

열원이 부착된 수평 평판에서 복합 열전달에 관한 연구

김 병 철[†], 주 동 인^{*}
조선대학교 기계공학과, *조선대학교 대학원

A Study on the Conjugate Heat Transfer from Horizontal Plate with Protruding Heat Source

Byung-Chul Kim[†], Dong-IN Ju^{*}

Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Kwangju 501-759, Korea

*Graduate School, Chosun University, Kwangju 501-759, Korea

(Received March 11, 2002; revision received April 23, 2002)

ABSTRACT: The real chip and similarity model were used to investigate the thermal behavior and velocity distribution of air from the heat source with the location and the amount of heat experimentally and numerically, and compared. The heat generated in the block is not cooled by convection and show the high temperature by the stagnation of heat flow. After maintaining the high temperature of block by the natural convection, the sudden drop of temperature with the air flow was shown in the channel but the decreasing rate was small with the time. The inward block was effected by infinitesimal air flow generated between block and channel and outward block was effected by the entry condition.

Key words: Heat flow(열흐름) Natural convection(자연대류) Air flow(공기흐름) Amount of heat(열량)

기호설명

μ : 점성계수

β : 열팽창계수

u : 속도

q'' : 열유속

h : 대류 열전달계수

p : 압력

Pr : Prandtl 수

Nu : Nusselt 수

그리스 문자

ρ : 밀도

1. 서 론

고도의 연구개발에 따른 전자제품의 성능향상으로 전자장비의 수명(life cycle)이 짧아지고 있으며 이와 함께 전자장비에서의 발생열량에 대한 문제가 대두되고 있다.

이에 대한 방편으로 전압을 낮추어 발열량을 줄이는 방법이 시도되고 있으나 고속의 처리속도로 인하여 발열량이 한층 더 증가되고 있으므로 낮은 가격대를 유지하면서 제품의 열성능을 예측하여 설계기간을 단축하는 기술과 전자장비의 냉각능력을 가능한 최대로 하여 작동에 문제가 발생하지 않도록 많은 연구가 이루어지고 있다.⁽¹⁻²⁾

[†] Corresponding author

Tel.: +82-62-510-9632; Fax: +82-62-525-0445

E-mail address: bckim@chosun.ac.kr

전자부품이 일정한 간격으로 놓여 있는 수평기판 위에 완전히 발달된 속도분포로 공기가 유입될 경우, 균일하게 발열되는 전자부품에 의해 발생되는 부력에 의해 압력강하가 커지나 발생되는 열전달 증가량이 압력강하에 의한 손실보다 커서 냉각에 효과가 있음을 Braaten and Patankar⁽³⁾은 보고하였고, 또한 Kang et al.⁽⁴⁾은 수평 평판 위에 설치된 발열체에서의 온도증가는 혼합대류의 열전달계수($Gr/Re^{5/2}$)에 많은 영향을 받으며, 순수 자연대류로부터 강제대류로의 천이과정과 둘출부의 각 위치에 따른 국소 열전달을 연구하여 2차 경계층 시작점에서 최대 국소 열전달계수를 구하였다. 이외에도 모사된 전자장비의 칩이나 모듈에서 강제대류를 사용한 냉각방식에 관한 많은 연구가 여러 연구자들에 의해 수행되었다.⁽⁵⁾ 대류 열전달에 대한 개괄적인 연구현황이 Incropera⁽⁶⁾에 의해 보고된 이후, Jaluria⁽⁷⁾는 수직으로 위치한 단일 벽면에 균일한 열유속을 갖는띠(strip)가 분산된 경우와 열전달의 궤적(path line)과 후류(wake)에서의 유동상태, 그리고 열원으로부터 떨어진 벽면에서의 유동 및 온도분포를 수치적으로 해석하여 부품간격이 표면온도에 미치는 영향을 보고하였고, Afrid and Zebib⁽⁸⁾은 단일 벽면에 둘출된 균일하게 발열되는 열원으로부터 열전달을 연구하여 최대온도와 열발생률의 선형적인 관계를 규명하였으나, 이들 대부분은 유입되는 공기를 거의 완전히 발달된 경우로 취급하였으며, 모듈 표면으로부터 대류와 흔들로 구성된 연결부로의 전도 등이 고려되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 전자장비 채널 내 실제 칩 모양과 전자부품의 칩이 부착되어 있는 유사한 모델을 선택하여 발열량, 발열위치에 따른 열적거동, 공기 속도분포가 칩 주위의 특성검토, 유동현상과 열전달의 상관관계, 유사조건에 대한 수치적 해석 및 실험결과 분석을 실시하여 발열부를 포함하는 수평 채널 내에서 발열부의 방출 열량에 따른 복합 열전달에 대한 특성을 해석하고자 한다.

