

〈기술논문〉

돌출된 열원이 부착된 수직 채널내 복합열전달

김의광* · 백병준** · 박복춘** · 조병수***

(1995년 7월 31일 접수)

Conjugate Heat Transfer in a Vertical Channel with Protruding Heat Source

E. K. Kim, B. J. Baek, Bockchoon Pak and B. S. Cho

Key Words : Conduction-Convection Conjugated Heat Transfer (전도-대류 복합 열전달), Protruding Heat Source (돌출된 열원), Thermal Conductivity Ratio (열전도율 비), Recirculation Region (재순환 영역), Separation Bubble (박리 기포)

Abstract

The coupled conduction and convection heat transfer from the protruding heat source in a vertical channel is numerically investigated. Conjugate solution of the two-dimensional energy equation is obtained for the incompressible air flow over the rectangular block with local heat source. It was found that several recirculation zones and separation bubble near the block were related to Re and Gr . And the results show that fractions of the heat transfer through each of the block face, maximum temperature of the block and the relative effect of each parameter on the maximum temperature and heat transfer.

기호설명

b : 채널 간격	Nu : Nusselt 수 (hL/k_f)
β : 열팽창 계수	ν : 동점성 계수
C_p : 비열	p : 압력
Gr : Grashof 수 ($g\beta QL^3/k_f\nu^2$)	Q : 총 발생열량 (W/m)
g : 중력 가속도	Q_{conv} : 블록 표면의 대류 열전달량 (W/m)
H : 블록의 높이	Q_{cond} : 전도에 의한 열전달량 (W/m)
k_b : 블록의 열전도율	Q''' : 단위 체적당 열발생량 (W/m ³)
k_f : 공기의 열전도율	Re : Reynolds 수 ($u_{in}L/\nu$)
k_s : 수직벽의 열전도율	ρ : 밀도
L : 블록의 길이	s : 고체와 유체의 접촉면 길이
L_h : 블록 표면으로부터 발열면까지의 거리	T : 온도
μ : 점성 계수	T_{in} : 외기 온도
N_x, N_y : x, y 방향 격자수	ΔT_{max} : 최대 온도와 외기 온도와와의 차이 ($T_{max} - T_{in}$)
	u_{in} : 유입 속도
	u, v : x, y 방향 속도
	w : 수직벽 두께

*한국원자력연구소

**회원, 전북대학교 기계공학과

***회원, 전북대학교 대학원 기계공학과

1. 서 론

최근 전자장비의 소형화, 고밀도화에 따라 단위 체적당의 발생열량은 급격히 증가하고 있으며, 회로의 밀도는 매년 30%의 비율로 증가하고 있다. 단위 면적당 열발생량이 10^6 W/m^2 정도인 고집적 칩(chip)은 그 작동 허용온도를 $85^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 이하로 유지시켜야 하며, 이 허용온도로부터 10°C 초과함에 따라 시스템의 신뢰성은 50%씩 감소함이 보고된 바 있다.⁽¹⁾ 따라서 전자장비내의 고부하점(hot spot)의 제거와, 이 열을 발산시킬 수 있는 새로운 열적 제어 방법에 관한 냉각기술은 고성능 집적회로 개발의 성패를 결정할 수 있는 중요한 인자가 된다.

대류에 의한 전자장비의 냉각에 관한 연구는 그 중요성이 인식됨에 따라 증가 추세에 있으며, Incropera⁽²⁾에 의해 요약되어 개괄적인 연구 현황을 파악할 수 있다. Nakayama⁽³⁾는 전자장비의 열적 제어기술 및 연구 내용에 관한 제검토를 수행하여 앞으로의 연구 방향을 제시한 바 있다.

많은 연구가 공기에 의한 냉각방법으로써 순수 자연대류 및 강제대류에 대하여 수행되고 있다. 자연대류에 의한 냉각방법은 가격, 설계상의 용이성 및 높은 신뢰성 등의 장점으로 인해 연구대상이 된다. 기하학적 조건이 단순한 수직 채널유동의 최대 온도 및 Nu 수에 관한 상관 관계식이 Ramathan과 Kumar⁽⁴⁾에 의해 도출되었으며, Bar-Cohen과 Rosenow⁽⁵⁾는 채널 벽면의 열적조건에 따른 총 열전달률이 최대가 되는 최적 벽면 간격을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. Jaluria⁽⁶⁾는 수직으로 위치한 단열벽면에 균일한 열유속을 갖는 띠(strip)가 분산된 경우의 전달현상을 수치적으로 수행하여 부품의 간격이 표면온도에 미치는 영향을 보고하였고, Afrid와 Zebib⁽⁷⁾는 단열 벽면에 돌출된 열원으로부터의 열전달을 연구하여 최대온도와 열생성률의 선형적인 관계를 규명하는 등 그 연구대상의 형상이 점진적으로 실제와 가깝게 접근하고 있다.

Ortega와 Moffat⁽⁸⁾은 실제 전자 부품과 유사한 정육면체 알루미늄 시편의 중앙에 전기저항을 삽입하여 제작된 발열체를 수직 채널에 배열하여 채널 간격에 따른 열전달 실험을 하였고, 최용문과 박경

암⁽⁹⁾은 수직 채널내에 장방형 발열체를 부착하여 발열체간 상호작용 및 열전달에 관한 상관 관계식을 도출하였다.

위와 같은 자연대류에 의한 냉각 성능은 그 한계가 있어 열발생이 1000 W/m^2 이상이면 적용될 수 없다. 부품의 소형화와 고밀도화에 따라 단위 체적당 발생 열량이 증가되면 냉각을 위한 강제적 유동이 필수적이며, 이는 혼합대류에 관한 연구를 요구한다.

Braaten과 Patankar⁽¹⁰⁾는 부품이 일정한 간격으로 놓여 있는 수평기관 위에 완전히 발달된 냉각용 공기가 유입될 때 균일하게 가열되는 전자부품에 의한 부력이 열전달 특성에 미치는 영향을 연구하였으며, 이재현⁽¹¹⁾ 등은 수평기관의 양면에 부품이 SMT(Surface Mounting Technology)로 탑재된 경우 효과적인 형상 배열을 위한 열전달 특성을 고찰하였다. Kang 등⁽¹²⁾은 수평관 위에 탑재된 부품의 온도 증가가 혼합대류 변수 $Gr/Re^{5/2}$ 에 의해 크게 영향을 받으며 순수 자연대류로부터 강제대류로의 천이과정과 돌출부의 각 위치에 따른 국소 열전달 등을 연구하였다. 유성연과 광영만⁽¹³⁾은 5/s 이상 빠른 속도의 강제대류에 대해 나프탈렌 승화법을 이용하여 모사 전자 칩 주위의 국소적인 열전달 계수를 상세하게 측정하였으나, 유동현상과 열전달 간의 상관관계를 규명할 필요가 있음을 지적하였다.

