bouyancy is not negligible, fluid friction and heat transfer is increased more than those of forced convection. This may be caused by the generation of secondary flow on the cross section of primary flow. The effect of bouyancy is of the most efficient, when the space of blocks is about block-width and the space of plates is about 1.7 times of block-height.

기 호 설 명			
		$fRe$	: 무차원 마찰계수
		$g$	: 중력가속도
$A$	: 계산영역에서 블록면적을 제외한 유 동장의 단면적 $[C/(\ell + s) - H\ell]/2$	$h$	: 평균열전달계수
$A_b$	: 계산영역에서 블록의 표면적	$H$	: 블록높이
$c$	: 기판사이의 간격	$k$	: 열전도계수
$C$	: 무차원기판사이 간격	$\ell$	: 블록의 수평길이
$C_p$	: 정압비열	$L$	: 블록의 무차원길이 ( $L = \ell/H$ )
$D_h$	: 수력직경	$Nu$	: 평균 Nusselt 수 ( $Nu = hH/k$ )
$f$	: 마찰계수	$Nu_0$	: 강제대류의 평균 Nusselt 수
		$p$	: 압 력

\* 중신회원, 국민대학교 기계공학과

\*\* 중신회원, 조선대학교 조선공학과

\*\*\* 국민대학교 대학원 기계공학과

- $\bar{p}$  : 단면적을 지나는 평균압력
- $p^*$  : 유효압력 ( $p^* = p + \rho gh$ )
- $p$  : 무차원압력 ( $P = p^* H^2 / \rho \alpha^2$ )
- Pr : prandtl 수
- $Q'$  : 계산영역에서 단위길이당 발열량
- Re : Rayleigh 수 ( $Ra = g \beta Q' H^3 / \alpha \nu k$ )
- Re : Reynolds 수 ( $Re = \bar{w} D_h / \nu$ )
- $s$  : 블록의 간격
- $S$  : 블록의 무차원간격 ( $S = s/H$ )
- $T$  : 온 도
- $T_b$  : 유체혼합온도
- $T_w$  : 블록표면온도
- $u, v, w$ :  $X, Y, Z$ 좌표에서 각각의 속도성분
- $w$  :  $Z$ 좌표 평균속도
- $U, V, W$ : 무차원속도
- $W$  :  $Z$ 좌표 무차원 평균속도
- $x, y, z, X, Y, Z$ : 차원 및 무차원 좌표
- $XL, YL$ :  $X, Y$ 좌표에서 계산영역의 길이

<그리스문자>

- $\alpha$  : 열확산계수
- $\beta$  : 열팽창계수
- $\nu$  : 동점성계수
- $\rho$  : 밀 도
- $\phi$  : 무차원계수 [ $\phi = k(T - T_w) / Q'$ ]
- $\varphi$  : 무차원 유동함수
- $\varphi_m$  : 무차원 유동함수의 최대치

1. 서 론

최근 반도체를 사용한 전자장비가 고집적화 소형화 되어감에 따라 전자회로기판의 열발생율이 점차 증가하고 있다. 따라서 전자장비의 냉각기술은 그 신뢰성을 높이기 위해서 절대적으로 필요하게 되었다.

전자부품의 냉각방식에는 자연공냉, 강제공냉, 액체냉각 및 상(Phase)변화를 이용한 비등냉각 등 다양한 방법들이 있다.<sup>1)</sup> 이들 중 일반적으로 많이 이용되고 있는 강제공냉방식에 있어서, 장비내의 열발생율이 작은 경우의 유동 및 열전달 해석은 부력의 효과를 무시하는 강제대류 해석으로 충분하였으나, 장비내의

열발생율이 급격하게 증가함에 따라 부력의 효과를 고려해야만 하는 혼합대류 해석이 필요하게 되었다.

회로기판(circuit board)들이 수평으로 여러 층 설치되는 경우, 유체의 밀도차로 인한 부력의 작용은 유동단면에 있어서 2차유동을 유발시키는 역할을 한다. 이 2차유동이 열전달의 증가 및 유동(primary flow) 방향으로의 압력강하의 증가에 원인이 된다.

Cheng<sup>2)</sup>은 수평직각 채널에서 혼합대류에 관한 해석을 수치적으로 수행하였으며, Kennedy<sup>3)</sup>는 동일한 수평직각 채널에서 아래 평판에 국부적인 열원이 있는 상황으로 확장하여 수치 해석을 수행하였다. Baliga<sup>4)</sup>는 여러 열의 얇은 핀(Fin)들이, 평판에 의해 상부가 완전히 차단된 경우와 핀끝과 상부평판 사이에 간극이 있는 경우에 대한 강제대류 열전달에 관하여 연구하였으며, 동일한 기하에서 부력의 효과가 무시될 수 없는 경우에 대한 해석을 Acharya<sup>5)</sup>가 수행하였는데, 부력의 영향으로 열전달과 유체마찰이 강제대류로 해석한 값들보다 상당히 증가함을 밝혔다. 여러 열의 직각 블록 발열체들이 부착된 여러 층의 수평평판들 사이의 층류 강제대류에 대한 수치적 연구가 Sparrow<sup>6)</sup>에 의해 수행되었으며, 동일한 기하에 대한 혼합대류 해석이 Braaten<sup>7)</sup>에 의해 연구되었다.

본 연구에서는 여러 층의 회로기판을 2차원화하여 주기적으로 반복되는 영역만을 해석 영역으로 선택하였으며, 유동을 층류 정상상태로 가정하여 유동특성 및 온도분포 특성 및 열전달 특성 및 압력강하 등을 연구하였다.

수치계산은 기판과 기판사이의 간격 및 블록사이의 간격을 변화시켜 가면서, 부력효과를 무시할 수 있는 강제대류를 우선 해석하고 본 연구의 목적인 부력효과가 큰 경우, 즉 Rayleigh수가  $10^5$ 인 경우에 대하여 혼합대류 해석을 수행하였다.

