

채널의 경사각이 전자부품의 열적 안정성에 미치는 영향

추홍록[†] · 상희선* · 유재환**

대구보건대학 산업안전보건과 · *경일대학교 안전공학과 · **세명대학교 산업안전공학과
(1999. 10. 20. 접수 / 2000. 2. 8. 채택)

Effects of the Inclined Angles of Channel on Thermal Stability of Electronic Components

Hon-Lok Choo[†] · Hee-Sun Sang* · Jae-Hwan Yoo**

Department of Industrial Safety and Health, Taegu-Health College

[†]Department of Safety Engineering, Kyungil University · ^{**}Department of Industrial Safety Engineering, Semyung University

(Received October 20, 1999 / Accepted February 8, 2000)

Abstract : An experimental study was carried out to investigate the effects of inclined angles of channel on thermal stability of electronic components. In this study, it is focused on the natural convection heat transfer from an inclined parallel channel with discrete protruding heat sources. The material used for the inclined parallel channel was epoxy-resin, while air as the cooling fluid. Heat transfer phenomena for inclined angles of $\phi=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ and for the range of $9.52 \times 10^5 < Ra < 6.25 \times 10^6$ were analyzed. The thermal fields in the channel were visualized by Mach-Zehnder interferometer. Also, local temperatures were measured by thermocouples along the channel wall and heat sources surface. As a result, for the range of $4.29 \times 10^5 < Ra_c^* < 6.04 \times 10^6$, a useful correlation of mean Nusselt number was proposed as a function of modified channel Rayleigh number.

1. 서론

전자장비들의 고성능 및 다기능화에 따라 전자부품은 여러 가지 열적상황에 놓여지게 된다. 예를 들어 밀폐공간이나 상부가 개방된 캐비티 등과 같은 조건에서 작동되는 경우의 경사진 배열을 가질 수 있다. 전자장비 캐비닛에 위치한 PCB배열을 갖는 실제 전자부품은 종종 경사진 상태에서 작동된다. 이러한 경우 경사각은 전자부품의 열적흐름 및 온도분포에 연관되어 부품의 열적안정성에 큰 영향을 미치게 된다.

경사각을 고려한 연구로서 May¹⁾는 균일한 내부열원을 갖는 사각밀폐 공간의 2차원유동에서 경사각 변화에 따른 자연대류 열전달특성을 연구하였다. 이재현 등²⁾은 균일 내부발열을 갖는

사각 밀폐공간에서 경사각에 따른 자연대류 열전달을 수치해석적으로 연구하였다. 박재림 등³⁾은 단열평판에 등은 발열체 1개가 부착된 경우에 대하여 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하여 열전달특성을 연구하였다. Azevedo 등⁴⁾은 물속에 잠긴 수직 등온채널의 경사각을 변화시켜가며 Nusselt수에 대한 경사각이 고려된 Rayleigh수의 상관관계식을 구하였다. 또한 유동가시화를 통하여 재순환 영역과 2차 유동(secondary flow)의 존재를 확인하였다. Fujii 등⁵⁾은 임의의 경사에서 두 종류의 종횡비를 가지는 등온평판에서의 경사각이 열전달과 유동에 미치는 영향을 실험적으로 구명하였다. Mayinger 등⁶⁾은 경사각 변화에 따른 밀폐공간내의 PCB배열에 대한 자연대류 열전달특성을 온도측정 및 간섭계를 이용하여 실험적으로 연구하였다.

지금까지 자연대류에서 경사각을 고려한 연구는 대부분 밀폐공간이나 단열 평판 위의 등온발

[†] To whom correspond should be addressed.
chl@mail.taegu-hc.ac.kr

열체 및 등온채널, 혹은 균일 열유속의 채널에 대한 연구가 대부분이었고, 2개의 균일/비균일 열유속 열원이 부착된 채널에서 경사각 변화에 따른 자연대류 열전달특성에 대한 연구는 미미하였다.

