

## 수평채널 밑면에 부착된 단일 발열모듈에서 채널높이의 변화에 따른 냉각특성 연구

이진호<sup>†</sup>, 유갑종<sup>\*</sup>, 장준영<sup>\*</sup>, 김병하<sup>\*\*</sup>

육군3사관학교 기계공학과, <sup>\*</sup>경북대학교 기계공학부, <sup>\*\*</sup>경일대학교 기계공학부

### The Study about Cooling Effect of a Heated Module in a Horizontal Channel with a Variation of Channel Height

Jin-Ho Lee<sup>†</sup>, Kab-Jong Riu<sup>\*</sup>, Jun-Young Jang<sup>\*</sup>, Byung-Ha Kim<sup>\*\*</sup>

<sup>†</sup> PO Box #9, Dept. of Mechanical Engineering, Korea 3rd Military Academy, Youngchun, 770-849, Korea

<sup>\*</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Kyungbuk National University, 702-013, Daegu, Korea

(Received September 21, 2000; revision received February 5, 2001)

**ABSTRACT:** The coupled conduction and convection heat transfer from a protruding heated module in a horizontal channel with a variation of channel height is experimentally investigated. The input power to the module is 3, 7 W and thermal resistance of module support is 0.06, 1.03 and 158 K/W. The Reynolds number ranged from 350 to 4500 corresponding to the inlet velocity (0.4~1.3 m/s) and channel height (11~35 mm). The results were obtained that the decrease of thermal resistance of module support reduces the module temperature by redistributing the heat flux and the overall thermal resistance of the module. In the study the effect of channel height is very significant in the adiabatic condition, but negligible in the conjugate condition. Finally, correlations for Nusselt number and  $Q_B/Q$  with a variation of Reynolds number were developed respectively.

**Key words:** conjugate heat transfer(복합열전달), module support resistance(모듈지지부의 열저항), channel height ratio(채널높이비), module(모듈)

#### 기 호 설 명

$D_h$  : 채널 수력직경 [m]

$H$  : 채널높이 [mm]

$h$  : 열전달계수 [ $W/m^2 \cdot K$ ]

$k$  : 열전도율 [ $W/m \cdot K$ ]

$L$  : 모듈길이 [m]

$Nu$  : Nusselt 수,  $h \cdot L/k$

$Q$  : 입력열량 [W]

$R_c$  : 모듈지지부 열저항 [K/W]

$Re$  : Reynolds 수,  $V \cdot D_h/\nu$

$t$  : 모듈높이(두께) [mm]

$T$  : 온도 [K]

$\Delta T$  :  $T_m - T_{in}$  [K]

$U$  : 열컨덕턴스 [W/K]

$V$  : 입구공기속도 [m/s]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-54-330-4944; fax: +82-53-957-4994

E-mail address: jinholee21@hanmail.net

## 그리스 문자

$\nu$  : 동점성계수 [ $m^2/s$ ]

## 하첨자

$A$  : 공기로의 대류열전달

$B$  : 기관으로의 열전달

$C$  : 모듈저지부

$in$  : 채널입구

$m$  : 모듈(module)

$R$  : 복사열전달

## 1. 서 론

상용화된 전자장치의 냉각에서 가장 많이 사용되는 냉각매체는 공기이다. 소수의 슈퍼컴퓨터나 대형 전자기에 담금냉각방식의 액체냉각을 이용하지만 냉각장치가 복잡하고 유지, 보수 등의 어려움으로 인해 현재 냉각팬을 사용한 강제대류 냉각방식이 대부분을 이루고 있다. 따라서 전자칩의 온도를 낮게 유지하면서 높은 열유속을 제거하는 여러 가지 냉각기술의 개발이 전자기의 수명과 발전속도를 좌우한다고 할 수 있다.

여러 전자장치에 사용되고 있는 실제 모듈에서 발생한 열량은 모듈의 표면으로부터 공기로의 대류열전달과 I/O핀을 통해 기관으로의 전도열전달이 동시에 일어난다. 특히 칩이 고용량화되어 핀의 수가 증가할수록 연결부의 전도에 의한 열의 이동은 칩의 온도에 중요한 변수가 된다. 따라서 전도를 고려한 복합열전달의 해석은 모듈과 기관의 열팽창률이 다르기 때문에 발생된 열응력에 의한 접촉불량, 칩 또는 I/O핀의 파괴 등의 문제를 해결할 수 있다. 또한 전도기관을 발열소자의 확장표면(extended surface)으로 사용함으로써 기관 위의 불균일한 발열밀도를 비교적 균일하게 분산시킬 수 있고, 모듈의 최대 온도를 저하시킴으로써 시스템의 안정성을 향상시킬 수 있으므로 복합열전달의 특성에 대한 연구가 필요하다.