2. 수치해석방법과 지배방정식

수치해석적 방법은 상용 코드인 FLUENT Ver 5.3을 이용하였으며, FLUENT는 유한체적법을 사용하는 프로그램이다. 수치적 해의 수렴과정을

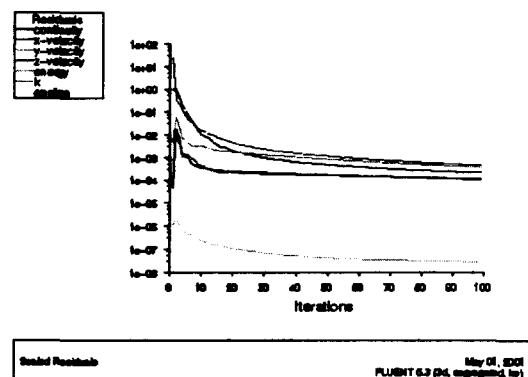


Fig. 1 The complete residual history.

Fig. 1에서 보여주고 있는데 온도에 대해서는 해의 정확성을 높이기 위하여 1.0×10^{-6} 이하에서 수렴된 것으로 판정하였다. 본 과정을 수행하기 위하여 덱트에 사용된 격자는 많은 양의 메모리와 계산시간을 요구한다. 따라서 구조상 z 방향으로는 대칭적으로 이루어져 있으므로 채널의 반절만 계산하기로 하였다. 유동이 급격하게 변하는 곳에는 많은 격자를 주었고, 그외의 유동에서는 점차적으로 격자의 간격을 늘려나가는 방법을 사용하였다. 총 사용된 격자의 수는 577,422개이다.

발열체에서 발생된 열량은 발열체 표면으로부터 상부로는 대류에 의하여 공기로 전하여지며, 발열체의 하부로는 전도에 의하여 열이 전도된 후 하부 표면에서부터 대류에 의하여 열이 전하여진다. 자연대류와 강제대류의 혼합된 공기유동과 둘출부 내의 전도를 고려한 복합 열전달과정은 다음의 식들로 표시할 수 있다.

(1) 연속방정식

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

(2) 운동량방정식

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta (T - T_0) - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

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

(3) 에너지방정식

1) 유체영역

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

2) 발열영역

$$k_b \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q = 0 \quad (5)$$

3) 일반고체영역

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

(4) 경계조건

- 1) $x=0$ 에서, $u=u_0$, $v=0$, $T=T_0$
- 2) $y=0$ 에서, $u=v=0$, $\partial T/\partial y=0$
- 3) $y=b+w$ 에서, $u=v=0$, $\partial T/\partial y=0$
- 4) $x=20L$ 에서, $\partial u/\partial x=0$, $\partial T/\partial x=0$

3. 실험장치 및 방법

Fig. 2는 150 mm × 150 mm × 600 mm의 크기로 두께 10 mm의 플라스틱 유리를 사용하여 제작한 실험장치를 나타낸다. 실험부 안쪽에는 간격을 조

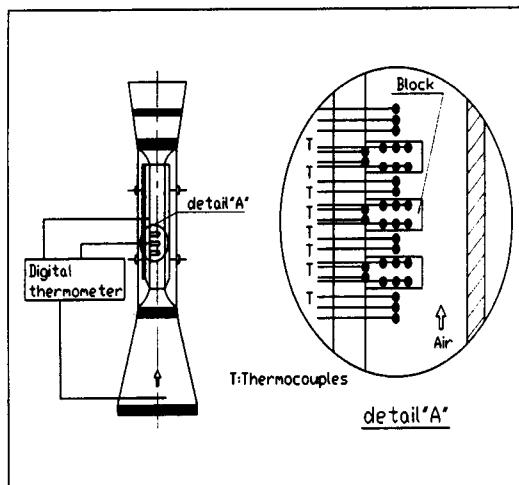


Fig. 2 Measurement points for temperature distribution.