따라서 본 연구에서는 평행 채널의 한쪽 벽면에 2개의 돌출형 열원이 부착된 경우, 채널경사각 변화에 따른 열적 상호간섭이 열전달특성에 미치는 영향을 조사하였다. 이 때 주위유체는 상온의 공기를 사용하였고, 유동은 정상, 층류 상태에서 채널경사각과 공급열량을 변화시키면서 실험적으로 연구를 수행하였다.

2. 실험

2.1. 실험장치

Fig. 1은 불연속 열원이 부착되어 있는 평행채널의 상세도이다. 양쪽 벽면의 재질은 에폭시 레

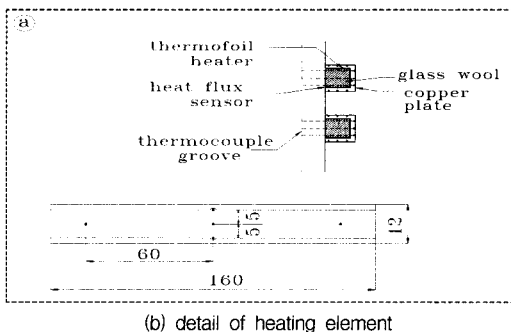
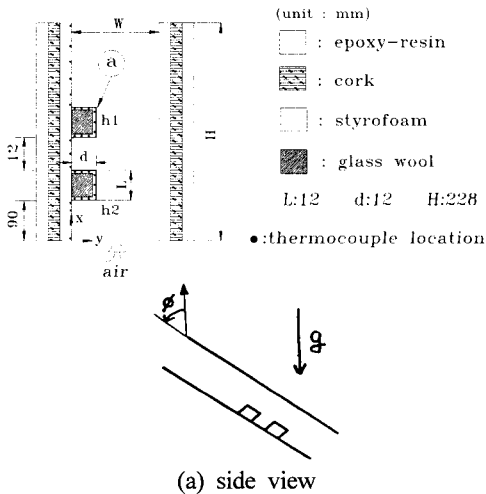


Fig. 1. Geometries of vertical channel, heaters and thermocouple location

진(epoxy resin)을 사용하였다. Fig. 1(a)에서 h_1 은 상부열원 1, h_2 는 하부열원 2를 의미한다.

채널을 구성하는 수직벽면의 기하학적 크기는 높이 228mm, 폭 160mm, 두께 5mm이다. 열원이 부착된 수직벽면의 온도를 측정하기 위하여 총 18개의 K형 열전대(chromel-alumel, 지름 0.32 mm)와 열원의 온도를 측정하기 위해 총 18개의 T형 열전대(copper-constantan, 지름 0.254 mm)를 표면에서 0.2mm되는 깊이에 부착하였다. 본 연구에서 제시된 채널의 경사각은 수직($\phi=0^\circ$)에서부터 수평($\phi=90^\circ$)으로 이루는 각도로 나타내었다. 즉, 경사각이 증가할수록 채널이 수평에 접근한다.

열원의 크기는 일반적인 발열칩의 크기를 2차원적으로 모사하여 폭 160mm, 길이 12mm, 두께 12mm로 하였다. 열원의 제작은 표면에서의 균일 열유속을 얻기 위해 $12 \times 12 \text{mm}^2$ 의 동을 두께 1mm가 되도록 자리면을 가공한 다음, 두께 0.5 mm, 저항 22.2Ω 의 서모포일 가열기를 자리면에 고열전도성 본드로 접착하였다. 그리고 기판의 표면거칠기에 따른 효과는 무시하였다. 열원 표면에서의 온도를 측정하기 위하여 전면에 5mm 간격으로 3개, 상·하면에 각각 3개로 총 9개의 T형 열전대를 부착하였다. 또한 2차원 유동을 보장하고 채널간격을 조절할 수 있도록 채널의 양 옆에 투명 아크릴($t=3\text{mm}$)을 부착하였다.

실험부의 온도장은 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하여 가시화 하였다. 간섭계에 사용된 거울의 직경은 200mm, 광원으로는 30mW의 He-Ne 레이저(laser)를 사용하였다. 간섭계의 모든 요소들은 비임 스플리터(beam splitter)의 각도를 45° 로 유지하여 중심이 일치되도록 하였다. 실험부를 통과한 간섭광은 135mm 카메라를 이용하여 촬영하였다.