발열부의 열적조건을 좀더 구체화한 것이 복합 열전달(Conjugate Heat Transfer) 문제이다. 전도와 대류의 연관된 과제로써, Hijikata⁽¹⁴⁾는 모재에 내장된 사각열원에 의해 형성된 온도 분포를 비교적 자세히 연구하였으며, Anderson⁽¹⁵⁾은 복합 열전달의 열전달 계수를 산출할 수 있는 방법을 제시하고 있으나 이들은 모두 열원이 채널 벽면과 동일하거나 내장되어 있는 경우이다. 최근 들어 Nakayama와 Park⁽¹⁶⁾은 간단히 모사한 돌출된 모듈에서의 열 이동에 관한 실험을 통해 강제대류 및 전도에 의한 기관으로의 열전달에 관한 연구를 수행하였으며, Chung과 Li⁽¹⁷⁾는 냉각성능을 향상시킬 수 있는 새로운 형상을 제시하였다. Choi 등⁽¹⁸⁾은 대류 냉각에 미치는 모재의 열전도율의 영향을 검토하여 발열부내의 최대온도, 냉각유체의 온도상승 및 모듈 표면으로부터의 열전달 계수 등을 조사한 바 있으나, 대부분의 연구가 그 형상을 단순화하였으며, 열적조건 또한 모듈 전체를 동일 조건

(등온 또는 균일 열유속)으로 가정하고 있다. 그러나 실제 모듈에서 발생한 열량은 모듈의 표면으로부터 공기로의 대류와 I/O pin들로 구성된 연결부로의 전도 등이 고려되어야 하며 특히 칩(chip)이 고용량화되어 pin의 수가 증가할수록 연결부의 전도에 의한 열 이동은 중요한 변수가 된다.

따라서 본 연구에서는 실제 칩 모양과 유사한 모델을 선택하여 칩 주위의 열전달 특성에 미치는 제인자의 영향을 검토하여 유동현상과 열전달 특성을 규명하고자 한다.

2. 이론적 연구

2.1 해석 모델

본 연구에서 채택한 모델의 기하학적 형상은 Fig. 1과 같다. 이때 돌출된 블록의 길이, 높이는 각각 50 mm, 10 mm이며 채널 간격은 20 mm이고 길이 방향 전도가 이루어지는 수직벽면의 두께는 10 mm이다. 채널을 구성하는 외부벽면을 단열시켰을 때, 블록의 표면 등 발열면의 위치에서 발생된 열량은 블록 표면으로부터 공기로의 직접적인 열전달, 전도과정을 통한 후 블록 위·아랫면에서의 열전달 및 블록에서 수직벽면으로의 전도에 의하여 채널내 공기로 유입된다. 공기의 유동은 2차원, 정상 상태의 Boussinesq 근사를 적용한다.

2.2 지배방정식 및 경계조건

이상의 모델을 대상으로 채널내 공기에 의한 대류 및 돌출된 블록내의 전도를 고려한 복합 열전달 과정은 다음의 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식 들로 표시된다

연속 방정식 :

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

운동량 방정식 :

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta (T - T_{in}) - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

에너지 방정식 :

유체 영역 :

$$\rho \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{k_f}{c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

발열 부분 :

$$k_b \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q''' = 0 \quad (5)$$

고체 영역 (블록 및 수직벽면) :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (6)$$

● 경계조건

이상의 방정식에서 해를 구하기 위한 경계조건은 다음과 같다.

- 1) $x=0$ 에서, $u = u_{in}, v = 0, T = T_{in}$
- 2) $y=0$ 에서, $u = v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0$
- 3) $y=b+w$ 에서, $u = v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0$
- 4) $x=20L$ 에서, $\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0$

2.3 수치해석 절차

지배방정식 (1)~(6)은 온도에 대한 검사체적의 속도에 대한 체적과 엇갈리게 형성되도록 하는 유한 차분법에 의해 이산화 된다. 이때 온도의 검사체적 표면은 서로 다른 재질을 갖는 접촉면과 일치하도록 구성하며, 대류확산에 의한 플럭스는 하이브리드 도식(hybrid scheme)을 사용한다. 특히 이질의 재질에 의한 급격한 확산이 존재하는 고체와 유체 사이의 경계 면에서는 Patankar가 제안한 조화 평균식(Harmonic mean formulation)을 적용한 유효 확산계수를 사용하면 경계면 주위에 과도한

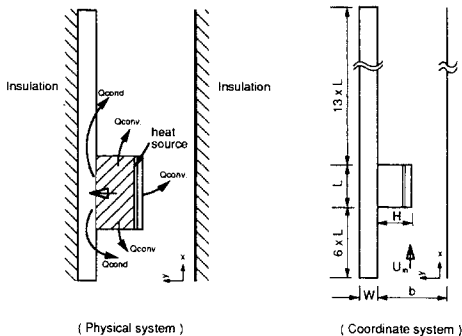


Fig. 1 Schematic diagram of the physical and coordinate system

격자의 밀집을 방지할 수 있다. 속도 및 부력 향으로 서로 연관된 운동량 방정식 및 에너지 방정식의 차분화된 이산화 방정식은 선순법(line-by-line)과 TDMA(Tri-Diagonal Matrix Algorithm)를 이용한 SIMPLE(Patankar, 1980) 기법을 적용하여 반복 계산하였다. 해의 수렴은 전체 계산 영역의 표준화된 오차의 합이 0.001보다 작을 때 만족된 것으로 하였다.

유체와 고체를 분리하여 지배 방정식을 설정하였을지라도, 수치 해석적으로는 고체 영역에서의 각 방향 속도 u, v 를 0으로 설정하고, 열발생 부분 및 전도 영역인 고체내에서의 생성 항을 적절히 삽입함으로써 전체 유체 및 고체에 대한 하나의 에너지 방정식을 사용하면 돌출부 경계 면에서의 불확실한 열경계 조건을 고려할 필요 없이 용이하게 해석할 수 있다.