절할 수 있도록 조절장치가 부착된 가변용 채널을 두께 10 mm인 플라스틱 유리로 제작하여 설치하였으며, 이 가변식 채널 내부에 발열체를 부착하여 실험을 실시하였다. 실험부 입구와 출구에는 채널 전체 단면에서 균일한 속도분포를 얻고, 동시에 난류생성을 억제시키기 위하여 직경 7 mm의 스트로(straw)를 70 mm 크기로 잘라 사각형태로 제작하고, 그 양측에는 미세철망(mesh #225)을 사용하여 난류생성 억제와 스트로의 이탈을 방지하는 벌집망(honeycomb)을 설치하였다. 최종 출구에는 6개의 날개를 가진 가변식 송풍기를 설치하여 유입 공기량을 조절함으로써 실험부에 공급되는 공기속도를 조절하도록 하였다. 발열체의 모재는 합성수지(bakelite)를 사용하였고 발열을 위한 두께 0.03 mm의 고광택 스테인레스 박판을 사용하였으며 표면온도 측정을 위하여 T 형 열전대(No. 28 gauge; 직경 0.03 mm)를 이용하였다. 자연대류는 외부의 영향에 대한 간섭이 크기 때문에 실험실 내부에 2중 칸막이 장치를 하여 외부 영향이 최소가 되도록 하였으며, 또한 부력의 영향으로 인한 손실의 측정치 변화를 감소시키기 위하여 채널의 윗면과 아래면(확산부 입구와 수축부 출구 부분)에 안내판(guide plate)을 설치하였으며, 동시에 채널과 유리, 그리고 채널 사이에는 스펀지와 테이프를 사용하여 충분한 기밀을 유지하였다. 발열체를 발열시키기 위한 전력공급은 30 A × 30 V인 DC Power Supply를 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 온도분포의 오차범위

Fig. 3에서 보여지는 것과 같이 블록의 중앙에서 수치적으로 해석한 블록 표면에서의 온도와 실험적으로 측정되어진 온도를 발열이 정상상태에 이른 후 발열이 중지된 상태에서 살펴본 결과가 거의 일치하였다. 정상상태 이후 35분이 지나서 실험과 수치값은 차이가 36 K이었으나 그 이후에는 차이가 점차 줄면서 3시간이 지나며 5 K 정도의 차이를 보이고 있다. 왜냐하면 실험에서는 발열체가 채널에 부착되어 있고 채널은 바깥과 단열되어 있기 때문이다. 따라서 발열체의 표면에서 발생되는 발열은 발열체 내면으로 이동한 후 채널로 전도되는 열이 존재하게 된다. 그러나

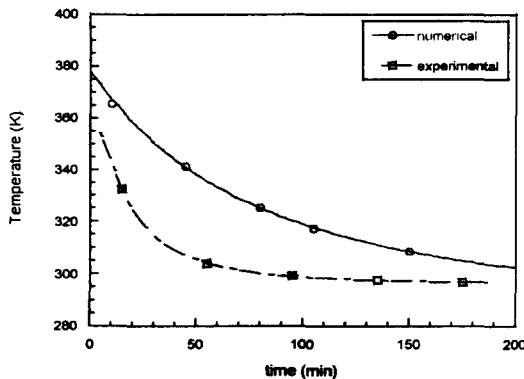


Fig. 3 Comparison of temperature profiles predicted from simulations and from experiment.

수치적으로 해석한 결과에서는 채널은 모두 단열로 처리하였기 때문에 초기의 냉각과정에서 실험에 의한 값과는 많은 차이를 보이고 있다.

