

경사진 채널 밑면에 탑재된 모사모듈의 혼합대류열전달 특성 연구

유갑종* · 이진호** · 장준영***

A study on the mixed-convection heat transfer characteristics of a simulated module on the bottom in the inclined channel

Kap-Jong Ryu, Jin-Ho Lee and Jun-Young Jang

Key Words: mixed-convection(혼합대류), inclined channel(경사진 채널), simulated module(모사모듈), buoyancy force(부력), cooling fan(냉각 팬), thermal resistance(열저항)

Abstract

An experimental study was carried out on the characteristics of the mixed-convection heat transfer from a protruding heat source module which had uniform heat flux and was located on a flat plate in the inclined channel. The effects of the inclined channel($\varphi = 0 \sim 90^\circ$) was studied for the input power($Q = 3, 7W$) and inlet air velocities($V_i = 0.1 \sim 0.9m/s$).

Experimental results indicate that the input power was most effective parameter on the temperature differences between inlet air and module. The effects of the inclined angle was negligible when the inlet velocities were above 0.5m/s and 0.9m/s at $Q = 3W, 7W$ respectively. As the inclined angle of the channel increases, the temperatures of the module are decreased. So we obtained the best condition on the adiabatic board at the vertical channel.

기호설명

A : 채널 단면적 [mm^2]
 D_h : 채널 수력직경 [mm], $4A/P$
 Gr : Grashof수, $g\beta(T_m - T_i)D_h^3/\nu^2$
 H : 채널 높이 [mm]
 H_c : 모듈지지부 높이 [mm]
 h : 열전달계수 [$W/m^2 \cdot K$]
 k : 열전도율 [$W/m \cdot K$]
 k_c : 모듈지지부 열전도율 [$W/m \cdot K$]
 L : 모듈 길이 [mm]
 Nu : Nusselt수, $h \cdot L/k$
 P : 채널 둘레길이 [mm], $2(H+W)$
 Q : 입력열량 [W]
 R_c : 모듈지지부 열저항 [K/W]

R_t : 총열저항 [K/W]
 Re : Reynolds수, $V_i \cdot D_h/\nu$
 T_m : 모듈 온도 [K]
 T_i : 유입공기 온도 [K]
 ΔT : 유입공기와 모듈의 온도차 [K], $T_m - T_i$
 V_i : 유입공기 속도 [m/s]
 W : 채널 폭 [mm]

그리스 문자

β : 열팽창계수 [$1/K$]
 θ : 무차원 온도, $(T_m - T_i)k \cdot L/Q$
 ν : 동점성계수 [m^2/s]
 φ : 채널 경사각 [$^\circ$]

1. 서론

최근 전자기술의 급격한 발전으로 반도체 회로 패턴의 미세화 및 프로세스 기술이 크게 향상되었고, 그 결과 칩 당 소자의 집적도가 급격하게

* 경북대학교 기계공학부
 ** 육군 3사관학교 기계공학과
 *** 경북대학교 대학원 기계공학부

증가되었다. 칩 또는 모듈당의 집적도가 증가할수록 소자로부터의 발열량은 더욱 더 증가하게 된다. 이로 인해 전자장비의 열적환경에 대한 요구조건은 날로 가혹해지고 있는 실정이다. 따라서 이러한 전자장비가 정상적으로 작동될 수 있도록 최적의 열설계를 해야 한다.

전자장비에 내장된 모듈의 수명이나 신뢰도는 모듈의 작동온도에 의해 크게 좌우되며, 모듈은 대기의 온도, 습도, 기압, 기계 및 전기적 충격 등과 같은 사용환경요소에 크게 영향을 받는다.

Nelson 등⁽¹⁾의 연구에 의하면 전자칩의 작동온도를 설계온도보다 10°C 높일 때마다 반도체의 수명은 50% 이상씩 감소하는 것으로 알려져 있다.

전자장비의 열설계와 열제어는 열전달 기술의 주요 응용분야의 하나이다. 전자장비의 내부온도를 설계온도 이하로 유지시켜 전자장비의 핵심부품을 보호하고, 효과적인 기능발휘를 위해 다양한 방식의 냉각기술이 사용되어 왔다.

Incropera⁽²⁾는 전자장비 냉각의 방법을 자연대류, 강제대류, 혼합대류 및 상변화를 동반한 열전달 등으로 분류하여 기존의 연구 결과들을 종합적으로 정리, 분석하였으며 전자장비 냉각에 대한 기초자료를 제시하였다.