3. 실험 방법

Fig. 1과 같은 형상의 블록은 합성수지(bakelite)를 사용하였으며, 블록의 표면에는 스테인리스 박판을 접착제(Aralite, CIBA-GEIGY)로 부착하여 발열체를 만든 후, 이 블록을 20 mm 두께의 단열재(styrofoam)를 사용하여 단일시킨 10 mm 두께의 합성수지 판에 접착시켜 채널을 구성하였다. 이 채널은 가변 팬에 의해 공기를 흡입하는 가로 300 mm, 세로 300 mm, 길이 1000 mm의 시험부를 갖는 수직 공기 풍동내에 설치하였으며, 채널 내의 공기속도는 LDV를 사용하여 측정하였다. 블록 표면온도는 그 표면과 스테인리스 박판 사이에 삽입된 T형 열전대(AWG 28)를 온도 계측기(Keithley 740/7402)와 연결하여 측정하였으며, 교정된 션트(shunt)와 계수형 전압계를 사용하여 직류전력 공급기(DC power supply)로부터 스테인리스 박판에 공급되는 전력을 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

국소 열원이 부착된 사각 블록이 수직 채널 내에 놓여 있을 때, 이 열원으로부터의 대류와 전도를 포함하는 복합 열전달을 조사하기 위하여, 국소 발열면의 위치, Re 수($Re=430, 870, 1740, 3500$)와 발열량($Gr=3.27 \times 10^7, 6.55 \times 10^7, 9.82 \times 10^7$), 블록과 수직벽면의 열전도율의 변화($k_b/k_f=1, 10, 56,$

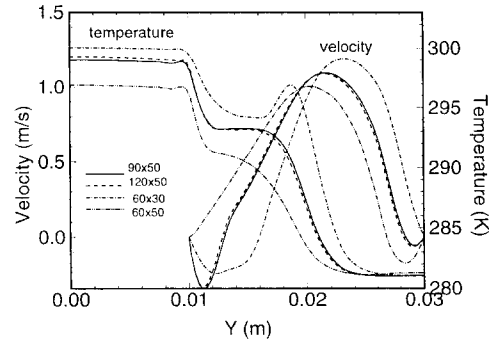
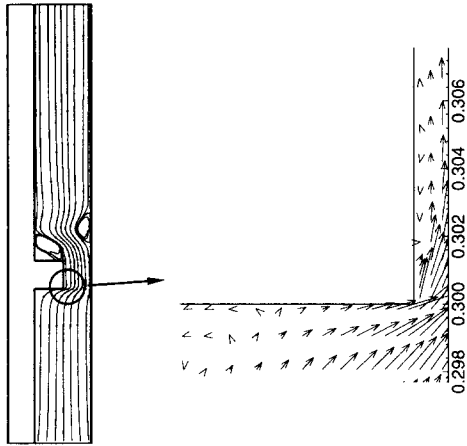


Fig. 2 Velocity and temperature distributions across the channel at different grid sizes

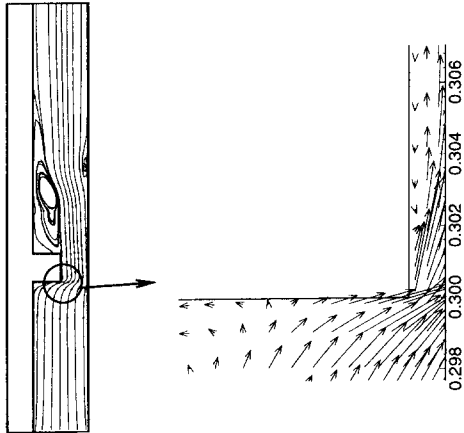
5600) 등 제반 인자의 영향을 조사하였다.

계산 영역내의 격자는 고체벽면 부근에서 조밀하도록 구성된 비균일 격자계를 사용하였으며, 격자계의 구성과 무관한 해를 얻기 위해서 Fig. 2와 같이 여러 경우의 격자계에 대한 속도분포 및 온도분포를 시험한 결과, 적정 격자계를 $N_x \times N_y = 90 \times 50$ 으로 구성하였다. 적정 격자계를 선정하기 위한 검증 작업으로 Fig. 2에서 유동의 변화가 심한 블록 윗면의 중간지점($y=0.015$ m)의 재순환 영역에서 각 격자계의 속도와 온도 값의 차이를 비교하였다. 격자 개수를 60×30 으로부터 y 방향 개수(60×50), x 방향 개수($90 \times 50, 120 \times 50$)를 증가시켜 비교한 결과 각각의 속도 차이 값은 0.67(m/s), 0.226(m/s), 0.02(m/s)로 변화되었으며, 온도 차이 값은 3.84(K), 2.84(K), 0.08(K)로 감소하여 그 값이 수렴함을 볼 수 있다. 따라서 본 계산에서는 계산 시간과 계산 결과의 정확도를 고려하여 90×50 을 적정 격자계로 채택하였다.

채널 내 유동의 구조를 살펴보기 위하여 Fig. 3에 각각의 유입속도에 따른 유선을 나타내었다. Fig. 3(a)는 $u_{in}=0.488$ m/s일 때 채널 내의 유선의 분포로써, 유동이 블록에 접근함에 따라 조밀하게 분포된 후 블록면을 지나면서 단면의 급확장으로 인한 박리가 일어난 후 수직벽면에서 재부착함을 보이고 있으며, 이 재부착점과 블록 사이에 재순환 영역을 형성하고 있다. 또 단열 벽면에서는 이 재부착점에 대응하여 단면의 급확장에 의한 강한 역압력구배(adverse pressure gradient)의 작용으로 부가적인 재순환 영역이 형성된다. 확대된 그림과 같이 블록 아랫면의 구석에서도 미세한 재순환 영역이 형성되며, 블록의 선단에서는 단면의 축소로



(a) $U_{in}=0.488$ m/s



(b) $U_{in}=0.976$ m/s

Fig. 3 Streamlines and velocity vectors for $Q=107.56$ W/m

인하여 제트류와 같은 찬공기의 가속된 유동과 분리된 기포(separation bubble)가 형성된다. 속도를 $u_{in}=0.976$ m/s로 증가시키에 따라(Fig. 3(b)) 이 기포의 크기와 재부착 길이는 증가하고 부가적인 재순환 영역 또한 재부착점과 함께 유동의 하류로 이동한다.