수치 해와 정상상태 이후 실현적 해는 35분이 지난 상태에서는 11%의 차이가 발생하나 전체적인 평균값으로 환산해 보면 약 7%의 차이를 보이고 있다. 발열체에서 발열이 이루어질 때에는 채널로 전도되어지는 열량보다 발열되는 열량이 많아서 실험과 수치적인 해는 많은 차이가 있으나 정상상태 이후 수치적인 해는 채널로 이동되어지는 열량은 고려하지 않은 상태이다. 이런 상태에서 실험과의 오차가 전체적으로 7% 이내에 있다면 수치적인 해를 사용할 수가 있다.

4.2 발열 위치변화에 따른 열적 거동

발열체에서 발생되는 열량이 첫번째 블록, 두 번째 블록, 세번째 블록에서 각각 발생이 될 때 전체에 미치는 열적인 거동과 각 블록 주위에서 발생되는 자연대류 변화를 살펴본다.

Fig. 4의 그림과 같이 두번째 블록에서 발열되고 있을 때, 위와 아래의 블록에는 채널 내에 존재하는 공기와의 대류와 블록의 전도에 의해서 첫 번째와 세번째 블록에서는 발열이 없음에도 온도가 주위의 온도보다 상승되고 있음을 볼 수 있다.

발생되는 열량은 블록과 블록 사이에 존재하는 공기와 대류에 의해서 열이 전하여진다. 전하여진 열량은 첫번째 블록의 하단부에 전도되어 블록 내부의 열량을 전도시켜 온도를 높이게 된다. 또한 세번째 블록과의 공기에 의해서 전달된 열

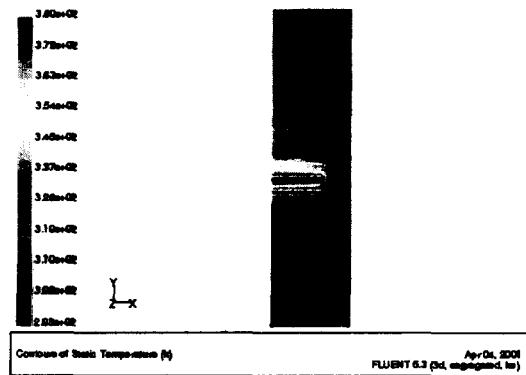


Fig. 4 Contours of temperature distribution at x-y plane (Heating at the 2nd block).

량은 마찬가지로 블록으로 열이 전하여지고 내부의 온도를 높이게 된다. 그러나 블록 표면에서 발생되는 열량은 부력 및 밀도차에 의한 영향으로 세번째 블록 아래보다는 첫번째 블록 윗쪽으로 많은 열량이 이동하게 된다. 그림에서 볼 수 있듯이 위쪽으로는 많은 열량이 이동하고 있음을 보여주고 있지만 아래쪽으로는 적은 열량만이 이동하고 있음을 증명하고 있다. 블록의 열량발생에 의한 부력효과는 블록의 안쪽에 위치한 부분에서 채널을 따라 위쪽으로 보여지고 있다. 부력의 효과에 의해서 발생되어지는 압력의 변화는 블록과 반대편 채널 사이에서 공기의 유동을 유발시키는 결과를 갖게 된다.

Fig. 5은 각 블록에서 발생되는 발생열량이 발열체 위에서 발생되는 부력의 효과를 $x=100$ mm

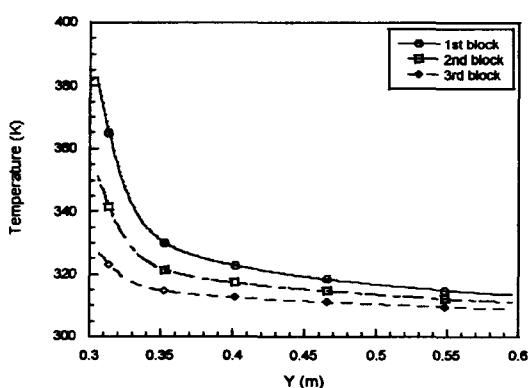


Fig. 5 Temperature distribution of the channel ($x=100$ mm).

위치에서 나타낸 그림이다.