2.2. 실험범위

주위의 유체는 상온의 공기를 사용하였다. 열원 표면에서의 온도변화가 $\pm 0.2(\text{C/hr})$ 이내 일 때를 정상상태에 도달하는 기준으로 정하였다. Table 1은 본 실험에서 수행한 실험조건을 나타낸다. 표에서 경사각은 수직으로부터 수평으로 이루는 각도로 나타낸다. 공급열량비(q_1/q_2)는 하부열원의 열유속에 대한 상부열원의 열유속비를 나타낸다.

Table 1. Variables in experimental conditions

variable	condition
Thermal conductivity	0.6 W/mK
Inclined angle (from vertical to horizontal)	15°, 30°, 45°, 60°
Heat flux	100 ~ 1000 W/m ²
Input power ratio (q_1/q_2)	0.1, 1, 10, ∞
Modified channel Rayleigh number	$4.29 \times 10^5 \sim 6.04 \times 10^6$

2.3. 데이터의 계산

주위유체로 사용된 공기의 물성치는 식 (1)로 표현되는 막온도(film temperature)에서의 값들을 사용하였다.

$$T_f = \frac{(\overline{T}_h + \overline{T}_\infty)}{2} \quad (1)$$

여기서 \overline{T}_h 는 열원에 부착된 9개의 열전대의 평균온도 값이고, \overline{T}_∞ 는 채널내로 유입되는 주위공기의 평균온도 값이다. 주위공기의 물성치들은 Gebhart⁸⁾ 등의 자료에서 주어진 데이터를 이용하였다. 열원에서 주위공기로 전달되는 정미 열전달량은 에너지 평형방정식인 식 (2)로 계산하였다.

$$Q_c = Q_t - Q_L - Q_r \quad (2)$$

여기서 Q_c 는 대류에 의한 열전달량, Q_t 는 열원에 공급되는 총 열량, Q_L 는 열원으로부터 수직벽면으로의 전도 열전달량, Q_r 는 열원 표면으로부터 주위로의 복사에 의한 열전달량을 나타낸다.

열원 표면으로부터 복사에 의한 열전달량 Q_r 은 식 (3)으로 계산하였다

$$Q_r = \sigma \epsilon A_h (\overline{T}_h^4 - \overline{T}_\infty^4) \quad (3)$$

여기서 등의 방사율(ϵ)은 0.05로 하였고, A_h 는 열원의 표면적으로 0.00576 m²이다.

본 연구에서 복사 열전달량은 전체 공급된 열량에 따라 발열량의 1.2~4.5% 정도로 매우 미소한 값으로 나타났다. 식 (2)에서 계산된 대류 열전달을 이용하여 식 (4)로 열전달계수를 계산하였다.

$$h = \frac{q_c}{T_h - T_\infty} \quad (4)$$

Grashof수, Rayleigh수, 채널 Rayleigh수, 수정 채널 Rayleigh수는 각각 식 (5),(6),(7) 및 (8)로 계산하였다⁹⁾.

$$Gr = \frac{g \beta q_c [L+2d]^4}{K_f \nu^2} \quad (5)$$

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (6)$$

$$Ra_c = Ra (W/L) \quad (7)$$

$$Ra^*_c = Ra_c \cos \phi \quad (8)$$

식 (5)에서 정의된 $[L+2d]$ 는 특성길이로서 열원높이(L)와 상하단두께(2d)의 길이를 합한 것이다. Nusselt수는 식 (9)로 계산하였다⁹⁾.

$$Nu = \frac{\overline{h} [L+2d]}{K_f} \quad (9)$$

무차원 온도는 식 (10)으로 정의하였다⁹⁾.

$$\theta = \frac{(T - \overline{T}_\infty)}{a^2 / g \beta [L+2d]^3} \quad (10)$$

무차원 좌표 x/L 는 h_2 의 하단부를 기준으로 하여 나타내었다. x/L 범위는 -7.5~11.5이다.