Fig. 4는 유동이 채널 입구로부터 진행됨에 따라 각 단면에서 변화하는 속도 및 온도 특성을 나타내고 있다. 입구에서 $u_{in}=0.488$ m/s로 균일한 속도의 경계층이 성장됨에 따라 각 단면에서의 최대속도는 증가되고 있으며, $x=0.28$ m에서는 블록의 방해로 인해 속도분포가 수직벽면으로 치우치게 되며 블록을 따라 단면이 축소된 유동 영역에서는 가속

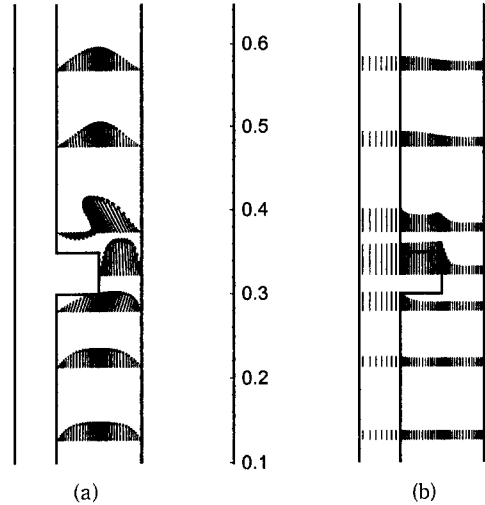


Fig. 4 Flow and temperature characteristics for $Q=107.56$ W/m, $U_{in}=0.488$ m/s

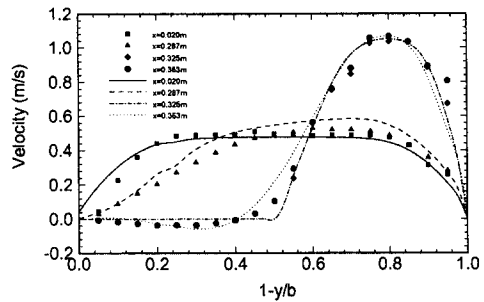


Fig. 5 Comparison of velocity distribution with experiment for $U_{in}=0.4$ m/s, $Q=77$ W/m

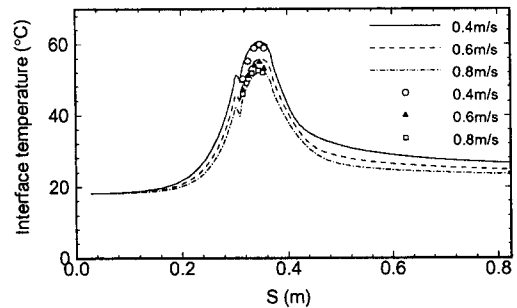


Fig. 6 Solid-fluid interface temperature for $Q=77$ W/m, $k_b/k_f=k_s/k_f=56$

된 속도분포를 보이고 있다. 블록을 지난 $x=0.37$ m에서의 음의 속도는 재순환 영역을 나타내며 재부착점까지 비대칭적인 속도분포를 나타낸 후 재발달하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 입구 공기

의 균일 온도가 유동이 진행됨에 따라 변화하는 온도 특성을 나타내고 있다. 발열면으로부터 수직벽면을 통한 전도에 의한 열전달, 발열 표면으로부터의 대류 열전달에 의한 열경계층 성장($x=0.32\text{ m}$), 전도에 의해 수직 벽면의 온도증가 및 발열면의 영향에 의해 최대점이 형성됨($x=0.37\text{ m}$)을 나타내고 있다.

Fig. 5는 $u_{in}=0.4\text{ m/s}$ 일 때 블록 주위에서의 x -방향 속도를 LDV에 의해 측정된 실험값과 비교하여 나타낸 것이다. 블록 하류 재순환 영역의 음(-) 속도측정은 산란입자의 부족으로 그 재현성이 부족하였으나 그 외의 속도는 비교적 잘 일치하였다.

Fig. 6은 $k_s/k_f=k_b/k_f=56$ 의 조건일 때 채널 입구로부터 출구까지 공기와 접촉하고 있는 고체벽면을 따라 변화하는 온도분포를 나타내고 있다. 기호로 표시된 실험결과와 비교하였을 때 약간 오차는 있으나 비교적 잘 일치하고 있다. 돌출된 발열표면의 길이는 $0.31\text{ m}\leq s\leq 0.36\text{ m}$ 이며, $0.30\text{ m}\leq s\leq 0.31\text{ m}$ 는 블록 아랫면을 나타낸다. 블록 아래의 수직벽면의 표면온도는 블록표면에서 발생된 열의 전도에 의해 T_{in} 으로부터 점진적으로 증가한 후 블록의 구석에서 급격한 상승을 한다. $s=0.30\text{ m}$ 는 수직면과 블록이 접촉하는 구석을 나타내며, 공기의 정체로 인한 이곳의 상대적으로 높은 온도는 $s=0.31\text{ m}$ 즉, 발열표면에 도달함에 따라 차가운 공기와 직접 접촉함으로써 급격한 온도강하를 나타낸다. 발열 표면의 최대온도는 블록의 중앙으로부터 10 mm 하류에서 나타나며, 하류로 갈수록 점진적 감소를 한다. 공급된 공기속도가 증가할수록 대류에 의한 냉각이 증가하여 최대온도는 감소되고 그 위치는 블록의 하류로 이동하며 돌출부의 열원에 의한 하류

벽면의 온도상승이 현저하게 감소된다.

블록과 수직벽면의 열전도율 비의 영향이 접촉표면의 온도에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. $k_s/k_f=k_b/k_f=1.0$ 즉, 블록의 열전도율이 매우 낮은 경우에는 블록을 통하여 이루어지는 전도에 의한 열발산량이 적어 블록 표면의 온도가 매우 높으며, 최대온도는 블록의 말단부에서 나타난다. 블록 내부의 낮은 열전도율에 의해 블록 위·아래 구석의 온도는 저온이 되며, 이 저온의 재순환유동에 의해 블록 윗면은 냉각되나 유동이 정체된 구석에서 국소적인 극대값이 형성된다. 수직벽과 블록의 열전도율이 $k_s/k_f=k_b/k_f=56$, $k_s/k_f=k_b/k_f=100$ ($k_f=0.026\text{ W/m}^2\text{C}$)과 같이 증가됨에 따라 표면의 온도가 감소되고 있으며, 블록의 열전도율이 $k_b/k_f=5600$ 과 같이 높아지면 낮은 온도가 전체 블록 표면에 걸쳐서 균일하게 분포한다. 즉, 블록의 열전도율비가 커질수록 전도에 의한 주위로의 열발산이 증가함으로써 최대온도는 낮아지고 블록 전후에서의 상승된 온도분포를 나타내고 있다.