첫번째 블록에서 발열이 되는 경우 가장 높은 온도 365K를 나타내며 채널 위로 50mm 진행하면서 급격한 온도의 하강을 보이고 이후 완만한 온도의 분포를 보인다. 두번째 블록에서 발열이 될 때에는 첫번째 블록의 표면이 352K까지 상승하고 이후 온도가 낮아짐을 보인다. 세번째 블록에서 발열이 이루어질 때에는 첫번째 블록 표면의 온도는 327K까지 상승하고 이후 온도가 낮아진다. 두번째나 세번째 블록에서 발열이 될 때에는 블록 사이에 존재하는 공기층에서의 대류와 블록의 전도에 의해서 첫번째 블록까지 열이 이동된다. 발열체의 윗 방향에 블록이 존재하게 되면 부력 및 밀도차에 의해서 열의 이동이 원활하지 못하고 정체하게 된다. 이런 현상 때문에 전자장비에서 발생되는 열을 효과적으로 제거하지 못하고 국부적인 온도의 상승을 야기하는 원인일 수 있다.

블록에서 발생한 열량이 전도, 대류 또는 복사에 의한 열전달이 어느 정도인지 구분하기 위해 다음과 같이 계산하였다.

$$-k \frac{T_s - T_a}{\Delta x} = h(T_s - T_g)$$

여기서, $k=0.25$ 와 T_s 는 블록의 $y=200\text{ mm}$, $z=50\text{ mm}$ 지점에서 x 방향으로 표면의 평균 온도, $y=177\text{ mm}$, $z=50\text{ mm}$ 지점에서 x 방향으로 평균 온도(T_a)를 구하여 열유속을 계산하였고 T_g 는 채널 간격의 중앙에 열전대를 설치하여 측정한 온도이며 이것으로 대류 열전달계수를 산출하

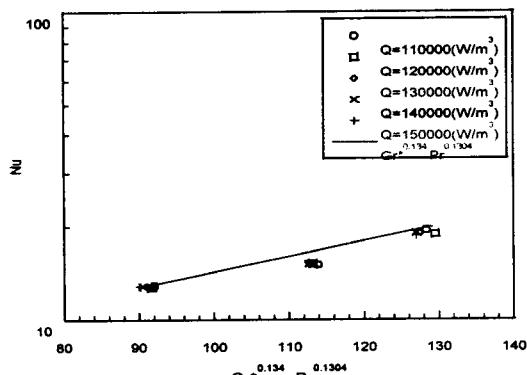


Fig. 6 Correlation using new Gr^* & Pr number.

여전체 3개의 블록의 대류 열전달량을 계산하였다. 계산결과 블록의 상하부면과 측면의 계산값은 전체의 약 84%였다. 그리고 전도 열전달량(q_c)을 계산하면 $q_c = \rho V C_p (T_s - T_h)$ 식에서 T_h 은 초기상태의 공기온도이며 전체의 약 16%였다. 복사에 의한 열량은 미소하기 때문에 계산에서 생략하였다.

Fig. 6은 블록에서 발생되는 열유속의 변화에 따라 얻어지는 Gr^* 를 수정하여 Gr^* 과 Nu 로서 표시한 그림이다.⁽⁹⁾ 실제 기관에서와 같이 돌출된 면에서 열이 발생하는 경우 열전달현상에 영향을 주는 특성길이는 발열체의 높이, 발열체의 돌출길이, 발열체 사이의 간격, 채널의 간격, 채널의 높이 등이다. 수평 채널에서 Nu 수의 특성길이로는 채널의 간격 S 를 사용하고, 본 논문에서는 수정된 Gr 수를 다음과 같이 채널 간격 S 를 발열면 부위만의 높이를 합산하여 나누는 특성길이를 사용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{Nu} = \frac{hS}{k}$$

$$\text{Gr}^* = \frac{g \beta q' S^4}{\nu^2 k} \frac{S}{\left(\sum L_{i-1} + \frac{L_i}{2} \right)}$$

여기서, $\left(\sum L_{i-1} + \frac{L_i}{2} \right)$ 는 계산하는 i 번째 발열체의 높이의 합이다.