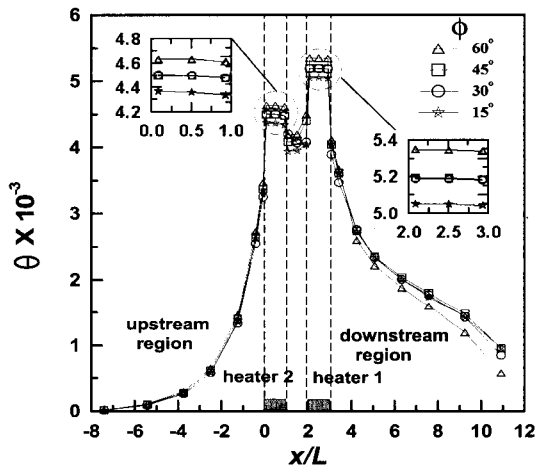
3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 채널간격비 $8(W/L)$ 가 1.5이고 공급열량이 $q_t = 1000 \text{ W/m}^2$ 일 때, 무차원 거리에 대한 무차원 온도분포($\theta \times 10^{-3}$)를 채널 경사각 ϕ 에 따라 나타낸 그림이다. (a)는 열전대를 이용한 측정 값이며, (b)는 간접계 사진이다.

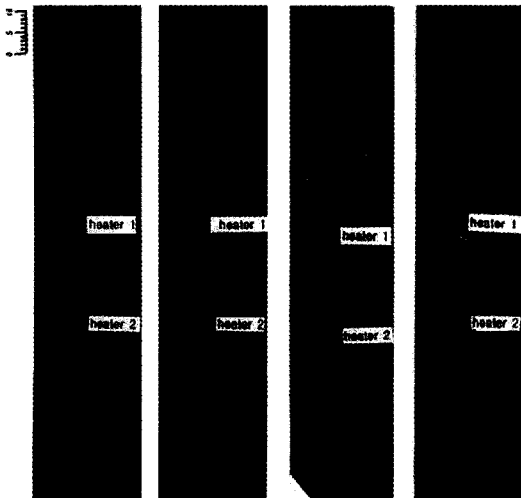
채널경사각이 60°일 때 무차원 온도가 가장 높으며 경사각 45°, 30°, 15°의 순으로 낮게 나타

난다. 또한 상부열원의 온도는 경사각에 상관없이 하부열원보다 높게 나타난다. 이는 하부에서 유입된 공기가 부력에 의해 상승되면서 하부열원에 가열되어져 상부영역의 온도를 상승시켰음을 예측할 수 있다.

또한 열전대로 측정된 각 열원의 평균온도는 채널경사각이 15°, 30°, 45°, 60°로 변할 때 상부열원면에서 92.47°C, 95.77°C, 96.13°C, 97.1°C 이고, 하부열원면에서 82.85°C, 85.79°C, 86.07°C, 86.76°C로 나타났다.



(a) Temperature measurement result



(b) Interferograms result

Fig. 2. Non-dimensional temperature distribution of heaters and substrate with the variation of inclined angle at $q_t = 1000 \text{ W/m}^2$

그리고 Mach-Zehnder 간섭계의 사진에서 계산한 온도는 측정값과 최대 2°C 정도 오차가 났다. 이와 같은 온도 변화는 경사각(ϕ)이 커질수록 두 열원사이, 즉 정체영역에서의 등온선이 많이 나타나는 것으로 확인된다. 이는 경사각이 커질수록 정체영역의 확대로 가열된 공기가 정체됨으로서 냉각효과가 감소되어 상·하부열원 온도를 상승시키기 때문이다.

Fig. 3은 공급열량을 변화시키며 각 열원면의 무차원 평균온도를 경사각 변화에 따라 나타낸 그림이다. 열원면의 무차원 평균온도는 열원면에 부착한 9개의 열전대에서 측정된 평균온도를 무차원한 값이다.

전반적으로 경사각 증가에 따라 각 열원의 평균온도는 증가한다. 또한 공급열량이 증가할수록 각 열원에 대한 경사각의 영향이 증가하고 있다. 이는 공급열량의 증가로 채널 내에서 대류유동이 활발해지나 부력의 x방향성분이 경사각의 증가로 감소하기 때문이다.