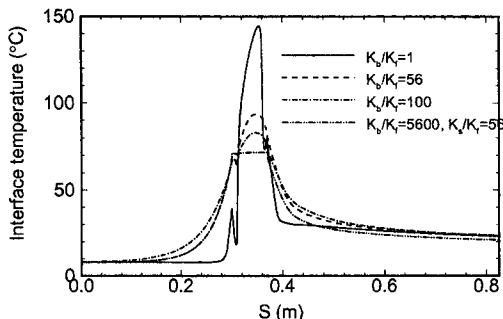
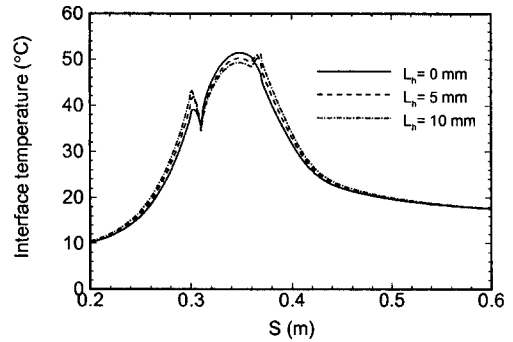
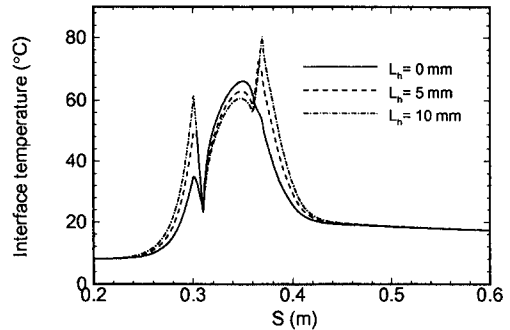


Fig. 7 Solid–fluid interface temperature for $U_{in}=0.488\text{ m/s}$, $Q=107.56\text{ W/m}$



(a) $k_b/k_f=56$



(b) $k_b/k_f=10$

Fig. 8 Solid–fluid interface temperature for $Q=53.78\text{ W/m}$, $U_{in}=0.488\text{ m/s}$

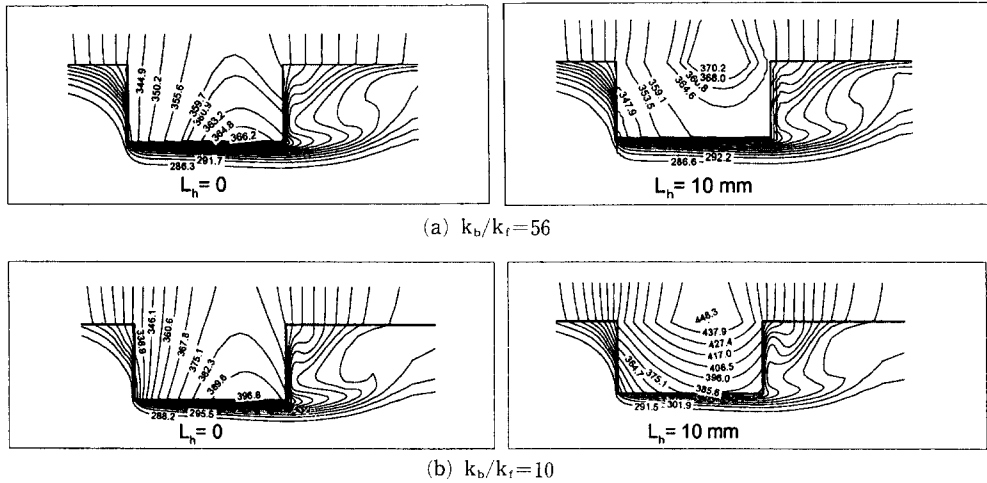


Fig. 9 Isothermal contours of block for $Q=107.56 \text{ W/m}$, $U_{in}=0.488 \text{ m/s}$

Fig. 8은 발열부의 위치를 돌출부의 표면 ($L_h=0$) 으로부터 접합부 ($L_h=10 \text{ mm}$)까지 변화시켰을 때 블록 표면과 블록 근처의 수직벽 표면의 온도분포를 나타낸 것이다. $k_b/k_f=k_b/k_f=56$ 일 때 발열면이 블록의 내부로 삽입됨에 따라 블록 표면의 온도는 감소되나, $s=0.3 \text{ m}$ 와 $s=0.37 \text{ m}$ 인 블록 위·아랫면 구석의 온도가 상승한다. 블록의 열전도율이 감소하면 블록 내부로부터 열발산이 지체되어 Fig. 8(b)와 같이 위·아랫면 구석에서의 온도가 급격하게 상승함으로써 중요한 열적 장애 요인이 될 수 있음을 나타낸다.

Fig. 9는 발열부의 위치에 따른 블록내부의 최대 온도 및 그 위치를 나타내고 있는 등온선으로서 내부의 숫자는 절대 온도를 나타낸 것이다. 열전도율비가 비교적 높은 $k_b/k_f=56$ 의 경우에는 블록의 접합면에 발열부가 있을지라도 발열부와 표면의 최대 온도 차이가 작으나 (4°C), $k_b/k_f=10$ 이면 양면의 최대 온도차가 51.5°C 가 되어 열전도율이 낮은 재료의 블록에서는 발열부의 위치가 열적으로 중요한 인자가 됨을 알 수 있다.