전자장치 냉각에서 복합열전달의 중요성이 부각되기 시작하면서 최근까지 많은 연구가 수행되고 있다.

Graham and Witzman<sup>(1)</sup>은 최초로 3차원 모듈

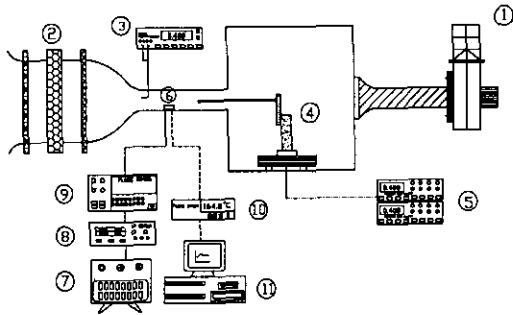
에 대한 복합열전달의 중요성을 강조하였다. Kim and Anand<sup>(2)</sup>는 기관의 열전도율이 전자장치 냉각의 설계와 분석에서 중요한 인자가 된다고 하였다. Park and Nakayama,<sup>(3)</sup> Nakayama and Park<sup>(4)</sup>은 I/O핀의 열저항을 이용하여 기관으로의 전도열전달의 중요함을 밝혔다. Sugavanam et al.<sup>(5)</sup>은 전도기관 위에 부착된 동일 평면 형태의 열원으로부터 복합열전달에 대한 수치해석을 통하여 기관두께의 영향을 연구하였다. Kabir et al.<sup>(6)</sup>은 동일 평면 형태의 열원에서 완전 발달된 층류 채널 유동과 층류 경계층 유동에 대한 복합열전달 현상을 수치적으로 연구하였다. 김의광 등<sup>(7)</sup>은 수직 채널 내에서 단일열원에 대한 복합열전달 특성을 연구하여 블록 내의 최대 온도에 미치는 Re(Reynolds 수), Gr(Grashof 수) 및 열전도율비 등의 상대적 영향을 고찰하였다. 유갑종 등,<sup>(8)</sup> 박상희 등,<sup>(9)</sup> 윤병택과 최도형<sup>(10)</sup>은 혼합대류 유동 내의 채널에 부착된 모듈로부터 공기 유동으로의 복합열전달에 관한 실험적 연구를 수행하였다.

기존 대부분의 연구에서는 채널 내에 부착된 가열모듈과 기관재질의 열전도율 변화에 따른 복합열전달에 초점이 맞추어져 있으며, 채널의 기하학적 조건에 따른 복합열전달 현상에 대한 연구는 거의 찾아볼 수 없었다.

따라서 본 연구에서는 실제 I/O핀이 장착된 전자모듈을 모사한 모듈을 이용하여 모듈에서 기관으로의 전도열전달이 거의 없는 경우인 단일조건과 전도열전달이 있는 경우인 복합조건에 대해 채널높이의 영향을 구명하였다. 특히, Re의 변화에 따른 Nu(Nusselt 수)와 기관으로의 전도열전달량을 예측할 수 있는 상관식을 제시함으로써 전자장비 최적 열설계자료를 제시하는 데 그 목적이 있다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 장치들의 배열을 개략적으로 나타낸 그림이다. 실험장치의 말단에 설치한 블로어 ①에 의하여 외부공기가 시험부로 유입되며, 시험부 내로 유입되는 외부공기의 속도를 균일하게 하기 위하여 채널입구에 필터, 허니컴, 메쉬 ②를 설치하였다. 시험부로 유입되는 공기의 속도는 채널입구에서 2 cm 떨어진 곳에



- ① Blower & PWM Controlle
- ② Filter, Honeycomb and Mesh
- ③ Micromanometer
- ④ 3-Axis Traverse
- ⑤ Hotwire Anemometer
- ⑥ Module
- ⑦ A.V.R
- ⑧ D.C Power Supply
- ⑨ Digital Multimeter
- ⑩ Data Acquisition
- ⑪ Personal Computer