본 연구의 계산결과는 전자장비 회로기판의 설계에 응용될 수 있으며, 그 밖에 아래 평판에 길고 가느다란 열원이 부착되어 있거나 긴 홈이 여러 줄 파여진 채널의 열전달을 고려한

설계, 두께를 무시할 수 없는 여러 열의 FIN 들이 평판에 의해 상부가 차단되어 있는 경우의 설계에 응용될 수 있을 것이다.

## 2. 이론해석

### 2.1 물리적 상황 및 가정

Fig. 1(a)는 일반적인 회로 기판들이 여러층 수평으로 쌓여져 있는 것을 주 유동(Primary flow) 방향으로 바라보았을 경우의 모양으로, 블록 발열체들의 크기가 동일하다는 가정하에서 2차원화 하여 나타낸 것이다.

Fig. 1(b)는 본 연구에서 해석하고자 하는 계산영역을 나타낸다. 이 그림은 물리적 현상이 주기적으로 반복, 대칭되는 영역을 나타내므로, 이 영역만의 해석으로 전체 유동 특성 및 열전달 특성을 나타낼 수 있다. 그림에서  $H$  와  $l/2$  은 설계시 가장 변화시키기 어려운 값 들일 것이므로, 그 크기를 각각 1로 고정시키고 해석하기로 한다. 유동 유체는 prandtl 수가 약 0.7 인  $350^{\circ}\text{K}$ 의 공기를 사용하였다. 이와같은 모델에서 수치계산에 적용한 Rayleigh수는 단위 길이당의 발열량  $Q'$  과 블록의 높이  $H$ 를 특성량으로 할 경우 0 과  $10^5$ 을 사용하였으며, 해석영역이 수력학적, 열적으로 완전히 발달된 상황에서 2차원화 해석을 하였다. 상기한 물리학적 현상을 단순화하여 해석하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 유동은 2차원 정상상태 층류 혼합대류이다.
- 2) 유동유체의 물성치는 밀도외에 일정하다.
- 3) 복사열 전달 및 압축성 효과를 무시한다.
- 4) 유동이 수력학적으로 완전히 발달되었다.
- 5) 블록의 표면온도가 주어진 단면에서 균일하다.
- 6) 유동은 열적으로 완전히 발달하였다.
- 7) 평판은 완전 전열체이다.

위의 가정 1)은 부력의 효과를 무시할 수 없으며, 주 유동 방향의 블록사이의 간격이 작아서 그 영역에서의 와류로 인한 3차원 효과가 무시되는 경우를 의미하고, 2)는 Boussinesq's approximation<sup>8)</sup>을 이용한 것이며, 가정 4)는 블록열이 긴 경우에 해당된다. 또 가정 5)는 블록표면의 열전도율이 유체보다 훨씬 높은 경우에 해당되며, 가정 6)은 주 유동 방향으로의 단위길이당 열유속(Heat flux)이 균일함을 나타낸다. 가정 7)은 평판과 블록의 온도가 같다는 의미이며, 이러한 가정은 최대의 열전달상태에서 유동을 해석하고자 함이다.

### 2.2 지배방정식 및 경계조건

위와 같은 가정하에서 연속 방정식, 운동량 방정식 및 에너지 방정식은 다음과 같다.

- 1) 연속 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

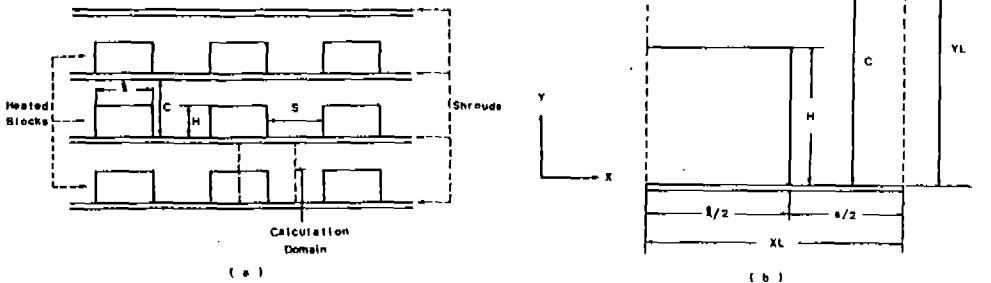


Fig. 1 (a) Geometry under consideration: (b) Calculation domain

2) 운동량 방정식

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial y} - \beta g (T - T_w) \quad (3)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} = \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

3) 에너지 방정식

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

방정식 (3)에서  $p^*$ 은 유효압력으로, 부력항  $\rho g$ 를 Boussinesq's approximation<sup>8)</sup>에 의거해서 해석할 때 압력  $P$ 가 변형된 것이다. 본 연구에서 지배방정식에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$x=0 \text{ 및 } x=\ell/2 + s/2 \text{에서}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad u = v = w = 0$$

$$y=0 \text{ 및 } y=c \text{에서}$$

$$u = v = w = 0$$

$$T = T_w$$

여기서  $x=0$  및  $x=\ell/2 + s/2$ 에서의 경계조건은 대칭선에서의 유동 특성 및 열적 특성을 나타낸다.