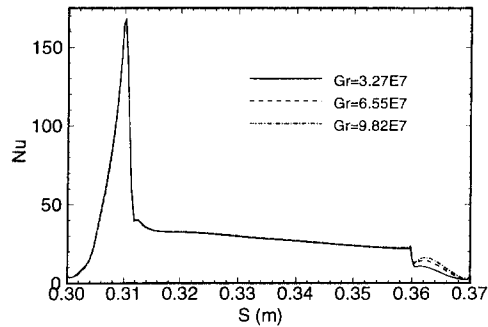
Fig. 10은 $Nu = hL/k_f = \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_w L / (T_w - T_m)$ 로써 정의된 블록 각면에서의 국소 Nu 수를 나타내고 있다. Fig. 10(a)는 $Re=1740$ 일 때 발열량 변화 ($Gr=3.27 \times 10^7, 6.55 \times 10^7, 9.82 \times 10^7$)에 따른 블록 아랫면 ($0.3 \text{ m} \leq s \leq 0.31 \text{ m}$), 윗면 ($0.36 \text{ m} \leq s \leq 0.37 \text{ m}$)과 블록 위·아래 수직 벽면 3단면에서의 국소 Nu 수를 나타낸다. Nu 수는 $s=0.3 \text{ m}$ 에서 $s=0.$

31 m 로 갈수록 차가운 공기와의 직접적인 접촉에 의하여 급격하게 증가하고, 선단에서 급격한 Nu 수의 강하를 보인 후 유동이 진행됨에 따라 열 경계층의 성장과 함께 완만하게 감소한다. 이 급격한 Nu 수의 변화는 선단으로부터 2 mm 이내에서 제트류와 같이 분사되어 가속된 속도분포 (Fig. 3(b))에 기인된다. 블록 윗면에서는 재순환 영역의 재순환 속도에 비례하여 미세한 극대값을 가지며, 재순환 유동이 강해짐에 따라 극대값은 증가하고, 그 위치는 블록 윗면의 구석으로 이동된다. $Re=1740$ 일 때 블록 가열면의 국소 Nu 수가 발열량의 변화와 무관한 것은 $Gr/Re^{2.5} < 1$ 로써 강제대류가 지배적인 영역에 해당되기 때문이다. 이 국소 Nu 수에 미치는 Gr 수의 영향은 $Gr/Re^{2.5} \approx 1$ 에서 미소한 변화를 시작하여 Gr 수가 증가함에 따라 평균 Nu 수가 $1.46 \leq Gr/Re^{2.5} \leq 4.39$ 일 때 3.8% , $8.3 \leq Gr/Re^{2.5} \leq 24.9$ 에서 9.8% 증가하였다.

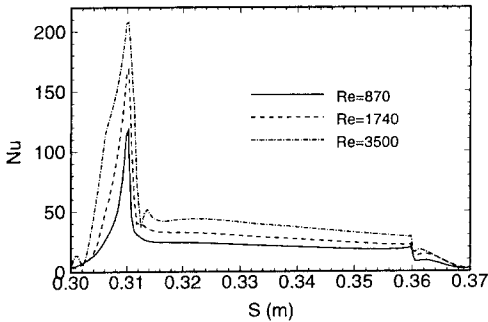
블록의 가열 표면의 국소 Nu 수에 미치는 입구 속도의 영향을 Fig. 10(b)에 나타내었다. Re 수를 $Re=870, 1740, 3500$ 로 증가시켰을 때 가열면으로부터 Nu 수는 Re 수와 비례하여 증가하고 있다. $Re=3500$ 일 때 $s=0.302 \text{ m}$ 와 $s=0.314 \text{ m}$ 부근에서의 Nu 수의 용기는 속도가 증가함에 따른 블록 아랫면에서의 재순환 및 블록 가열 표면 선단의 박리에 의한 기포의 형성에 기인된 것이다. 이 박리는 $Re=870$ 에서는 존재하지 않으나, Re 수가 증가함에 따라 블록 선단으로부터 2 mm 지점에서 형성되기 시작하여, $Re=3500$ 일 때 6 mm 길이의 재순환

영역을 형성한다. Fig. 10(c)는 열전도율에 따른 국소 Nu 수 변화를 나타내고 있다. 열전도가 매우 낮은 경우 ($k_b/k_f=1$) 블록을 통한 열전도에 비해 표면에서의 대류 열전달이 증가하였음을 나타낸 것이며, k_b/k_f 가 증가할수록 대류에 의한 블록 표면에서의 열전달은 감소하며 전체 표면에 걸쳐 균일한 열유속을 나타내고 있다.

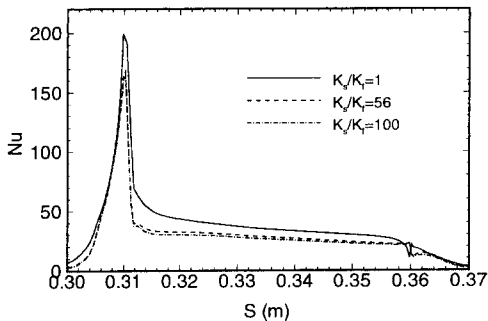
블록의 가열 표면, 위·아랫면, 수직벽면 각 방향으로의 열전달량의 비를 살펴보기 위하여 총공급 열량에 대한 4면 각각으로의 열전달량 비를 Fig. 11(a)에 나타내었다. $Gr=6.55 \times 10^7$ 일 때 Re 수