Kang 등⁽³⁾은 수평 단일 평판상에 장착된 단일 발열 모듈의 혼합대류 열전달에 관한 실험적 연구를 혼합대류 파라미터($Gr/Re^{5/2}$)와 모듈의 두께 등을 중심으로 수행하였다. 그 결과 이들은 모듈의 두께가 증가함에 따라 모듈 표면에서의 열경계층 두께는 증가하지만 모듈의 두께가 모듈 표면의 온도분포에 큰 영향을 주지는 않는다고 하였다. 또한 $0.9 < Gr/Re^{5/2} < 1.1$ 의 범위에서 자연대류에서 강제대류로의 천이 영역이 발생하고, $Gr/Re^{5/2}$ 가 모듈 표면 온도에 큰 영향을 준다고 하였다.

Shaw 등⁽⁴⁾은 한 개의 가열 요소를 가진 3차원 채널에서 혼합대류 열전달 현상에 대한 수치적인 연구를 수행하였다. 이들은 3차원 채널에서의 유동이 2차원 채널에서의 유동과는 매우 다름을 밝혔다.

Tewari 등⁽⁴⁾은 일정한 열유속을 가진 2개의 열원이 부착된 수직과 수평 평판에서의 열전달 특성에 대하여 실험적으로 연구하였다. 그 결과 자연대류와 비교하여 외부에서 유입되는 유동이 있을 경우 수평 평판에서는 하류(downstream)에

있는 열원 상부의 온도를 높이고 국소 대류열전달계수는 감소시키며, 수직 평판에서는 하류에 있는 열원 상부의 온도를 감소시키고 대류열전달계수는 증가시킨다고 하였다.

Lee 등⁽⁴⁾은 3차원 채널의 밑면에 탑재된 모사 모듈로부터의 혼합대류 열전달에 대하여 실험적 연구를 수행하였다. 이들은 $0.7 \leq Gr/Re^2 \leq 1.4$ 의 범위에서 자연대류에서 강제대류로의 천이 영역이 발생한다고 하였다.

Sikka 등⁽⁶⁾은 JEDEC(Joint Electronic Device Engineering Council)에서 개발한 시험용 패키지인 PQFP(Plastic Quad Flat Package)를 epoxy-glass card(FR-4)에 부착하여 입력열량과 공기속도 그리고 채널각도의 변화에 따른 패키지 열저항의 변화를 실험적으로 고찰하였다. 이들은 수평에서 혼합대류 영역이 $0.2 < Gr^*/Re^2 < 50$ 임을 밝혔다.

Choi 등⁽⁷⁾은 열원을 가진 경사진 평행 평판 채널에서 부력의 영향을 고려한 혼합대류 열전달에 대해 수치적으로 조사하였다. 그 결과 열원(heat source)의 누셀트수가 경사각 45° 이상일 때 자연 및 혼합대류에서 경사각에 크게 영향을 받음을 관찰하였다.

기존 연구들은 대부분 수직 및 수평 채널 내에 부착된 가열 모듈에 대한 열전달 특성에 초점이 맞추어져 있다. 그리하여 단일 모사모듈이 채널의 밑면에 부착된 경사진 채널에서의 열전달 특성에 대한 실험적 연구는 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 단일기판에 부착된 모사모듈이 경사진 채널밑면에 장착되어 있을 때, 채널 경사각과 유입공기 속도 그리고 모듈 입력열량에 따른 모사모듈의 혼합대류에 의한 냉각특성을 구명하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 장치의 개략도이다. 그림에서 보는 바와 같이 실험장치는 저속의 유동을 만드는 풍동과 풍동의 경사각을 변경시킬 수 있는 실험대 그리고 전원공급장치와 계측장비들로 구성되어 있다.

풍동은 안정부(settling chamber)와 시험부(test

section)의 두 부분으로 구성되어 있다. 이 때 안정부는 두께 10mm의 아크릴판을 사용하여 길이 800mm, 폭 400mm, 높이 150 mm의 크기로 제작하였다. 그리고 안정부의 후단부에는 공기유동을 만들 수 있도록 12개의 흡입식 팬(system cooling fan)을 설치하였고, 팬을 구동시키기 위하여 2대의 직류전원공급장치(HP 6284A)를 사용하였다. 또한 안정부에 메쉬(mesh)와 허니콤(honey-comb)을 설치하여 시험부내에서 균일유동이 되도록 하였다.