공급열량이 증가할수록 상부 및 하부 열원의 평균온도의 차가 증가하고 있다. 이는 공급열량이 증가할수록 하부 열원에서 발생한 열후류가 상부 열원에 영향을 더 크게 미치기 때문이다.

Fig. 4는 채널간격비(W/L)가 1.5이고 공급열량비(q_1/q_2)가 0.1일 때 기판의 무차원 거리에 대한 무차원 온도분포를 경사각 변화에 따라 나타낸 그림이다.

하부열원면에서는 60°, 45°, 30°, 15° 순으로 최

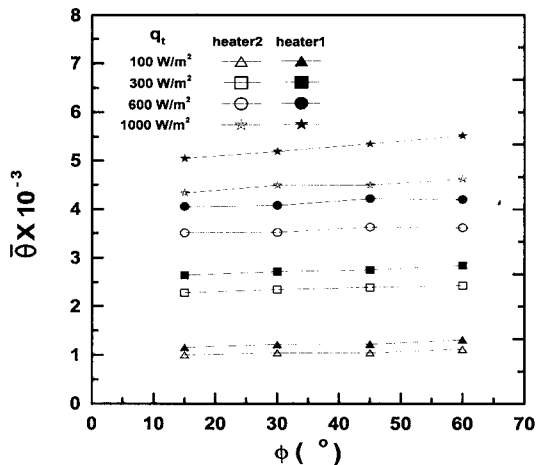


Fig. 3. Mean non-dimensional temperature of heaters with the variation of inclined angle.

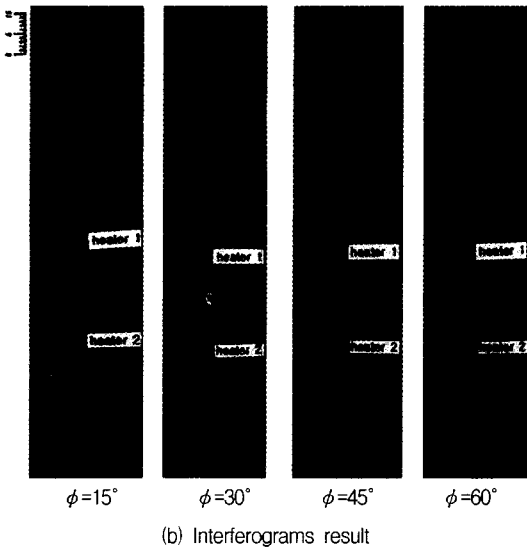
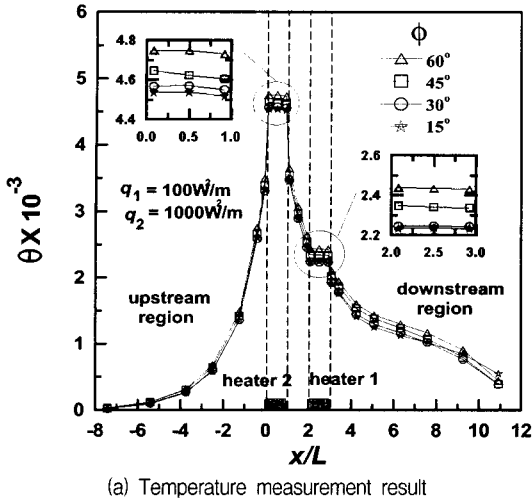


Fig. 4. Non-dimensional temperature distribution of heaters and substrate with the variation of inclined angle at $q_1/q_2 = 0.1$

고온도가 나타나고, 상부열원면에서도 마찬가지로 60°, 45°, 30°, 15°의 순으로 최고온도가 나타난다. 결국 비균일 발열시에도 경사각이 낮을수록 대류열전달이 활발히 일어나 열원의 온도가 낮아짐을 알 수 있다. 결국 경사각이 작을수록, 즉 채널이 수직에 가까울수록 냉각특성이 우수함을 예측할 수 있다. 이는 Fig. 4(b)의 Mach-Zehnder 간섭계 사진의 온도장을 통하여 확인할 수 있다.