(a) $Re=435,870,1740, k_b/k_f=56$



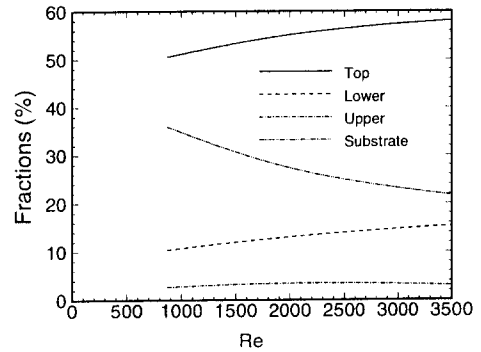
(b) $Gr=6.55 \times 10^7, k_b/k_f=56$



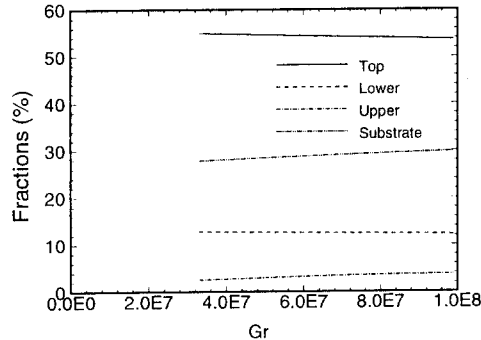
(c) $Gr=6.55 \times 10^7, Re=1740$

Fig. 10 Local Nusselt number distributions along the block surface

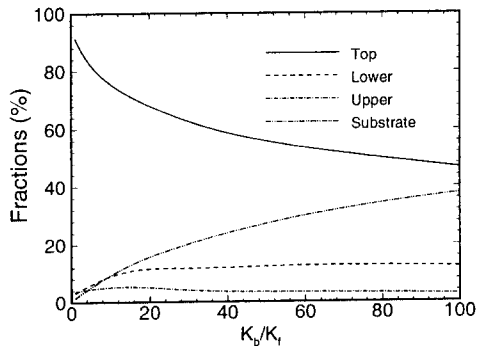
의 증가에 따라 블록 윗면으로의 열전달은 3% 정도로 거의 일정한 반면, 블록의 가열 표면에서는 50%~58%, 블록 아랫면에서는 10%~15%의 대류 열전달 증가가 있으며, 이에 따라 수직벽면으로부터 유체로의 발산량은 36%에서 22%까지 감소한다. Fig. 11(b)는 $Re=1740$ 일 때 Gr 수의 영향이 미미한 강제대류가 지배적인 영역의 경우, 각 부분으로의 열전달량비를 나타낸 것으로써 블록의 가열 표면, 위·아랫면, 수직벽면 각 방향으로의 열전달



(a) $Gr=6.55 \times 10^7, k_b/k_f=56$



(b) $Re=1740, k_b/k_f=56$



(c) $Re=1740, Gr=6.55 \times 10^7$

Fig. 11 Fractions of heat transfer through each surface

상대적 크기를 나타내고 있다. 그림 설명의 k_b/k_f 는 $Re=1740, Gr=6.55 \times 10^7$ 을 고정하였을 때 k_b/k_f 에 대한 Q_{conv}/Q 및 Q_{cond}/Q 의 변화를 나타낸다. Q_{conv} 는 대류에 의해 블록 3면으로부터 공기로 전달된 열량이며, Q_{cond} 는 블록의 전도에 의한 수직벽면으로부터 공기로의 열전달량이다. Q_{conv}/Q 는 블록의 열전도율이 증가함에 따라 급격하게 감소하며, Re 수에 비례하나 Gr 수의 영향은 미미하다 할 수 있으며 그 상관 관계식은 $Q_{conv}/Q=68.2(Gr/Re^{2.5})^{-0.053}$, $Q_{cond}/Q=31.2(Gr/Re^{2.5})^{0.136}$ 과 같이 나타낼 수 있다. 또한 Re 수가 작고 열전도율비가 클수록 전도의 영향이 증가함을 나타내고 있다.

Fig. 13은 블록내의 최대온도에 미치는 각종 인자의 영향을 나타낸 것이다. $k_b/k_f=56, Re=1740, Gr=6.55 \times 10^7$ 일 때 블록내의 최대 온도와 외기 온도와의 차이 $\Delta T=84^\circ C$ 임을 알 수 있다. 이 최대 온도차는 Gr 수와 선형적인 변화를 하며 열전도율비가 증가함에 따라 감소하며 이 비가 작을 때 ($k_b/k_f < 20$) 는 k_b/k_f 에 매우 민감한 변화를 하고 있으나, $k_b/k_f > 56$ 에서는 그 변화가 완만하여 랭의 비는 Gr 수와 무관하게 55%, 15%, 30% 정

도로 거의 일정하였다. Fig. 11(c)는 블록의 열전도율의 증가에 따라 변화하는 열 이동을 나타내고 있다. 열전도율 비가 낮을 경우에는 대부분의 발열량이 대류에 의해 블록 표면에서 발산되나, 열전도율 비가 증가함에 따라 블록 표면으로부터의 대류에 의한 열전달은 급격하게 감소한다. 블록의 내부를 통한 전도량의 증가로 수직벽면의 온도가 높아지며 또한 이 온도가 높아지는 수직벽면의 범위 즉 열영향부의 확대에 인하여 수직벽면을 통한 공기로의 열방출이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 12는 $k_b/k_f=56, Re=1740, Gr=6.55 \times 10^7$ 을 기준으로 각각의 인자가 Q_{conv}/Q 에 미치는 영향의 열전도율의 영향이 감소한다. 유입공기 속도의 증가에 따라 블록 표면의 최대온도는 감소하며, $Re < 1700$ 이면 Re 수는 k_b/k_f 보다 더욱 민감하게 표면 온도 변화에 영향을 미친다. 열전도율비가 비교적 높으면 ($k_b/k_f=56$) 발열면의 위치변화 (L_h) 에 따른 최대 온도차는 무시할 수 있으나, 열전도율이 낮을수록 ($k_b/k_f=10$) 블록내부의 발열면에서의 온도차가 급상승하므로 발열부의 위치에 주의를 요한다.

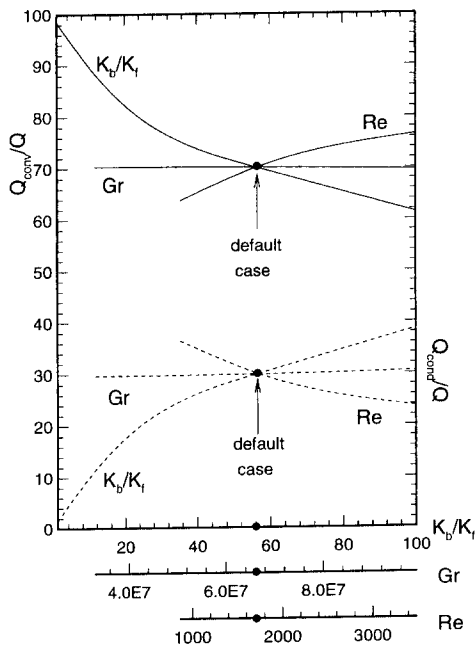


Fig. 12 Relative effect of each parameter on the Q_{conv}/Q (—) and Q_{cond}/Q (---)