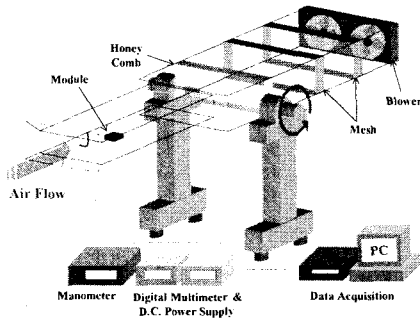


Fig. 1 Experimental apparatus

시험부는 Fig. 2와 같이 두께 10 mm의 투명 아크릴판을 사용하여 630mm × 300mm × 20 mm (길이×폭×높이)의 크기로 제작하였다.

시험부의 하부면에는 300mm×500 mm의 자리면을 가공하여 기판을 설치할 수 있도록 하였고, 시험부의 전단부로부터 250mm 떨어진 지점에 모사모듈을 설치하였다. 또한 시험부의 외부면에는 10mm 두께의 스티로폼을 부착하여 외부로의 열손실을 최소화하였다. 그리고 유입 공기의 안정된 흐름을 위하여 시험부의 전단부에 벨마우스(bell mouth)를 설치하였다.

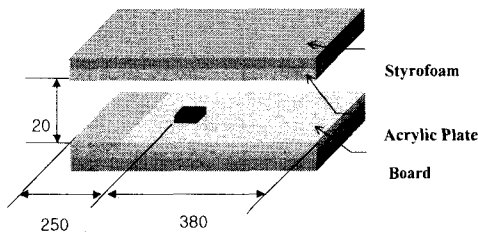


Fig. 2 Schematic of the test section

시험부 상부면의 중심에는 시험부의 전단으로부터 3 cm 되는 지점에 피토크관(pitot tube)을 설치하고 마이크로 마노미터(Micro Manometer, Furness FCO 510)를 이용하여 유입공기 속도를 측정할 수 있도록 하였다. 또한 시험부의 전단면에서 측정된 난류강도는 1.5% 이내이다.

실험대는 Fig. 1에서와 같이 채널 경사각을 변경할 수 있도록 제작하였다. 이때 실험대 측면에 각도기를 부착하고 각도기의 중심에 추가 달린 줄을 매달아 채널의 경사각을 정확히 설정하였다. 그리고 실험장치가 수평이 되도록 하기 위해 실험대 하부에 높이조절 나사를 설치하였고, 수준기(level gauge)를 이용하여 채널의 수평 여부를 확인하였다.

본 실험에서 사용한 모듈(module)은 VLSI 칩을 모사한 것으로 Fig. 3과 같다. 이 모사모듈은 두께 4 mm의 동판을 31mm×31 mm의 정방형으로 만든 후 깊이 3 mm의 정사각형 자리면을 가공한 다음 크기가 25.4mm×25.4mm×0.5 mm이고 저항이 147Ω(±0.01Ω)인 포일히터(Kapton flexible thermo foil heater, OMEGA, Model No. KHLV 101/5P)를 부착하여 제작하였다. 이 때 동판면과 포일히터 사이의 열저항을 줄이기 위하여 고전도율 접착제(OMEGA, OT100 & OB101)로 접착하고, 모듈 후면으로의 열손실을 줄이기 위하여 에폭시 수지를 포일히터의 후면에 부착하였다. 또한 직류전원 공급장치(HP, E3611A)를 이용하여 모듈에 전원을 공급하였다.

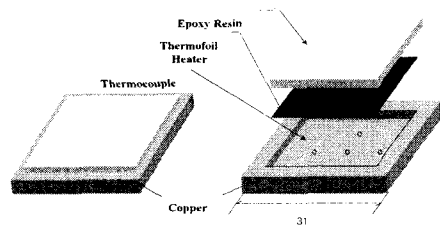


Fig. 3 Schematic of a module

2.2 실험방법 및 범위

본 실험은 모듈에서 발생하는 열이 모듈지지부를 통하여 기판으로 전도되는 열량이 없는 단열 조건에서 수행되었다. 단열조건을 만들기 위하여 모듈지지부 열저항 R_c 를 매우 크게 하여야 하며 R_c 는 1차원 정상열전도에 의한 열저항 개념을 도

입하여 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$R_c = \frac{H_c}{k_c \cdot S} \quad (1)$$

모듈에서 기관으로의 전도열전달을 최소화하기 위하여 모듈지지부로는 높이 3mm인 스테인리스 바늘을 사용하였고, 기관은 두께가 5mm인 아크릴판을 사용하였다. 식 (1)을 이용하여 스테인리스 바늘의 R_c 를 계산한 결과 158 K/W이다. 이때 모듈에서 모듈지지부를 통하여 기관으로 전도되는 열량과 모듈에서 주위로 복사되는 열량 그리고 전원공급선과 열전대 등을 통한 열손실은 입력열량의 5% 미만이다.