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

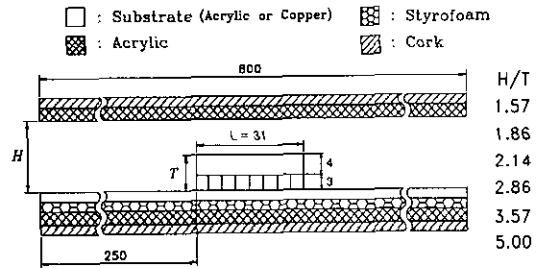
피토투브와 마노메터 ③를 이용하여 측정하였다. 3축 이송대 ④와 열선풍속계 ⑤를 이용하여 시험부로 유입되는 공기의 난류강도를 측정하였다. 측정된 난류강도는 최대 0.7% 이내로 균일한 속도를 얻을 수 있었다.

모듈 ⑥에 공급되는 전원은 자동전압조정기 ⑦, 직류전원 공급장치 ⑧, 디지털 멀티메타 ⑨로 구성된 전원공급부에서 이루어진다. 모듈 표면의 온도와 시험부로 유입되는 공기의 온도를 측정하기 위하여 열전대를 아날로그 디지털 변환기로 구성된 데이터 처리장치 ⑩에 연결하였다. 데이터 처리장치는 베이직 프로그램을 이용한 개인용 컴퓨터 ⑪에 의하여 처리되도록 하였다.

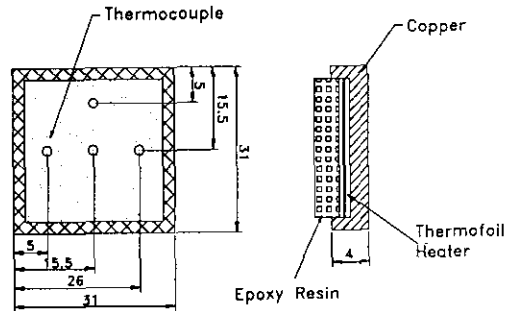
Fig. 2는 수평채널을 구성하는 시험부와 모듈의 개략도이다. Fig. 2의 (a)에서 시험부를 구성하는 수평채널은 길이 800 mm, 폭 400 mm, 두께 12 mm의 투명 아크릴판을 이용하여 만들었다.

채널높이는 높이 조절기를 이용하여 채널 상부면을 이동시킴으로써 변화시켰다. 모듈은 모듈 선단이 시험부 입구로부터 250 mm 떨어진 위치에 설치하였다. 또한 모듈에서 발생된 열이 기판의 뒷면과 채널 상부면으로의 열손실을 최소화하기 위하여 시험부는 스티로폼과 코르크를 이용하여 단열시켰다.

Fig. 2의 (b)에 나타난 모듈은 전자장비의 기판에 부착된 고집적소자(VLSI chip)를 모사한 것으로서 크기가 31×31×4 mm인 정방형으로 만들었



(a) Test section



(b) Simulated module

Fig. 2 Geometries of horizontal channel and simulated module.

다. 모듈의 제작은 표면에서 등열유속을 얻기 위하여 두께 4 mm의 동판에 깊이가 3 mm인 정사각형의 자리면을 가공한 다음, 두께 0.5 mm, 저항 147.6 Ω(±0.01 Ω)의 서모포일 가열기를 부착하였다. 또한 모듈 후면으로의 열손실을 줄이기 위하여 에폭시 수지를 저전도를 접착제를 이용하여 서모포일 가열기의 후면에 부착하였다. 모듈 표면에서의 온도를 측정하기 위하여 4개 지점에 K형 열전대를 부착하였다.

시험부의 기판에 부착된 모듈로부터 주요 열전달경로는 식(1)과 같다.

$$Q = Q_A + Q_B + Q_R \tag{1}$$

$Q_A$ 는 모듈로부터 공기유동으로의 대류열전달,  $Q_B$ 는 기판으로의 전도열전달이고,  $Q_R$ 은 모듈 표면으로부터 주위로의 복사열전달이다.  $Q_R$ 은 입력열량  $Q$ 의 3~4% 미만으로 계산되었다.