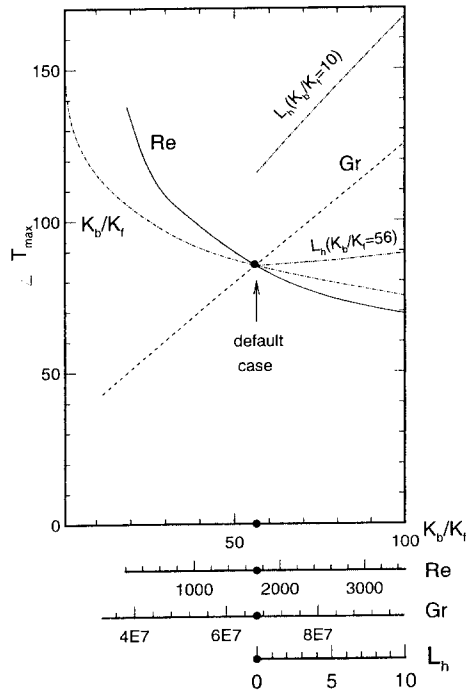


Fig. 13 Relative effect of each parameter on the maximum temperature

5. 결 론

국소 열원이 부착된 사각 블록이 수직 채널내에 놓여있을 때, Re 수 ($Re=430, 870, 1740, 3500$), 발열량 ($Gr=3.27 \times 10^7, 6.55 \times 10^7, 9.82 \times 10^7$), 블록의 열전도율의 변화 ($k_b/k_f=1, 10, 56, 5600$), 국소 발열면의 위치 등 제반 인자가 채널내 유동의 복합 열전달에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Re 수 1740에서 형성된 블록 아랫면 구석의 재순환 영역과 블록의 선단 2 mm 지점에서 박리된 기포는 Re 수, Gr 수의 증가와 함께 증대된다.

(2) 블록의 국소 Nu 수는 블록의 선단에서 최대 값을 가지며, 선단으로부터 2 mm내에서 급격하게 감소한 후 경계층 성장과 함께 완만한 감소를 한다. Gr 수의 증가에 따른 국소 Nu 수에 미치는 영향은 $Gr/Re^{2.5} \approx 1$ 에서 미소한 변화를 시작하여 평균 Nu 수가 $1.46 \leq Gr/Re^{2.5} \leq 4.39$ 일 때 3.8%, $8.3 \leq Gr/Re^{2.5} \leq 24.9$ 에서 9.8% 증가하였다.

(3) 블록 표면으로부터 대류에 의한 열전달 및 블록 내부를 통한 전도에 의한 열전달은 $Gr/Re^{2.5} \leq 1$ 일 때 예민하게 변화되며 각각

$$Q_{conv}/Q = 68.2 (Gr/Re^{2.5})^{-0.053},$$

$$Q_{cond}/Q = 31.2 (Gr/Re^{2.5})^{0.136}$$

같은 상관 관계식으로 나타낼 수 있다.

(4) 블록내의 최대온도에 미치는 Re 수, Gr 수 및 열전도율 등의 상대적 영향력을 고찰함으로써 적정온도를 유지할 수 있는 지표를 제시하였다.

후 기

이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Peterson, G. P. and Ortega, A., 1990, "Thermal Control of Electronic Equipment and Devices," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 20, pp. 181~314.
- (2) Incropera, F. P., 1988, "Convection Heat Transfer in Electronic Equipment Cooling,"

Trans. ASME, J. Heat Transfer, Vol. 110, pp. 1097~1111.

- (3) Nakayama, W., 1986, "Thermal Management of Electronic Equipment ; A Review of Technology and Research Topics," *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 39, No. 12, pp. 1847~1868.
- (4) Ramanathan, S. and Kumar, R., 1991, "Correlations for Natural Convection between Heated Vertical Plates," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 97~107.
- (5) Bar-Cohen, A. and Roshenow, W. M., 1984, "Thermally Optimum Spacing of Vertical, Natural Convection-Cooled, Parallel Plates," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 116~123.
- (6) Jaluria, Y., 1985, "Interaction of Natural Convection Surface," *Trans. ASME, J. of Heat Transfer*, Vol. 107, pp. 883~892.
- (7) Afrid, M. and Zebib, A., 1989, "Natural Convection Air Cooling of Heated Components Mounted on a Vertical Wall," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 15, pp. 243~259.
- (8) Ortega, A. and Moffat, R. J., 1985, "Heat Transfer from an Array of Simulated Electronic Components," *Heat Transfer in Electronic Equipment*, ASME HTD-Vol. 48, pp. 5~15.
- (9) 최용문, 박경암, 1993, "장방형 발열체가 부착된 채널에서 자연대류연구," 대한기계학회 논문집, 제17권, 제2호, pp. 438~444.
- (10) Braaten, M. E. and Patankar, S. V., 1985, "Analysis of Laminar Mixed Convection in Shrouded Arrays of Heated Rectangular Blocks," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 28, No. 9, pp. 1699~1709.
- (11) 이재현, 남평우, 박상동, 조성환, 1989, "전자장비 채널에서의 혼합대류에 관한연구," 대한기계학회논문집, 제13권, 제4호, pp. 771~779.
- (12) Kang, B. H., Jaluria, Y. and Tewari, S. S., 1990, "Mixed Convection Transport from an Isolated Heated Source Module on a Horizontal Plate," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 653~660.
- (13) 유성연, 광영만, 1993, "나프탈렌 승화법을 이용한 모사 전자칩에서의 열전달 현상에 관한연구," 대한기계학회, 추계학술대회논문집(II),

- pp. 173~177.
- (14) Hijikata, K., Nakayama, W., Nagasaki, T., Karazue, R. and Fushinobu, K., 1991, "A Study on Heat Transfer from Small Heating Element in an Integrated Circuit Chip," *Proc. ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference*, Vol. 4, pp. 93~98.
- (15) Anderson, A. M., 1994, "Decoupling Convection and Conductive Heat Transfer Using the Adiabatic Heat Transfer Coefficient," *Trans. ASME, J. Electronic Packaging*, Vol. 116, pp. 310~316.
- (16) Nakayama, W. and Park S. H., 1992, "Experimental Study of Conjugate Heat Transfer from an Air-Cooled Module on the Board," *Proc. 2nd JSME/KSME Thermal Engineering Conference*, pp. 393~398.
- (17) Chung, B. T. F. and Li. H. H., 1995, "Forced Convective Cooling Enhancement Through a Double Layer Design," *Trans. ASME, J. Electronic Packaging*, Vol. 117, pp. 69~74.
- (18) Choi, C. Y., Kim, S. J. and Ortega, A., 1994, "Effects of Substrate Conductivity on Convective Cooling of Electronic Components," *Trans. ASME, J. Electronic Packaging*, Vol. 116, pp. 198~205.