시험부로 유입되는 공기 온도 T_i 를 측정하기 위하여 3개의 열전대를 벨마우스의 좌측과 우측 그리고 중심부에 각각 설치하였다. 이 3지점에서 측정된 온도의 평균값을 유입공기 온도로 정의하였다. 그리고 모듈 온도 T_m 를 측정하기 위해 K형 열전대를 사용하여 Fig. 3과 같이 모듈의 4개 지점에 설치하고, 그 지점들로부터 측정된 4개의 온도를 평균하여 모듈 온도로 정의하였다.

본 실험의 수행 조건을 Table 1에 표시하였다.

Table 1. Experimental condition

Parameters	Conditions
Input power (Q_i , W)	3.0, 7.0
Inlet velocity (V_i , m/s)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.9
Inclined angle (φ , °)	0, 15, 45, 75, 90
Module support resistance (R_c , K/W)	158
Reynolds number (Re)	180 ~ 1850

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 입력열량 Q 가 3W와 7W이고 채널 경사각 φ 가 0°, 45°, 90°일 때, 레이놀즈수 Re의 변화에 따른 누셀트수 Nu의 변화를 나타낸 그림이다.

그림에서 Re가 증가함에 따라 Nu는 증가하며, Re가 700 이상에서 Nu의 증가율이 약간 크다. 또한 입력열량이 7W인 경우가 입력열량이 3W인 경우보다 Nu가 더 크고 채널 경사각이 0°에서 90°로 증가함에 따라 Nu의 값도 증가한다. 이 때

기존의 Shaw와 Lee의 연구 결과와는 5% 이내로 잘 일치한다.^{(3),(5)}

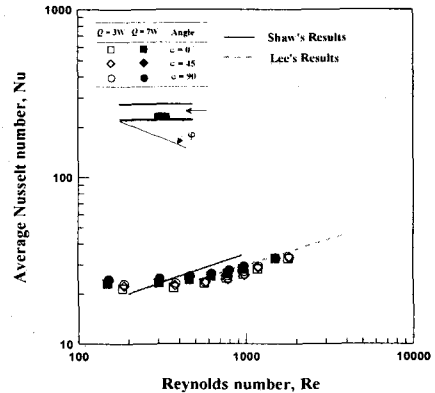


Fig. 4 Relations between Reynolds number and average Nusselt number

Fig. 5는 혼합대류 파라미터 Gr/Re^2 의 변화에 대한 누셀트수 Nu의 값을 표시한 것이다.

Nu는 $Gr/Re^2 < 0.7$ 에서는 선형적으로 감소하고, $0.7 \leq Gr/Re^2 \leq 9$ 에서는 비선형적으로 감소하며, $Gr/Re^2 > 9$ 에서는 거의 일정하다. $Gr/Re^2 < 0.7$ 은 강제대류 열전달이 지배적인 영역이고 $Gr/Re^2 > 9$ 는 자연대류가 지배적인 영역이다. 또한 $0.7 \leq Gr/Re^2 \leq 9$ 는 자연대류와 강제대류가 동시에 일어나는 혼합대류 영역으로 판단된다. 따라서 본 실험은 자연대류와 혼합대류 그리고 강제대류 범위에서 이루어짐을 알 수 있다.

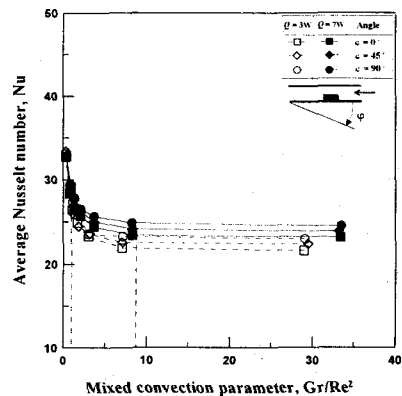


Fig. 5 Relations between mixed convection parameter and average Nusselt number

Fig. 6은 입력열량 Q 가 3W와 7W이고 채널 경사각 ϕ 가 0° , 45° , 90° 일 때, 시험부로 유입되는 공기 속도 V_i 에 따른 유입공기와 모듈의 온도차 ΔT 를 표시하고 있다.