모듈지지부의 열저항은 1차원 정상상태 열전도에 의한 열저항 개념을 이용하여 식(2)와 같이

Table 1 Variables in experimental condition

Variable	Condition
Input power ( $Q$ )	3.0, 7.0 W
Inlet velocity ( $V$ )	0.4, 0.7, 1.0, 1.3 m/s
Channel height ratio ( $H/t$ )	1.57, 1.86, 2.14, 2.86, 3.57, 5.00
Module support resistance ( $R_c$ )	0.06, 1.03, 158 K/W
Reynolds number ( $Re$ )	350 ~ 4600

정의하였다.

$$R_c = t/k_c S \quad (2)$$

여기서,  $k_c$ 는 모듈지지부의 열전도율이고,  $S$ 는 모듈과 모듈지지부의 접촉면적이다.

본 실험은 모듈로부터 기관으로의 전도열전달이 거의 일어나지 않는 경우, 즉 모듈지지부의 열저항이 매우 크고 ( $R_c=158$  K/W) 전도성이 매우 작은 기관(아크릴판, 두께 5 mm)을 사용한 경우인 단열조건과  $R_c$ 가 작으면서 ( $R_c=0.06$  W/K, 1.03 W/K) 전도성기관(동판, 두께 1 mm)에 대한 복합조건으로 나누어 실험하였다.

이때 단열조건에서 기관으로의 전도열전달량은 모듈의 총발열량의 약 1% 정도이다.

본 실험의 실험조건을 Table 1에 표시하였다. 이때 입력열량의 측정오차는  $\pm 0.01$  W, 온도는  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ , 그리고 입구공기속도는  $\pm 0.005$  m/s이다. 또한 이들 파라미터에 의해 계산된  $Nu$ 와  $Re$ 의 불확실도는 각각 1.6%, 2.3% 이내이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 단열조건에서 채널높이의 영향

Fig. 3은  $R_c=158$  K/W(이하 단열조건)이고, 모듈에 공급되는 열량( $Q$ )은 3, 7 W, 채널높이비 ( $H/t$ )가 1.57, 1.86, 2.14, 2.86, 3.57, 5.00일 때, 입구공기속도( $V$ )에 따른 모듈 표면에서의 평균 온도( $T_m$ )와 입구온도( $T_{in}$ )의 차를 나타낸 그림이다.

이때 모듈 표면의 평균온도는 Fig. 2의 (b)에서

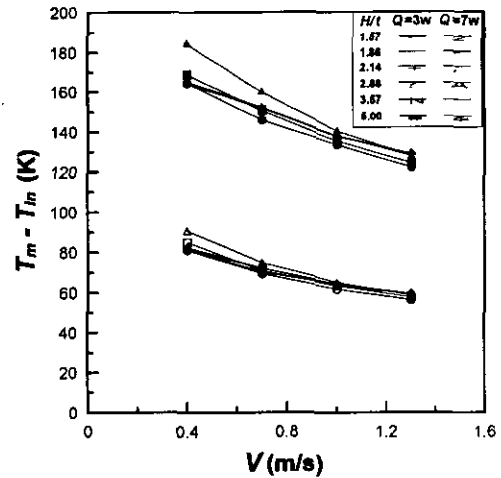


Fig. 3 Temperature difference between module and inlet air temperature with the variation of channel height ratio.

4점의 온도를 평균한 값으로써, 최대 국소온도(모듈의 중앙)와 최소 국소온도(모듈의 선단)와의 온도차는  $1.5^\circ\text{C}$  ( $Q=3$  W)~ $3.5^\circ\text{C}$  ( $Q=7$  W)로 나타났다.

기관으로의 전도열전달량이 매우 작은 단열조건이므로 모듈에서 발생된 열은 주위의 유동되는 공기로 직접 전달된다. 모듈의 평균온도는 입구공기속도가 증가할수록 낮아진다. 이는 입구공기속도가 증가하면 모듈 상부에서 유속이 증가되어 열경계층의 두께가 얇아져 주위 공기와의 대류열전달이 활발하게 일어나기 때문이다.

채널높이비가 증가함에 따라 모듈의 평균온도와 입구온도의 차이는  $H/t=2.14$ 일 때까지 감소하다가 그 이후에는 채널높이비가 증가하여도 온도 차이의 변화는 미약하다. 그리고 입구공기속도가 증가하거나 공급열량이 작아지게 되면 채널높이비는 모듈의 평균온도와 입구온도의 온도차에 미치는 영향이 감소한다. 이는 채널을 구성하는 채널 상부면이 유동과 모듈 상부면에서의 대류열전달에 영향을 미치지 때문이다.