한편 열전대로 측정된 표면온도는 경사각이

15°, 30°, 45°, 60°일 때 상부열원면에서 76.14°C, 77.74°C, 78.51°C, 78.87°C이고 하부열원면에서 47.43°C, 49.01°C, 49.77°C, 49.91°C이다. 이때 간섭계 사진의 온도는 측정값과 최대 1.7°C 정도 오차가 난다.

Fig. 5는 채널간격비 (W/L)가 1.5이고 공급열량비 (q_1/q_2)가 10일 때 기관의 무차원 거리에 대한 무차원 온도분포를 경사각 변화에 따라 나타낸 그림이다.

경사각 60°일 때 무차원 온도가 최대이고, 미

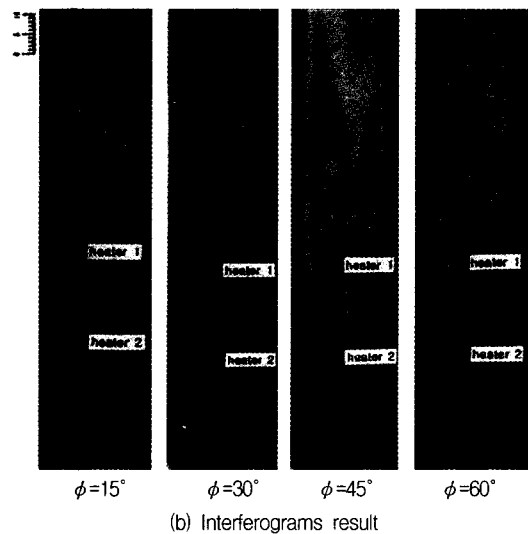
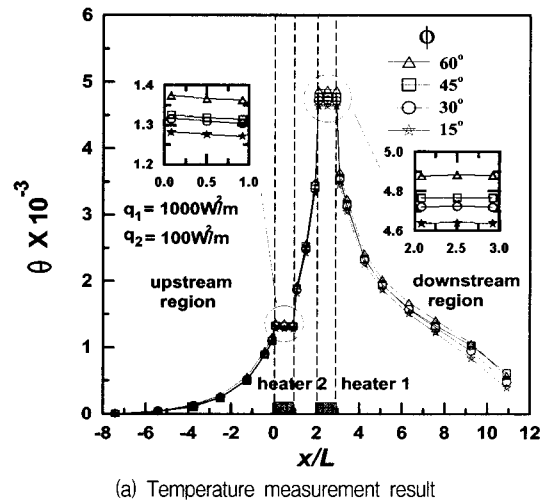


Fig. 5. Non-dimensional temperature distribution of heaters and substrate with the variation of inclined angle at $q_1/q_2 = 10$

제한 온도차이로 45°, 30°, 15°의 순으로 나타난다. 이는 Fig. 5(b)의 Mach-Zehnder 간섭계 사진의 온도장으로서 확인할 수 있다. 한편 열전대로 측정한 표면온도는 경사각이 15°, 30°, 45°, 60°일 때 각각 상부열원면에서 78.69°C, 82.83°C, 83.15°C, 84.72°C이고, 하부열원면에서 35.6°C, 38.44°C, 38.46°C, 38.69°C이다. 이때 간섭계 사진의 온도는 실제 측정값과 최대 2°C 오차가 난다.

Fig. 6은 채널간격비(W/L)가 1.5이고 균일 가열조건으로 $q_t=1000 \text{ W/m}^2$ 일 때, 하부열원 표면의 무차원 거리에 대한 국소 Nusselt수 분포를 경사각 변화에 따라 나타낸 그림이다.

채널경사각이 15°일 때 최대온도이고, 60°일 때 제일 낮게 나타난다. 결국 균일 조건에서 경사각이 작을수록 대류 열전달이 활발하여 국소 Nusselt수가 높게 나타난다.

Fig. 7은 채널간격비(W/L)가 1.5이고 균일 가열조건으로 $q_t=1000 \text{ W/m}^2$ 일 때, 상부열원 표면의 무차원 거리에 대한 국소 Nusselt수 분포를 경사각 변화에 따라 나타낸 그림이다.