2.3 무차원 지배방정식 및 경계조건

무차원 방정식을 표시하기 위하여 다음과 같은 무차원 변수 및 무차원수를 정의하였다.

$$X = x/H, \quad Y = y/H, \quad S = s/H, \quad L = \ell/H, \\ C = c/H \quad (6)$$

$$U = uH/a, \quad V = vH/a, \quad P = p^*H^2/(\rho a^2) \quad (7)$$

$$\phi = k(T - T_w)/Q', \quad W = \rho \nu w / (\overline{d\bar{p}}/dz)/H^2 \quad (8)$$

$$Pr = \nu/\alpha, \quad Ra = g\beta Q' H^3/(\nu a k) \quad (9)$$

여기서  $W$ 를 위와같이 정의함으로써 압력강하의 값을 고려할 필요없이 해석할 수 있다. 상기의 무차원 변수로 지배방정식을 무차원화하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

1) 연속 방정식

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (10)$$

2) 운동량 방정식

$$\frac{1}{Pr} \left( U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} \right) = \frac{1}{Pr} \left( -\frac{\partial P}{\partial X} \right) + \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \quad (11)$$

$$\frac{1}{Pr} \left( U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} \right) = \frac{1}{Pr} \left( -\frac{\partial P}{\partial X} \right) + \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} + Ra\phi \quad (12)$$

$$\frac{1}{Pr} \left( U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} \right) = 1 + \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} \quad (13)$$

3) 에너지 방정식

$$U \frac{\partial \phi}{\partial X} + V \frac{\partial \phi}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} - \left( \frac{H^2}{A} \right) \frac{W}{\bar{W}} \quad (14)$$

위의 식(14)에서  $A$ 는 해석영역에 있어서 유체가 통과할 수 있는 부분만의 면적을 나타내며,  $H^2/A$ 는 무차원 길이  $S, L$  및  $C$ 의 함수이다. 그러므로 위의 무차원 방정식들은  $S, L, C$  및 Rayleigh의 수, Prandtl수의 5개의 독립매개 변수를 포함하고 있다. 그러나 본 연구에서는 무차원 길이  $L$ 을 1로 고정시켰으며, Prandtl 수는 0.7을 사용했고, Rayleigh 수 또한  $0.10^5$ 으로 고정시켰으므로, 결국  $S$ 와  $C$ 만이 독립매개 변수로 남게 되었다.

독립 무차원 변수로 표시된 경계조건은 다음과 같다.

$X=0$  및  $X=XL$ 에서

$$\frac{\partial \phi}{\partial X} = \frac{\partial \phi}{\partial X} = \frac{\partial \phi}{\partial X} = 0, \quad U=V=W=0$$

$Y=0$  및  $Y=YL$ 에서

$$U=V=W=0$$

$$\phi=0$$

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서 사용한 수치계산 방법은 Patanker의 SIMPLER 알고리즘을 이용하였고, 이 알고리즘은 엇갈린 격자망(Staggered grid)을 사용하였으며, 격자수는  $35 \times 35$  개 전후를 사용하였다. 기준기하는  $X=2$ ,  $Y=2$ 인 기하학적 형상을 선정하였으며,  $XL$ 은 1.1부터 4까지를 11가지로,  $YL$ 은 1.1부터 2.8까지를 10가지로 변화시켜 가면서 각각에 대한 유동 특성, 온도분포 특성, 열전달 특성 및 압력강하 등을 조사하였다. 각각 특성들을 알기위해 유선 분포, 동온선 분포, Nusselt 수 및 마찰계수 등을 중심으로 고찰하고자 한다.  $XL$  및  $YL$ 의 계산영역은 기준기하보다 작은 경우를 주된 관심으로 하였고, 이것은 보다 작은 공간에 많은 전자부품을 배치할 수 있는 기하학적 설계조건에 관련이 있기 때문이다.

#### 3.1 유동 특성

Fig. 2에서 (a)는  $XL=1.4$ ,  $YL=1.6$ . (b)는  $XL=1.4$ ,  $YL=2$ . (c)는  $XL=2$ ,  $YL=1.6$  인 경우의 유선분포를 나타낸다. 유선은 다음과 같은 무차원 유량함수로 정의되며 유량함수값이 같은 점들을 연결한 선을 의미한다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial Y} = U \quad (15)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial X} = -V \quad (16)$$

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 강제대류 해석에서는 나타나지 않는 2차 유동이 존재함을 알 수 있다. 이것은 블록의 열발생율이 클 경우 유동 유체의 온도차 및 밀도차가 커져서 유체에 부력이 강하게 작용하기 때문이다. Fig. 2(a)에서 블록의 상부 표면과 상부 평판 사이에는 2차 유동이 거의 없고 블록 옆부분의 영역에는 강한 2차 유동이 존재함을 나타내고 있다. 유선 분포가 조밀할수록 유선의 수직방향으로의 속도변화가 급격함을 의미하며 유동 단면에서의 속도 경계층 형성과 더불어 유체 마찰을 증가시키는 역할을 한다. 마찰계수는 강제대류 해석에 의한 값 88.38 보다 약 10.7% 증가한 92.89로 나타났다.

Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)의  $YL$ 을 1.6에서 2로 높였을 경우의 유선분포를 나타낸 것이다. 평판사이의 간격을 넓힐수록 블록의 윗 영역의 주 유동량이 증가해서 유체마찰의 증가를 유발시킨다. 2차 유동은 블록의 윗 영역에서도 많이 존재함을 나타내고 있다. 그러나 블록 윗 영역의 2차 유동의 유선밀도는 블록 옆 영역에서의 유선밀도 보다 작아서 유체마찰은 블록 옆 영역의 2차 유동 및 주 유동이 지배하고 있음을 알 수 있다. 마찰계수는 강제대류 해석에 의한 값 82.79 보다 17.4%가 증가한 97.19이었다.