Fig. 4는  $Q=3, 7$  W,  $V=0.4, 0.7, 1.0, 1.3$  m/s 일 때 채널높이비에 따른 평균  $Nu$ 의 변화를 나타낸 그림이다.

입구공기속도가 증가할수록 평균  $Nu$ 는 전체적으로 증가한다. 또한 동일한 입구공기속도에서의 평균  $Nu$ 는  $H/t=2.14$ 일 때 최대값을 나타낸 후

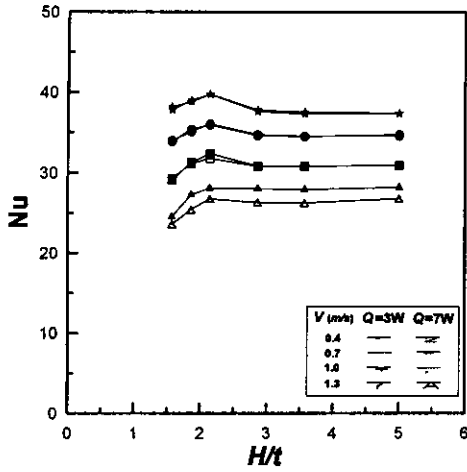


Fig. 4 Average Nusselt number with the variation of channel height ratio.

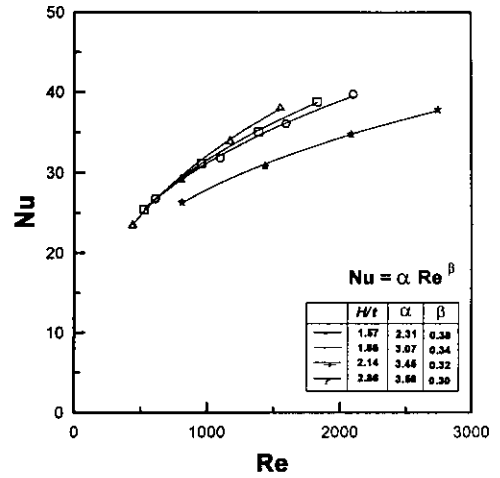
감소하여 거의 일정한 값을 가진다. 이는  $H/t \leq 2.14$ 에서는 채널높이비가 커질수록 유입유량이 증가하여 대류열전달이 활발하게 일어나기 때문이다. 그러나  $H/t \geq 2.14$ 에서는 모듈의 발열량에 비해 유입되는 냉각 열유량이 더 커져서 채널높이 증가에 따른 영향이 거의 없다.

공급열량이 증가할 때 평균 Nu의 변화는 입구 공기속도  $V=0.4\text{ m/s}$ 일 때 가장 크게 나타나며,  $V > 0.4\text{ m/s}$ 에서는 평균 Nu의 값에는 거의 변화가 없다. 이는  $V=0.4\text{ m/s}$ 일 때 모듈 주위에서 공기의 속도보다 가열 모듈로부터 발생된 부력의 영향이 더 크게 나타나는 혼합대류 냉각특성을 나타내고,  $V=0.7\text{ m/s}$  이상에서는 부력의 영향이 미약한 강제대류 냉각특성을 나타내기 때문이다.

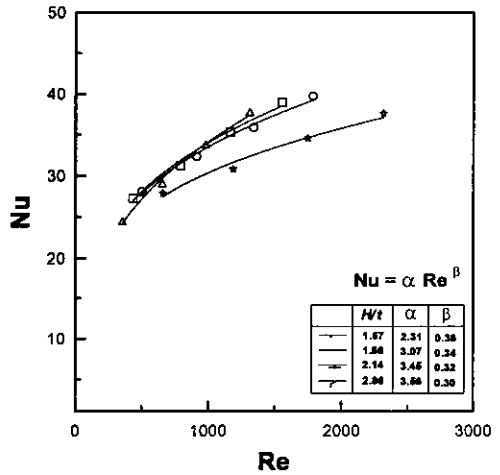
Fig. 5는  $Q=3, 7\text{ W}$ 일 때 Fig. 3, 4의 실험치로부터 Re의 변화에 따른 평균 Nu의 변화를 나타낸 그림이다. 각각의 채널높이비에 대하여 Re의 변화에 따른 실험치를 곡선 집합하여 식(3)과 같

Table 2 The value of  $\alpha, \beta$

H/t	Q=3 W		Q=7 W	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
1.57	2.31	0.38	3.49	0.33
1.86	3.07	0.34	5.00	0.28
2.14	3.45	0.32	5.28	0.27
2.86	3.56	0.30	5.90	0.24



(a)  $Q=3\text{ W}$



(b)  $Q=7\text{ W}$

Fig. 5 Relationship between average Nusselt number and Reynolds number.