Fig. 6과 7에서 하부열원의 국소 Nusselt수가 상부열원의 국소 Nusselt수 보다 높게 나타난다. 이는 하부열원의 대류열전달이 활발하기 때문이다. 결국 균일 가열조건에서 채널을 형성한 전자부품 배열시 경사각을 작게 하는 것이 냉각특성

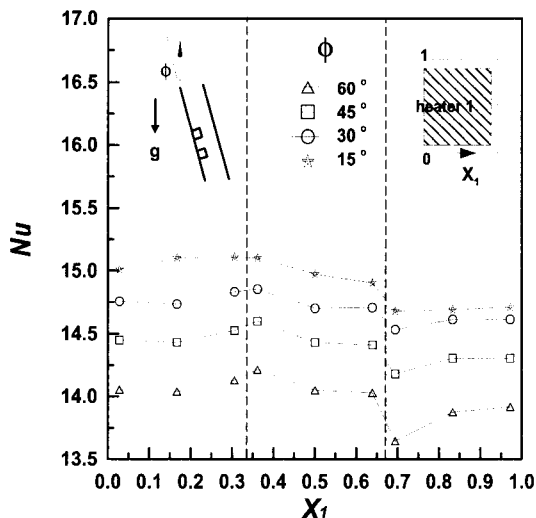


Fig. 6. Nusselt number distribution of downstream heater surface with variation of inclined angle for $q_t = 1000 \text{ W/m}^2$

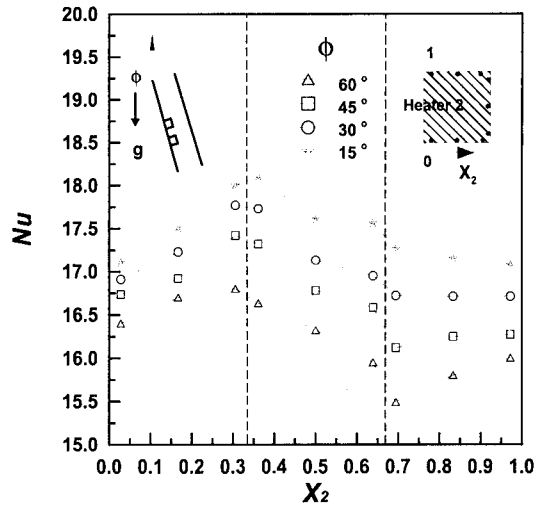


Fig. 7. Nusselt number distribution of upstream heater surface with variation of inclined angle for $q_t = 1000 \text{ W/m}^2$

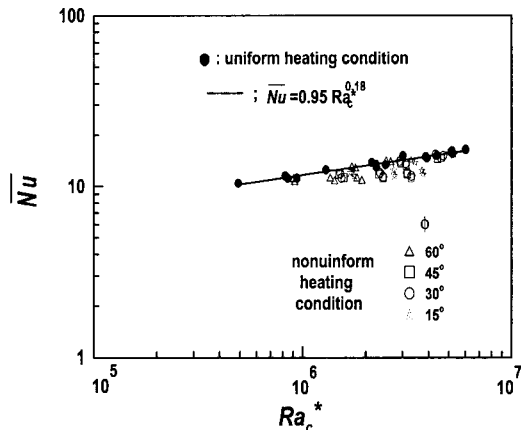


Fig. 8. The relationship between mean Nusselt number and the modified channel Rayleigh number

상 유리한 것으로 생각된다.

Fig. 8은 수정 Rayleigh수에 따른 평균 Nusselt수의 분포를 나타낸 그림이다.

균일 가열조건일 때 평균 Nusselt수를 예측할 수 있는 하나의 상관식을 구하기 위해 실험치를 곡선 접합하여 직선으로 나타낸 결과 식 (11)과 같은 상관식을 구하였다.

$$\overline{Nu} = 0.95 Ra_c^*{}^{0.18} \quad (11)$$

실험적으로 측정하여 계산된 평균 Nusselt수와

식 (11)에 의하여 구한 결과와의 최대 편차는 10.9%였다. 그러나 비균일 가열조건에서는 Nusselt수의 분포가 경사각에 따라 일정한 성향을 나타내지 않으며 수정 채널 Rayleigh수가 증가하여도 평균 Nusselt수의 증가는 균일 열유속에 비해 크게 나타나지 않는다.