수정된 Gr^* 과 Pr 에 의해서 표시된 값들을 무차원수로 나타낸 열전달관계식은 다음과 같다.

$$\text{Nu} = 0.10054(\text{Gr}^{*0.134} \text{Pr}^{0.1304})$$

이 상관관계식은 값들과 2.9%의 오차를 가지고 있다.

4.3 속도변화에 따른 열적 거동

블록의 표면에서 발생되어지는 열에 의한 부력의 영향과 채널의 입구에서 유속이 존재할 때의 변화를 알아본 그림이 Fig. 7이다. 입구의 속도를 0.1 m/s 로 주어 블록의 주위의 변화가 어떻게 일어나는지를 살펴보았다. 블록에는 같은 열량이 발생함에도 유속이 존재하면서 표면의 온도도 낮

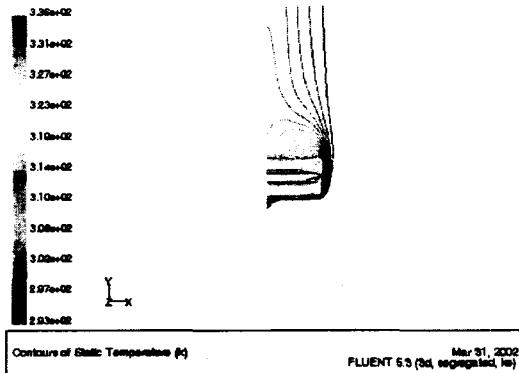


Fig. 7 Contours of temperature distribution at x-y plane, input velocity 0.1 m/s.

아짐을 보여주고 있다. 또한 유속이 커지면서 부력의 영향은 작아지고 있으며, 속도에 의한 공기의 유동에너지가 커져 블록의 상단부분까지 유동의 영향이 깊이 침투함을 보여주고 있다. 유동에너지가 커지면서 블록 표면과의 대류 열전달현상이 활발하게 일어나서 전체적으로 블록 표면의 온도하락을 초래하게 되므로 블록 상단에 존재하는 공기 중의 온도변화는 속도가 증가됨에 따라 블록 표면의 온도변화가 감소하고 있음을 보여준다. 속도의 증가에 따른 채널 내 유동의 변화는 일단 강제대류가 형성되면 형상의 변화는 없으나 그 크기는 커지게 된다.

유입속도의 증가에 따른 채널 내의 유동변화를 Fig. 8에서 보여주고 있다. 강제대류가 작용하면서 그 형상은 변화가 없이 보인다. 그러나 유동을 이루는 전체의 영향은 속도가 증가하면서 커지고, 블록과 채널 사이에서 급변하는 유동은 입구유속의 대략 2배 정도 커지게 된다. 이는 블록 끝부분에서 급격하게 유동이 변하고 있음을 나타내고 그 부분에서 온도의 변이도 급변한다는 것을 의미한다.

또한 첫번째 블록과 두번째 블록 사이에서는 블록 안쪽에서 재순환 영역이 형성되어지고 블록 안쪽으로 유동에너지가 전이됨을 볼 수 있다. 입구의 유속이 커지면서 유동에너지도 따라 커지게 되어 블록 안쪽까지 침투하여 유동층의 안정을 가져오게 된다. 즉 속도의 증가에 의한 유동에너지의 증가는 채널 전체적으로 온도의 안정성을 가져오게 된다.

입구유속의 변화에 따른 첫번째 블록의 온도변화를 Fig. 9에 도시하였다. 대기압 상태에서 부력

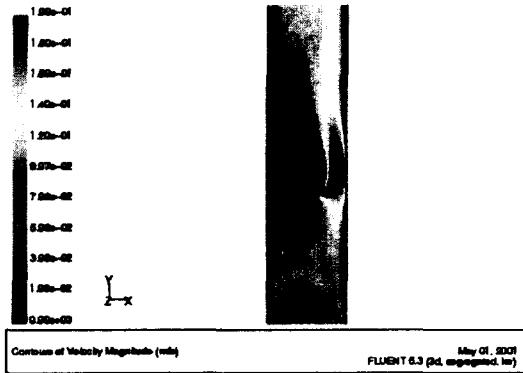


Fig. 8 Contours of velocity distribution at x-y plane, input velocity 0.1 m/s.