이 구했다.

$$Nu = \alpha Re^\beta \tag{3}$$

식(3)의  $\alpha, \beta$  값은 Table 2에 나타내었다.

계수  $\alpha$ 는 공급열량과 채널높이비가 증가할수록 커지고, 지수  $\beta$ 는 공급열량과 채널높이비가 작아질수록 커진다. 따라서 모듈이 부착된 PCB가 채널을 형성할 경우 입구공기속도가 느리면 채널높이를 넓게 하고, 입구공기속도가 빠르면 상대적으로 좁게 하는 것이 냉각효과를 증대시킬

이러한 이유는  $R_c$ 가 감소되면 기판으로의 열 전달을 향상시켜 전도기판은 발열모듈에 대하여 확장표면의 역할을 하므로 모듈의 최대온도가 낮아져서 입구공기속도나 채널높이의 영향이 상대적으로 작아지기 때문이다.

Fig. 7은  $Q=3, 7\text{ W}$ ,  $R_c=0.06, 1.03\text{ K/W}$ ,  $V=0.4, 0.7, 1.0, 1.3\text{ m/s}$ 일 때, 채널높이비의 변화에 따른 모듈로부터 기판으로의 전도열전달량과 공급열량과의 비( $Q_B/Q$ )를 나타낸 그림이다.

$Q_B/Q$ 는 채널높이비에 거의 영향을 받지 않는 반면에  $R_c$  값의 변화에 큰 영향을 받는다. 또한  $Q=3\text{ W}$ 일 때,  $Q_B/Q$ 는  $R_c=1.03\text{ K/W}$ 인 경우보다  $R_c=0.06\text{ K/W}$ 일 때가 더 크며, 입구공기속도가 증가할수록 감소한다. 이는  $R_c$ 가 작으면 기판으로 전달되는 전도열전달이 잘되기 때문이며, 입구공기속도가 증가하면 모듈로부터 공기로의 대류열저항이 감소하기 때문이다.

이러한 경향은  $Q=7\text{ W}$ 인 경우에도 비슷하다. 공급열량이 증가하면 모듈의 온도가 높아져서 공기로의 대류열전달이 활발해진다. 그 결과 대류열전달량에 비해 전도열전달량이 상대적으로 더 감소한다.

Fig. 8은 Fig. 7의 실험치로부터  $Re$ 의 변화에 따른  $Q_B/Q$ 의 변화를 나타낸 그림이다.

$R_c=0.06, 1.03\text{ K/W}$ 일 때  $Re$ 의 변화에 따른  $Q_B/Q$ 를 예측할 수 있는 상관식을 식(4)와 식(5)과 같이 구했다.

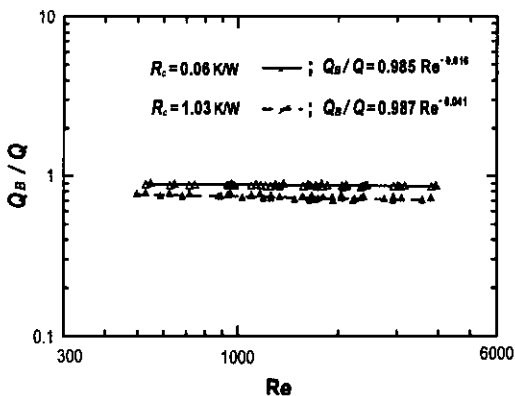


Fig. 8 Relationship between mean Nusselt number and Reynolds number.

$$R_c=0.06\text{ K/W}; Q_B/Q=0.985\text{ Re}^{-0.016} \quad (4)$$

$$R_c=1.03\text{ K/W}; Q_B/Q=0.987\text{ Re}^{-0.041} \quad (5)$$

#### 4. 결 론

본 연구는 수평채널에 부착된 단일모듈에서 채널높이의 변화에 따른 냉각특성을 구명한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 모듈로부터 기판으로의 전도열전달이 거의 없는 단열조건( $R_c=158\text{ K/W}$ )일 때, 모듈에서 공기로의 대류열전달은 채널높이비에 큰 영향을 받는다. 이때 모듈의 냉각이 가장 잘되는 채널높이비가 2.14임을 밝혔다. 또한  $Re$ 의 변화에 따른 모듈온도를 예측할 수 있는 상관식을 식(3)과 같이 구하였다.