4. 결론

평행채널의 한쪽 벽면에 부착된 2개의 열원에 대한 경사각의 영향을 실험적으로 구하고, 균일 열유속일 경우와 비균일 열유속일 경우 경사각에 따른 열원 상호간의 열적간섭에 의한 열원의 온도 상승을 예측할 수 있는 상관식을 얻어 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 경사각이 커짐에 따라 정체영역의 확대에 의한 유동장의 변화가 열전달특성에 큰 영향을 준다.
2. 균일 및 비균일 가열시 경사각에 관계없이 상부열원보다 하부열원에 의한 대류열전달이 활발하다.
3. 수정 Rayleigh수 $4.29 \times 10^5 \sim 6.04 \times 10^6$ 의 범위에서 균일 발열조건일 때 경사각 채널내의 대류 열전달을 예측할 수 있는 상관식을 다음과 같이 구하였다.

$$\overline{Nu} = 0.95 Ra_c^{*0.18}$$

기호 설명

A_h : 열원의 표면적, m^2
 d : 열원의 두께, m
 g : 중력가속도, m/s^2
 Gr : Grashof수
 K_f : 공기의 열전도율, W/mK
 L : 열원의 길이, m
 Pr : Prandtl수
 Q_L : 전도열전달량, W
 a_c : 대류열유속, W/m^2
 a_t : 총공급열유속, W/m^2
 Q_r : 복사 열손실량, W
 Ra : Rayleigh수
 T : 온도, $^{\circ}C$
 W : 채널간격, m

그리스

ϕ : 경사각($^{\circ}$)
 α : 열확산계수, m^2/s
 β : 체적열팽창계수, $1/K$
 θ : 무차원온도
 σ : Stefan-Boltzmann 상수, W/m^2K^4
 ν : 동점성계수, m^2/s

하첨자

h : 열원
 1 : 상부열원
 2 : 하부열원

참고문헌

- 1) May, H. O., A numerical Study on Natural Convection in an Inclined Square Enclosure Containing Internal Heat Source, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 919~928, 1991.
- 2) 이재현, 박만홍, 내부 발열을 갖는 경사각 공간에서의 자연대류유동 및 열전달, *Trans. of KSME*, Vol. 8, No. 2, pp. 171~177, 1984.
- 3) 박재림, 권순석, 단열판에 부착된 등온 사각 비임에서의 자연대류 열전달에 관한 연구, 태양에너지 논문집, Vol. 11, No. 1, pp. 61~68, 1991.
- 4) Azevedo, L. F. A. and Sparrow, E. M., Natural Convection in Open-Ended Inclined Channels, *J. Heat Transfer*, Vol. 107, pp. 893~901, 1985.
- 5) Fujii, T. and Imura, H., Natural-Convection Heat Transfer from a Plate with Arbitrary Inclination, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 755~767, 1972.
- 6) Mayinger, F. and Wang, Z. G., Experiments on Natural Convective Air Cooling of a PCB's Array in a Closed Casing with Inclination, *Cooling of Electronic Systems*, pp. 165~178, 1994.
- 7) 최용문, 박경암, 장방형 발열체가 부착된 채널에서 자연대류 연구, 대한기계학회논문집, Vol. 17, No. 2, pp. 438~444, 1993.
- 8) Gebhart, B., Jaluria, Y., Mahajan, R. L. and Sammakia, B., Buoyancy- Induced Flows and Transport, *Hemisphere, New York*, 1980.
- 9) Lee, S., Culham, J. R. and Yovanovich, M. M., The Effect of Common Design Parameters on the Thermal Performance of Microelectronic Equipment: Part 1-Natural Convection, Heat Transfer in Electronic Equipment ASME, HTD- Vol. 171, pp. 47~54, 1991.