유입공기 속도가 증가하면 ΔT 는 거의 선형적으로 감소한다. 입력열량이 약 2.3배 증가하면 ΔT 는 2배 정도 증가한다. 또한 입력열량이 3W인 경우 유입공기 속도가 0.5m/s에서 채널 경사각에 따른 ΔT 의 차이는 1.7% 미만이고, 7W에서는 유입공기 속도가 0.9m/s에서 채널 경사각에 따른 ΔT 는 0.8% 미만으로 나타났다. 즉, 입력열량이 3W일 때는 유입공기 속도가 약 0.5m/s 이상, 7W일 때는 유입공기 속도가 약 0.9m/s 이상이 되면 모듈의 냉각에 미치는 채널 경사각의 영향은 무시할 수 있다.

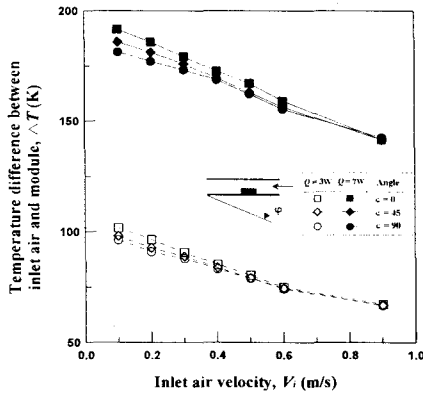


Fig. 6 Temperature differences between inlet air and module vs. inlet air velocities for different inclined angles

Fig. 6에 나타난 유입공기 속도 V_i 와 유입공기와 모듈의 온도차 ΔT 를 무차원화 시킨 결과를 나타낸 그림이 Fig. 7이다.⁽²⁾ 입력열량 Q 가 3W와 7W이고 채널 경사각 ϕ 가 각각 0° , 45° , 90° 일 때, 레이놀즈수 Re 의 변화에 따른 무차원 온도 θ 의 변화를 나타낸 것이다.

Re 가 증가함에 따라 θ 가 감소함을 볼 수 있으며, 입력열량이 3W인 경우가 7W인 경우보다 θ 가 더 크지만, Re 가 증가할수록 그 차이는 작아진다. 또한 채널 경사각이 0° 에서 90° 로 증가함에 따라 θ 는 감소한다. 입력열량이 3W와 7W일 때 각각 Re 가 1000과 1500 이상인 경우에는 θ 는 거의 변화가 없다.

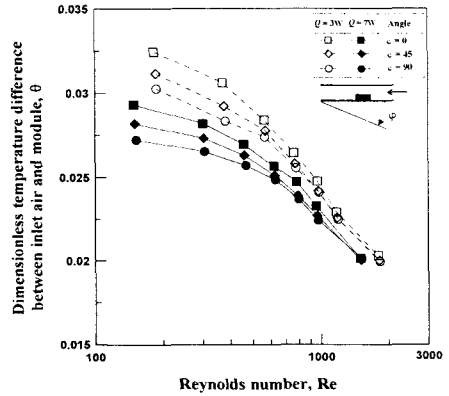


Fig. 7 Dimensionless temperature differences between inlet air and module vs. Reynolds number for different inclined angles

Fig. 8은 입력열량 Q 가 3W와 7W이고 채널 경사각 ϕ 가 0° , 45° , 90° 일 때, 유입공기 속도 V_i 의 변화에 따른 총열저항 R_t 의 변화를 나타낸 그림이다.

유입공기 속도가 증가하면 총열저항 값은 감소하고, 입력열량이 3W일 때가 7W일 때보다 더 급격히 감소한다. 입력열량이 3W인 경우, 유입공기 속도가 0.5m/s 이상에서는 채널 경사각에 따른 총열저항의 변화가 작으며, 입력열량이 7W의 경우에도 유입공기 속도가 0.9m/s 이상에서는 채널 경사각의 변화에 따른 총열저항의 변화가 작을 것으로 예상된다.