둘째, 모듈로부터 기판으로의 전도열전달이 있는 복합조건( $R_c=0.06, 1.03\text{ K/W}$ )일 때, 모듈의 온도는 단열조건일 때보다 현저하게 감소하였으며 채널높이비의 변화에 따라서는 거의 영향을 받지 않았다. 또한  $Re$ 의 변화에 따른 기판으로의 모듈온도를 예측할 수 있는 상관식을 식(4), 식(5)와 같이 구하였다.

#### 참고문헌

1. Graham, K. and Witzman S., 1988, Analytical correlation of thermal design of electronic packages, Cooling Technology for Electric Equipment, pp. 249-264.
2. Kim, S. H. and Anand, N. K., 1994, Turbulent heat transfer between a series of parallel plates with surface-mounted discrete heat sources, Journal of Heat Transfer, Vol. 116, pp. 577-587.
3. Park, S. H. and Nakayama, W., 1995, Conjugate-mode heat transfer from a module on the base of a parallel-plate channel to forced convective air flow(experimental determination of macroscopic thermal conductance), Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 61, No. 583, B, pp. 1070-1077.
4. Nakayama, W. and Park, S. H., 1996, Con-

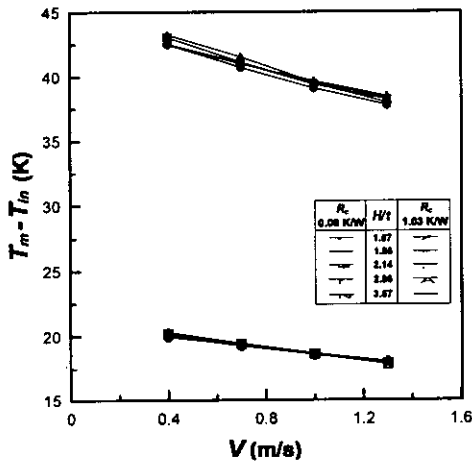
수 있을 것으로 예측된다.

$H/t=1.57$ 일 때  $\alpha$ 와  $\beta$ 가 다른 현상을 나타내고 있다. 이 부분에 대한 연구가 더 필요하다고 판단된다.

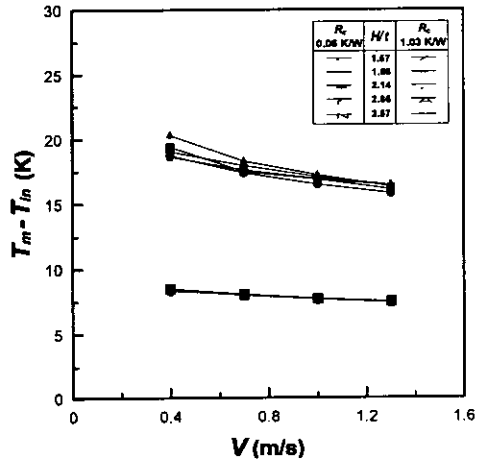
3.2 복합열전달 조건에서 채널높이의 영향

Fig. 6은  $Q=3, 7\text{ W}$ ,  $R_c=0.06, 1.03\text{ K/W}$ ,  $H/t=1.57\sim 5.00$ 일 때 입구공기속도의 변화에 따른 모듈의 평균온도와 입구온도와의 차이를 나타낸 그림이다.