Fig. 2(c)는 Fig. 2(a)의  $XL$ 을 1.4에서 2로 넓혔을 경우의 유선분포를 나타낸 것이다. 블록사이의 간격을 넓힐수록 블록 옆 영역에서의 주 유동량이 증가해서 유체마찰을 증가시키지만 블록 윗 영역에서의 주 유동량이 감소해서 유체마찰을 감소시키는 효과가 동시에 발생한다. 2차 유동은 Fig. 2(a)에서와 같이 블록 윗 영역에서는 거의 없고 블록의 옆 영역에서 많이 존재함을 나타내고 있다. 2차 유동에 의한 유선의 밀도는 Fig. 2(a)에서 보다 낮아졌고 블록 옆 영역의 유체마찰 영역은 넓어졌다. 유선밀도의 감소는 유체마찰의 감소를 의미하며 유체마찰 영역의 증가는 주 유동에 의해 유체마찰의 증가를 의미한다. Fig. 2(c)의 마찰계수는 Fig. 2(a)의 92.89보다 2.4% 감소한 90.65를 나타냈다. 이것은 유선밀

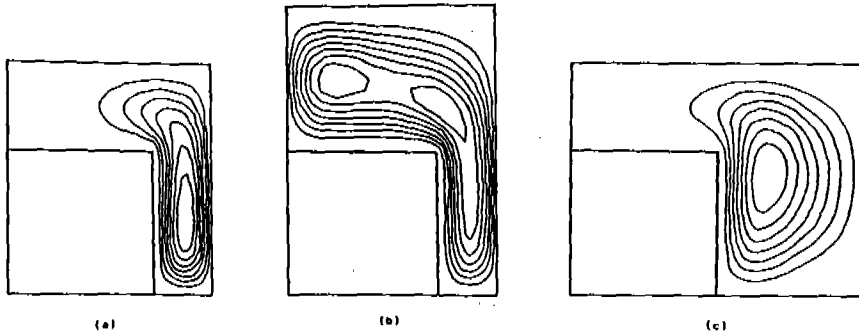


Fig. 2 Streamlines on mixed convection analysis

도의 감소로 인한 유체마찰의 감소효과가 유동영역의 증가로 인한 유체마찰의 증가 효과보다 큼을 의미한다. 그러나 강제대류 해석에 의한 마찰계수 65.15 보다 39.1% 증가하였다.

강제대류 해석에 의한 마찰계수와 혼합대류 해석에 의한 마찰계수 사이의 증가율은 Fig. 2(c)가 Fig. 2(a), (b)보다 큼을 의미하고 있다. 이것은 2차 유동에 의한 유체마찰 증가의 효과가 Fig. 2(a), (b)와 같은 기하학적 형상에서 보다 Fig. 2(c)와 같은 기하학적 형상에서 크다는 것을 의미한다. 이러한 사실은 블록의 열발생율이 커질수록 Fig. 2(c)와 같은 기하학적 형상에서의 유체마찰이 급격하게 증가할것임을 예측할 수 있게 한다.

이상에서 유체마찰의 크기를 결정하는 인자는 2차 유동 유선의 밀도와 주 유동 영역의 증감임을 알 수 있다.

### 3.2 온도분포 특성

Nusselt 수는  $Nu = hH/k$ 로 정의하였으며, 여기서 평균 열전달계수  $h$ 는 다음과 같이 정의하였다.

$$h = Q' / [A_b (T_w - T_b)] \quad (17)$$

여기서,  $A_b$ 는 블록의 발열 표면적만을 나타낸다.

유동에 대한 축방향 압력강하는 다음과 같이 마찰계수  $f$ 로 나타낸다.

$$f = \frac{(-d\bar{p}/dz) D_h}{1/2 \rho \bar{W}^2} \quad (18)$$

여기서, 수력직경  $D_h$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$D_h = 2 \left( \frac{c(\ell + s) - H\ell}{\ell + s + H} \right) \quad (19)$$

식(18)과 식(19)를 조합하면 다음과 같은 무차원수를 얻을 수 있다.

$$f \cdot Re = \frac{8}{W} \left( \frac{C(L+S) - L^2}{L+S+1} \right) \quad (20)$$

Fig. 3의 (a) (b) (c)는 강제대류 해석에 의한 온도분포를 등온선으로 나타낸 것이다. 등온선의 분포가 조밀할수록 등온선의 수직방향으로의 온도변화가 급격함을 의미하며 열 경계층의 형성과 더불어 열전달을 증가시키는 역할을 한다.

Fig. 3(a)는 블록 및 평판부근의 등온선 밀도가 비슷함을 나타내고 있다.

Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)의 블록상부의 유동영역을 넓혔을 경우로 블록 상부영역의 등온선의 밀도는 Fig. 3(a)에서와 같으나 블록옆 영역에서의 등온선 밀도가 Fig. 3(a)에서 보다 상대적으로 낮음을 나타내고 있다. 평판사이의 간격을 크게할수록 블록옆 영역의 주 유동의 상대적인 감소에 의해 열전달이 감소하는 효과와 블록 윗 영역의 주 유동의 증가에 의해 열전달이 증가하는 효과가 동시에 발생한다.

Fig. 3(b)의 경우 Nusselt 수는 Fig. 3(a)의 8.50 보다 26% 감소하였다. 이러한 감소는 블록 옆 영역의 주 유동의 감소에 의한 열전달 감소효과가 블록 윗 영역의 주 유동의 증가에 의해 열전달이 증가하는 효과보다 크기 때문이다.

Fig. 3(c)는 Fig. 3(a)의 블록 옆 영역을 넓혔을 경우로 블록 윗 영역 및 블록 옆 영역의 등온선의 밀도가 낮아졌음을 나타내고 있다. 그러나 열전달 영역은 상대적으로 커졌음을 나타내고 있다. 블록사이의 간격을 넓힐수록 블록 윗 영역의 주 유동의 감소에 의한 열전달 감소효과와 블록 옆 영역의 주 유동의 증가 및 열전달되는 평판 면적의 증가에 의한 열전달 증가 효과가 동시에 발생한다. Fig. 3(c)의 경우 Nusselt 수는 Fig. 3(a)의 Nusselt 수 8.50 보다 감소한 4.06 을 나타내고 있다. 이것은 블록 윗 영역의 주 유동감소에 의해 열

전달이 감소하는 효과가 블록 옆 영역의 주 유동의 증가 및 열전달되는 평판면적의 증가에 의해 열전달이 증가하는 효과보다 크기 때문이다.

Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 기하학적 형상에 대한 혼합대류 해석을 나타내고 있다. 혼합대류 해석에서는 부력의 효과를 고려함으로써 발생하는 2차 유동의 작용으로 유동단면상에 속도경계층이 형성된다.

이 속도경계층은 유동단면상의 열 경계층을 더욱 급격하게 만드는 역할을 한다. 결국, 유동단면상에 형성되는 2차유동은 등온선의 밀도를 증가시켜 열전달을 증가시키는 역할을 하게 되는 것이다.

Fig. 4(a)는 Fig. 2(a)에서 보이는 2차 유동으로 인해 블록 옆 영역에서의 등온선의 밀도가 증가하였음을 나타낸다. 이것은 열전달의 증가를 의미하며 Fig. 4(a)의 Nusselt 수는 8.14

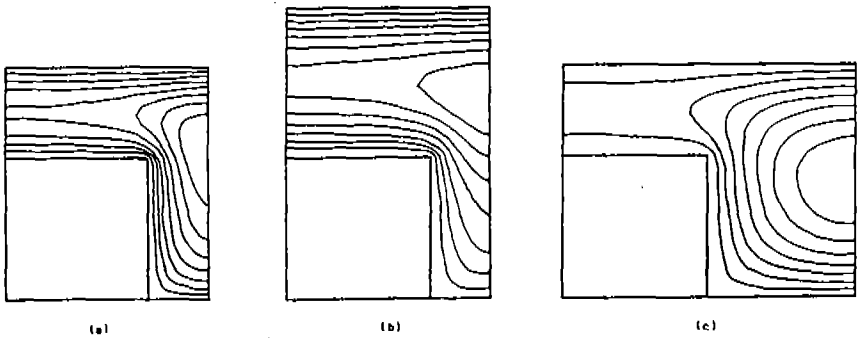


Fig. 3 Isotherms on forced convection analysis

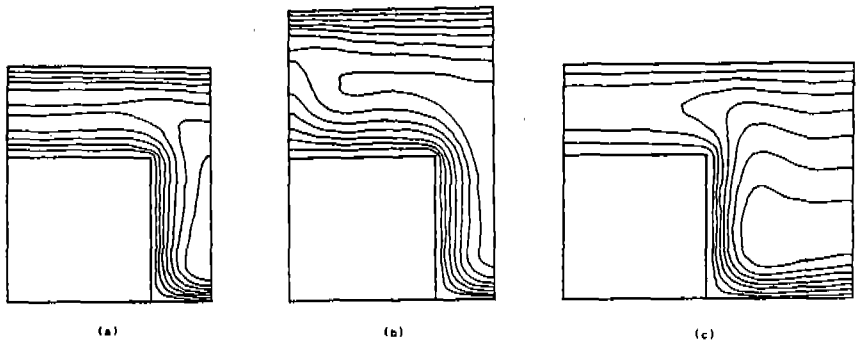


Fig. 4 Isotherms on mixed convection analysis

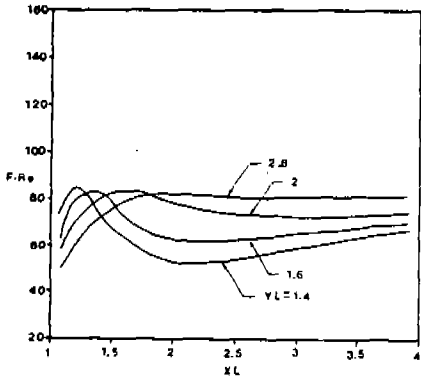


Fig. 5 Friction factor on XL by forced convection analysis

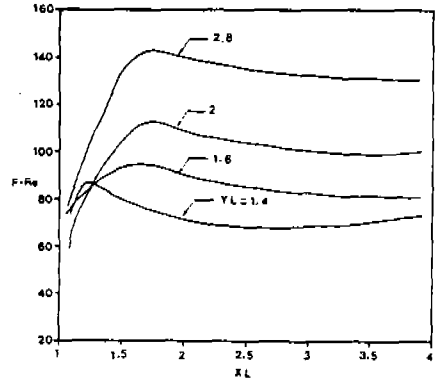


Fig. 6 Friction factor on XL by mixed convection analysis

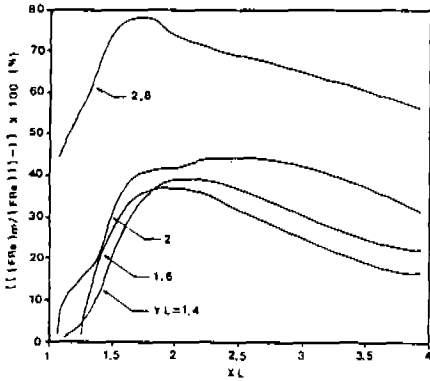


Fig. 7 Effect of buoyance on XL in fluid friction

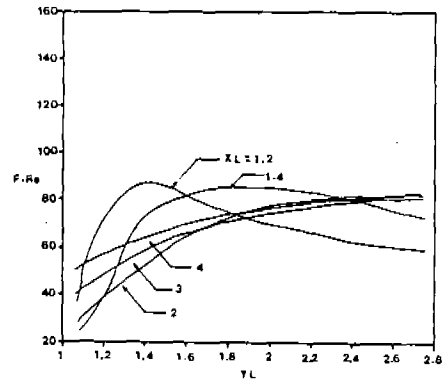


Fig. 8 Friction factor on YL by forced convection analysis

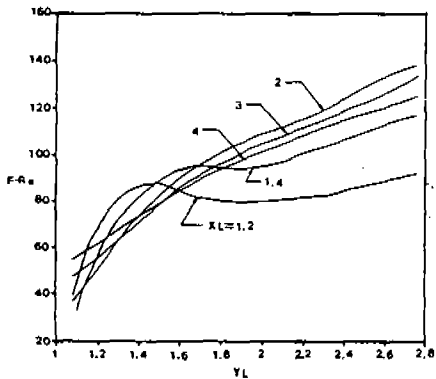


Fig. 9 Friction factor on YL by mixed convection analysis

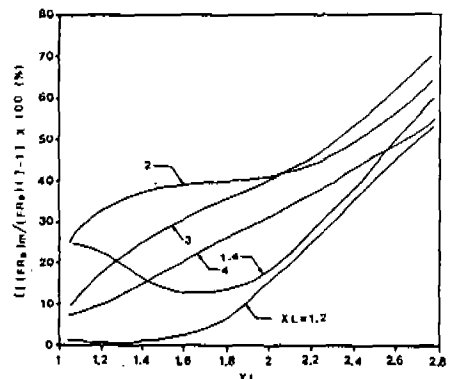


Fig. 10 Effect of buoyance on YL in friction factor



로 Fig. 3(b)의 6.28 보다 약 30% 증가하였고, Fig. 4(c)의 Nusselt 수는 8.52로 Fig. 3(c)의 4.60 보다 약 85% 증가하였다.

Fig. 4(c)의 Nusselt 수의 증가율이 Fig. 4(a), (b)의 증가율보다 큰 것은 유동해석에서 언급했듯이 (c)와 같은 기하학적 형상에서의 부력의 효과가 (a), (b)보다 크기 때문이다.

유체마찰의 증가는 주 유동에 의한 것과 2차 유동에 의한 것이었다. Fig. 4(c)와 같은 기하학적 형상에서는 2차 유동에 의한 유체마찰이 열전달의 증가에 끼치는 효과가 주 유동에 의한 유체마찰이 열전달의 증가에 끼치는 효과보다 큼을 알 수 있다. 그러므로 블록의 열발생율이 증가할수록 Fig. 4(c)와 같이 부력의 효과가 큰 기하학적 형상을 사용하는 것이 보다 많은 열전달에 이바지하게 될 것임을 예측할 수 있다.