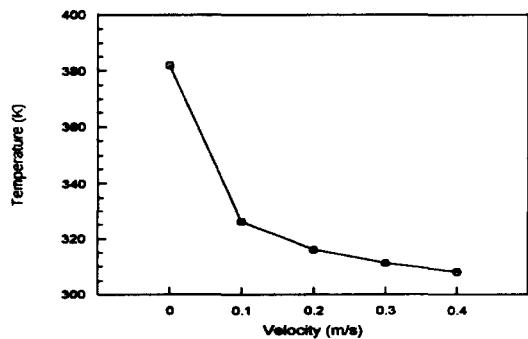


Fig. 9 Maximum temperature for various input velocity.

의 영향만 존재할 경우, 즉 오직 자연대류만이 존재하는 경우에는 블록의 표면의 온도가 높게 형성되다가 유속이 존재하면서 온도가 급격하게 떨어지고 있음을 보이고 있다. 이후 속도의 증가에 따라서 블록의 표면온도가 떨어지고 있지만 온도 감소폭은 적게 나타남을 알 수 있다. 이는 더 이상의 속도 증가에 의해서 채널 내의 공기의 안정성은 약하다는 것이다. 즉 0.1 m/s 정도의 입구유속으로 채널 내 전체의 공기층이 안정화되었음을 보여주고 있는 것이다.

5. 결 론

블록 표면에서 발생되는 열량에 의한 부력의 영향과 입구유속에 의한 블록과 블록 사이의 유동, 그리고 채널 내의 안정화에 대해서 살펴보았다.

(1) 수치적 연구와 실험적 연구에서 정상상태 이후 35분이 경과할 때 11%의 차이가 발생하나

전체적으로는 7%의 차이를 나타내었다.

(2) 블록에서 발생되는 열량은 구조상 대류 열 전달에 의해서 냉각이 되지 않으면 국부적인 유동의 정체로 인하여 높은 온도분포를 나타낸다.

(3) 블록 발열 후 정상상태까지는 자연대류에 의한 급격한 온도상승을 이루었으나 정상상태 이후 강제대류 형성과 입구유속의 증가에 따른 블록에서 온도의 안정화를 나타내었다.

(4) 블록 한쪽은 블록과 채널 사이에서 발생하는 미소유동의 영향을 받았으며 블록 바깥쪽은 입구에서 발생되어지는 조건에 영향을 받았다.

(5) 블록에서 발생되는 열유속의 변화에 따른 Gr^* 과 Pr 에 의해서 표시된 값들을 무차원 수로 나타낸 자연대류 상관관계식은 다음과 같다.

$$Nu = 0.10054(Gr^{0.134} Pr^{0.1304})$$

후 기

이 연구의 일부는 2001년도 조선대학교 학술 연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Kennedy, J. E., Roach, Jr. G. M., Dowling, M. F. and Abdel-Khalik, S. I., 2000, The onset of flow instability in uniformly horizontal microchannels, ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 122, pp. 118-125.
- Manca, O., Morrone, B. and Nardini, S., 2000, Experimental analysis of thermal instability in natural convection between horizontal parallel plates uniformly heated, ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 122, pp. 50-57.
- 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.
- Kang, B. H., Jaluria, Y. and Tewari, S. S., 1990, Mixed convection transport from an isolated heated source module on a horizontal plate, ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 112, pp. 653-660.
- Hall, D. A., Vliet, G. C. and Bergman, T. L., 1999, Natural convection cooling of vertical rectangular channels in air considering radiation and wall conduction, ASME Journal of Electronic Packaging, Vol. 121, pp. 75-84.
- Incropera, F. P., 1988, Convection heat transfer in electronic equipment cooling, ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 110, pp. 1097-1111.
- Jaluria, Y., 1985, Interaction of natural convection surface, ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 107, pp. 883-892.
- 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.
- Choi, Y. M. and Park, K. A., 1992, Natural Convection in a Vertical Channel with Thermal Blocks, KSME, Vol. 17, No. 2, pp. 438-444.