공급열량이 증가하면 모듈의 온도는 상승하지만 동일한 공급열량에 대해서는 입구공기속도와 채널높이의 변화에 따른 모듈온도의 변화는 거의 없다. 또한  $R_c=158\text{ K/W}$ 와  $R_c=0.06, 1.03\text{ K/W}$ 일 때의 모듈온도를 비교하면 각각 최대 90, 70% 정도 감소하였고,  $Q=3, 7\text{ W}$ 일 때  $R_c=1.03\text{ K/W}$ 인 경우가  $R_c=0.06\text{ K/W}$ 에 비해 각각 33%, 49% 증가하였다. 따라서 전도를 고려한 복합열전달에서  $R_c$ 가 다른 열적 변수에 비해 지배적인 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

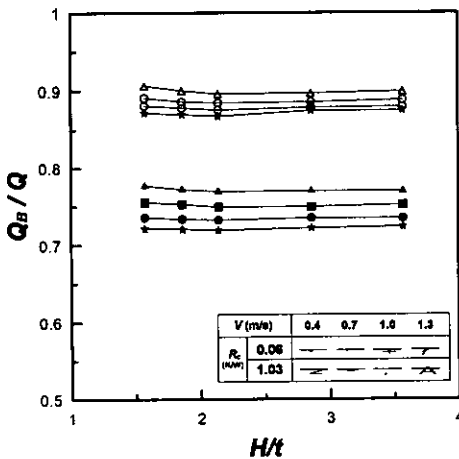


(a)  $Q=3\text{ W}$

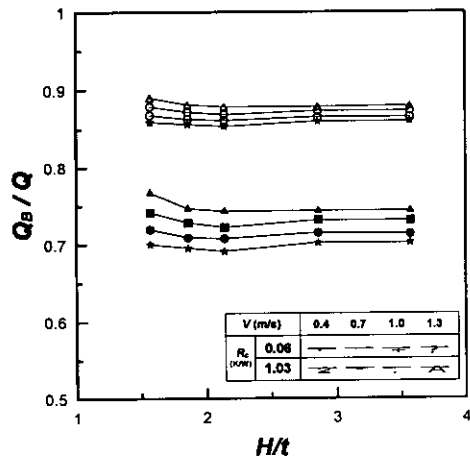


(b)  $Q=7\text{ W}$

Fig. 6 Temperature difference between module and inlet air with the variation of channel height ratio.



(a)  $Q=3\text{ W}$



(b)  $Q=7\text{ W}$

Fig. 7 Conduction heat transfer ratio with the variation of channel height ratio.

- jugate heat transfer from a single surface mounted block to forced convective air flow in a channel, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 118, pp. 301-309.
5. Sugavanam, R., Ortega, A. and Choi, C. Y., 1995, A numerical investigation of conjugate heat transfer from a flush heat source on a conductive board in laminar channel flow, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 38, No. 16, pp. 2969-2984.
  6. Kabir, H., Ortega, A. and Chan, C. L., 1995, A boundary element formulation of the conjugate heat transfer from a convectively cooled discrete heat source mounted on a conductive substrate, *Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part. A*, Vol. 18, No. 1, pp. 108-116.
  7. Kim, E. K., Baek, B. J., Pak, B. C. and Cho, B. S., 1996, Conjugate Heat Transfer in a Vertical Channel with Protruding Heat Source, *Trans. KSME (B)*, Vol. 20, No. 2, pp. 741-751.
  8. Riu, K. J., Lee, J. H. and Park, S. H., 1998, Conjugate Heat Transfer from a Surface-Mounted Module to Mixed-Convective Air Flow in a Channel Floor, *Proceeding of the KSME Spring Annual Meeting*, pp. 122-127.
  9. Park, S. H., Lee, J. H. and Riu, K. J., 1998, Conjugate Mode Heat Transfer to Mixed-Convective Air Flow From a Square Module Mounted on a Conductive Board, *Proceeding of the KSME Fall Annual Meeting*, pp. 241-245.
  10. Yun, B. T. and Choi, D. H., 1999, Analysis of Three-Dimensional Mixed Convection Flow About Uniformly Distributed Heat-Generating Blocks on a Conductive Wall, *Trans. of KSME (B)*, Vol. 23, No. 1, pp. 1-11.
  11. Choi, J. M. and Kim, Y. C., 1999, Experimental study on characteristics of two-phase flow through a bypass-orifice expansion device, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 109-116.
  12. Lee, J. H., Riu, K. J. and Lee, B. H., 2000, Cooling Effect of a module in a Horizontal Channel with a Variation of Thermal Resistance and Material of board, *Proceedings of the SAREK 2000 Summer Annual Conference (I)*, pp. 164-171.