### 3.3 기하학적 조건에 따른 압력강하 특성

Fig. 5은  $XL$ 의 변화에 따른 마찰계수의 변화를 강제대류 해석에 의해 구한 그래프이다. 그림에서  $XL$ 이 증가함에 따라 마찰계수가 증가하는 영역은 블록 옆 영역의 유동량이 증가함에 따라 그 영역에서의 주 유동 속도 분포가 급격하게 변화하게 되기 때문이다.  $XL$ 이 증가함에 따라 마찰계수가 감소하는 영역은 블록 옆 영역의 유동량의 증가에 따른 유체마찰 증가 효과보다 블록 윗 영역의 유동량의 감소에 따른 유체마찰의 감소효과가 더욱 크기 때문이다.  $XL$ 이 약 2보다 큰 영역에서 마찰계수가 조금씩 증가하게 되는 것은 블록 옆 영역의 유동량의 증가에 따른 유체마찰 증가 효과가 블록 윗 영역의 유동량의 감소에 따른 유체마찰의 감소효과보다 조금 크기 때문이다. 그러므로 이 영역에서는 평판사이의 간격과 블록사이의 간격이 증가함에 따라 유체마찰이 증가함을 Fig. 5에서 볼 수 있다.

Fig. 6는  $XL$ 의 변화에 따른 마찰계수의 변화를 혼합대류 해석에 의해 구한 그래프이다. Fig. 6은 Fig. 5이 전체적으로 증폭된 모양을 나타내고 있다. 이것은 유동 단면에 발생하는 2차 유동에 의한 유체마찰 증가의 효과를 의

미하는 것이다.  $XL$ 이 약 1.8까지 증가하는 동안은 강제대류에서와 마찬가지로 마찰계수가 계속 증가함을 나타내고 있다.  $XL$ 이 1.8까지 증가하는 동안은 강제대류에서와 마찬가지로 마찰계수가 계속 증가함을 나타내고 있다.  $XL$ 이 1.8 이상에서는 마찰계수의 값이 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 이러한 현상은  $XL$ 의 증가에 따른 블록 옆 영역의 유동량의 증가로 인한 유체마찰의 증가효과와 블록 윗 영역의 유동량의 감소에 따른 유체마찰의 감소효과 및 2차유동 유선의 밀도 감소로 인한 유체마찰의 감소효과가 거의 평형을 이루기 때문이다. 그러므로  $XL$ 이 1.8 이상에서는 평판사이의 간격이 증가함에 따라 유체마찰이 증가하게 됨을 Fig. 6에서 볼 수 있다.

Fig. 7은  $XL$ 의 변화에 따라 2차유동이 유체마찰에 끼치는 정도를 알기 위해 강제대류 해석에 의해 구한 마찰계수  $((F \cdot Re)_f)$  값에 대한 혼합대류 해석에 의해 구한 마찰계수 값  $((F \cdot Re)_m)$ 의 증가율을 나타내는 그래프이다.  $XL$ 이 약 1.8까지 증가하는 동안 2차유동에 의한 유체마찰도 급격하게 증가함을 알 수 있다. 이것은 2차유동의 강도가 증가하고 있음을 의미하는 것이다.  $XL$ 이 약 1.8보다 큰 영역에서는 2차유동에 의한 유체마찰이 계속 감소함을 나타낸다. 그러므로 이 영역에서는  $XL$ 이 증가함에 따라 2차유동에 의한 유체마찰이 감소함을 의미하는 것이다. 또 평판사이의 간격이 클수록 2차유동의 강도가 큼을 알 수 있다. 그러므로  $XL$ 이 약 1.8 전후에서  $YL$ 이 증가함에 따라 부력의 효과가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8~10은 평판사이의 간격  $YL$ 에 따른 유체마찰의 특성 및 부력의 효과를 나타내는 그래프이다. Fig. 10에서  $XL$ 이 약 2에서 부력으로 인한 유체마찰이 가장 큼을 알 수 있다.

### 3.4 기하학적 조건에 따른 열전달 특성

Nusselt 수는  $Nu = hH/k$ 로 정의하였으며, 여기서 평균 열전달계수  $h$ 는 다음과 같이 정의하였다.

$$h = Q' / [A_b (T_w - T_b)] \quad (21)$$

여기서,  $A_b$ 는 블록의 발열 표면적만을 나타낸다.

Fig. 11은  $XL$ 의 변화에 따른 Nusselt 수의 변화를 강제대류 해석에 의해 구한 그래프이다.  $XL$ 이 증가함에 따라 Nusselt 수가 증가하는 영역은 블록 옆 영역의 주 유동의 증가 및 열전달되는 평판면적의 증가에 의한 열전달 증가효과가 블록 윗 영역의 주 유동의 감소에 의한 열전달 감소효과보다 크기 때문이다.  $XL$ 이 증가함에 따라 Nusselt 수가 감소하는 영역은 블록 윗 영역의 주 유동의 감소에 의한 열전달 감소효과가 블록 옆 영역의 주 유동의 증가와 열전달되는 평판면적의 증가에 의한 열전달 증가효과보다 크기 때문이다.  $XL$ 이 약 2 이상에서 Nusselt 수가 조금씩 증가하는 것은 블록 옆 영역의 주 유동증가 및 열전달되는 평판면적의 증가에 의한 열전달 증가효과가 블록 윗 영역의 주 유동의 감소에 의한 열전달 감소효과보다 조금 크기 때문이다.

Fig. 5에서는  $YL$ 이 증가할수록 마찰계수가 증가하였으나, Fig. 11에서는  $YL$ 이 증가할수록 Nusselt 수가 감소함을 나타내고 있다. 이것은  $YL$ 이 클수록 블록 윗 영역의 유동량의 증가로 인한 유체마찰의 증가가 블록 옆 영역의 유동량의 감소로 인한 유체마찰의 감소보다 큰 반면에, 블록 옆 영역의 유동량의 감소로 인한 열전달 감소효과가 블록 윗 영역의 유동량의 증가로 인한 열전달 증가효과보다 크기 때문이다.

Fig. 12는  $XL$ 의 변화에 따른 Nusselt 수의 변화를 혼합대류 해석에 의해 구한 그래프이다. Fig. 12는 Fig. 11이 전체적으로 증가된 모양을 나타내고 있다. 이것은 유동단면에 발생하는 2차유동에 의한 열전달 증가의 효과를 의미하는 것이다. Fig. 12에서  $XL$ 이 증가함에 따라 Nusselt 수가 증가하는 영역은 블록 옆 영역의 주 유동의 증가 및 열전달되는 평판면적의 증가에 의한 열전달 증가효과가 블록 윗 영역의 주 유동의 감소에 의한 열전달 감소효과보다 크기 때문이다.  $XL$ 이 약 2 이상에서는 Nusselt 수가 평판사이의 간격  $YL$ 에 무관하게 완만히 증가함을 나타내고 있다. 이것은

$XL$ 이 증가할수록 블록 옆 영역의 주 유동의 증가 및 열전달되는 평판면적의 증가에 의한 열전달 증가효과가 블록 윗 영역의 주 유동의 감소에 의한 열전달 감소효과보다 조금씩 커짐을 나타내는 것이다.

Fig. 13은  $XL$ 의 변화에 따라 2차 유동이 열전달에 끼치는 정도를 알기 위해, 강제대류 해석에 의해 구한 Nusselt 수에 대한 혼합대류 해석에 의해 구한 Nusselt 수의 증가율을 나타내는 그래프이다.  $XL$ 이 약 2까지 증가하는 동안 2차유동에 의한 열전달 효과도 급격하게 증가함을 알 수 있다. 이것은 부력의 효과가 증가하고 있음을 의미한다.  $XL$ 이 약 2보다 큰 영역에서는 2차유동에 의한 열전달 효과가 계속 감소함을 나타낸다. 또 평판사이의 간격이 클수록 부력의 효과가 큼을 알 수 있다. 그러므로  $XL$ 이 약 2전후해서  $YL$ 이 증가함에 따라 부력의 효과가 증가함을 알 수 있다.

강제대류 해석결과에서  $Ra = 10^6$ 인 경우 평판사이의 간격을 크게 하는 것은 열전달을 줄이면서 압력강하만 크게 한다. 그러나, 혼합대류 해석결과에서는 평판사이 간격을 크게 할수록 부력에 의한 열전달 증가효과가 커진다. 그러므로 블록의 발열량이 더욱 크면 혼합대류 해석이 행해져야 할 것이다.

Fig. 14~16은 평판사이의 간격  $YL$ 에 따른 열전달 특성 및 부력의 효과를 나타내는 그래프이다. Fig. 10과 Fig. 16에서  $XL$ 은 약 2이고  $YL$ 은 약 1.7인 경우가 부력으로 인한 유체마찰이 비교적 작은 반면 열전달의 증가효과가 크다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 여러 층의 수평전자 회로기판을 강제공냉할 경우 회로기판과 전자부품의 기하학적 조건에 따른 열전달 특성, 압력강하 특성을 정성적으로 파악코저 하였고, 유동영역을 2차원화하여 Rayleigh수가 0 및  $10^6$ 인 각각의 경우에 대하여 유동특성, 온도분포 특성, 열전달 특성 및 압력강하 특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

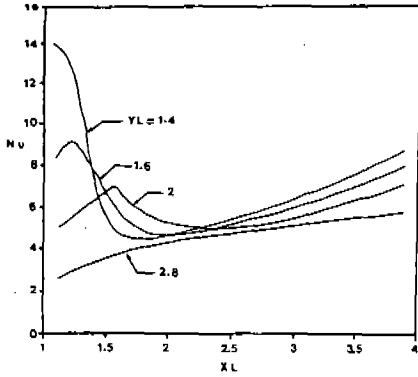


Fig. 11 Nusselt number on XL by forced convection analysis

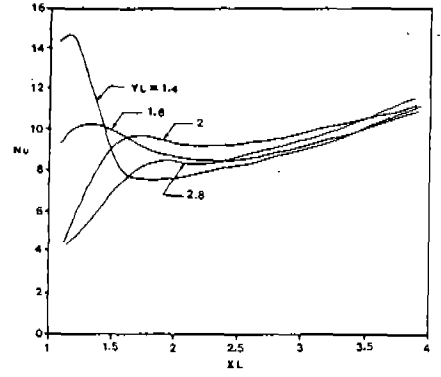


Fig. 12 Nusselt number on XL by mixed convection analysis

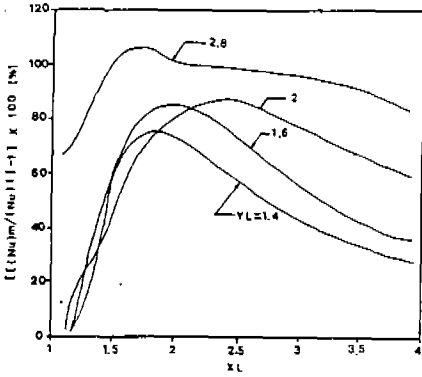


Fig. 13 Effect of buoyancy on XL in Nusselt number

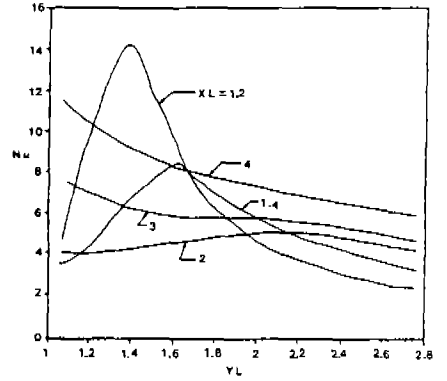


Fig. 14 Nusselt number on YL by forced convection analysis

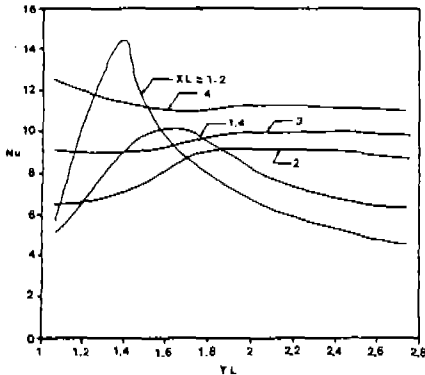


Fig. 15 Nusselt number on YL by mixed convection analysis

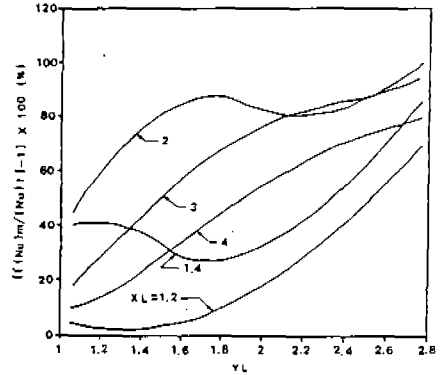


Fig. 16 Effect of buoyancy on YL in Nusselt number

1) Rayleigh수가  $10^5$  과 같이 커서 부력의 효과를 무시할 수 없는 경우는 주 유동단면상에 2차유동이 발생하기 때문에 Rayleigh수가 0인 경우보다 유체마찰 및 열전달이 증가함으로 부력의 효과를 고려해야 한다.

2) Rayleigh수가  $10^6$  과 같이 커서 부력의 효과를 무시할 수 없는 경우에 열전달의 증가는 주 유동보다 2차유동이 더 큰 영향을 주는 기하학적 형상이 존재한다.

3) 블록사이의 간격이 블록의 폭만하고, 기판사이의 간격이 블록 높이의 약 1.7 배인 경우 부력효과는 가장 효율적이다.

4) 블록의 열발생율이 증가할수록 부력의 효과가 큰 기하학적 형상을 사용하는 것이 보다 많은 냉각효과를 얻을 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. F.P. Incropera, "Convection Heat Transfer in Electronic Equipment Cooling", J. of Heat Transfer, vol. 110, 99, 1097-1111, 1988.
2. K.C. Cheng and G.J. Hwang, "Numerical Solution for Combined Free and Forced Laminar Convection in Horizontal Rectangular Channels", J. of Heat Transfer, vol. 91, 9, 59-66, 1969.
3. K.J. Kennedy and A. Zebib, "Combined Free and Forced Convection between

Horizontal Parallel Planes: Some Case Studies", Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 26, 99, 471-474, 1983.

4. E.M. Sparrow, B.R. Baliga and S.V. Patankar, "Forced Convection Heat Transfer from a Shrouded Fin Array with and without Tip Clearance", ASME, J. Heat Transfer, vol. 100, 99, 572-579, 1978.
5. S. Acharya and S.V. Patankar, "Laminar Mixed Convection in Shrouded Fin Array", J. of Heat Transfer, vol. 103, 99, 559-565, 1981.
6. E.M. Sparrow and Chukaev, "Forced - Convection Heat Transfer in a Duct having Spanwise - Periodic Rectangular Protuberances", Num. Heat Transfer, vol. 3, 99, 149-167, 1980.
7. M.E. Braaten and S.V. Patankar, "Analysis of Laminar Mixed Convection in Shrouded Arrays of Heated Rectangular Blocks", Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 28, no. 9, 99, 1699-1709, 1985.
8. D.D. Gray and A. Giorgini, "The Validity of the Boussinesq Approximation for Liquids and Gases," Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 19, 99, 545-551, 1976.
9. S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, New York, 1980.