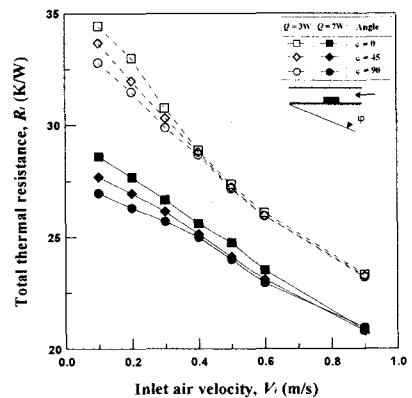


Fig. 8 Total thermal resistances vs. inclined angle for different inlet air velocities

따라서 모듈에서 기관으로 전도열전달이 거의 없는 단열조건하에서 유입공기 속도가 저속의 경우의 모듈 냉각은 채널 경사각에 큰 영향을 받는다. 그러나 모듈냉각에 가장 크게 영향을 미치는 것은 입력열량 Q 이며, 다음으로 유입공기 속도 V_i , 채널 경사각 ϕ 의 순으로 판단된다. 따라서 저전도성 기관에 실장된 모듈에서는 유입공기 속도와 채널 경사각도를 증가시키면 냉각효과를 향상시킬 수 있다고 판단된다.

Fig. 9는 입력열량 Q 가 3W와 7W이고 유입공기 속도 V_i 가 각각 0.3, 0.6, 0.9m/s일 때, 채널 경사각 ϕ 의 변화에 대한 총열저항 R_t 의 변화를 나타낸 그림이다.

그림에서 채널 경사각이 증가하면 총열저항의 값은 감소하나 그 감소폭은 작다. 특히 유입공기 속도가 0.9m/s에서는 채널 경사각이 증가하여도 총열저항은 1% 정도로 거의 변화가 없다. 한편, 입력열량이 3W인 경우 경사각이 75°일 때에는 급격한 변화가 나타나는데, 이는 실험 오차일 것으로 사료되며 좀 더 연구할 필요가 있다고 판단된다.

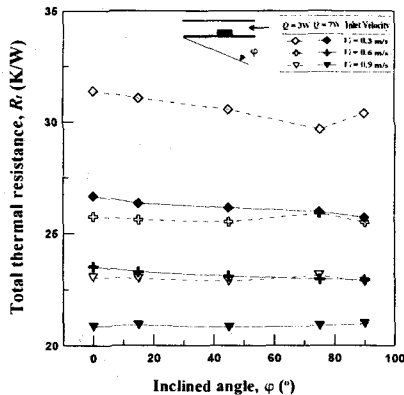


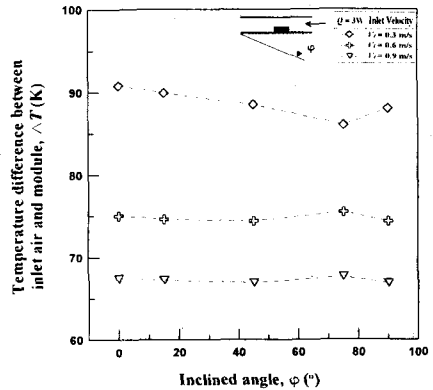
Fig. 9 Total thermal resistances vs. inclined angle for different inlet air velocities

Fig. 10(a)는 입력열량 Q 가 3W, Fig. 10(b)는 7W이고, 유입공기 속도 V_i 가 0.3, 0.6, 0.9m/s일 때, 채널 경사각 ϕ 의 변화와 유입공기와 모듈의 온도차 ΔT 의 관계를 나타낸 그림이다.

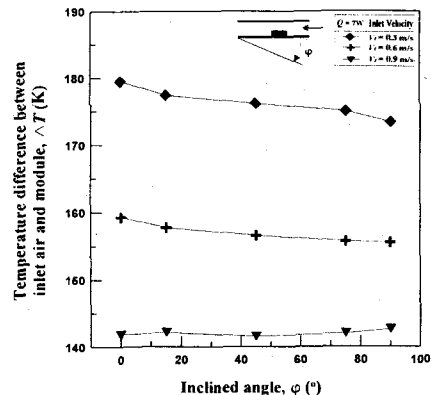
그림에서 입력열량이 3W와 7W 모두에서 채널 경사각이 0°에서 90°로 증가함에 따라 ΔT 가 감소함을 볼 수 있다. 이는 채널 경사각이 증가함에 따라 모듈에서 발생하는 부력과 유입공기의

유동이 같은 방향으로 작용하여 모듈 부근에서의 대류열전달을 향상시키기 때문이다.

또한 입력열량이 3W인 경우, 유입공기 속도가 0.5m/s 이하에서는 채널 경사각이 증가하면 ΔT 가 감소하며, Fig. 8에서와 같이 유입공기 속도가 작아질수록 그 기울기는 커진다. 그리고 입력열량이 7W인 경우 유입공기 속도가 0.9m/s 이하에서 3W일 때와 유사한 경향이 나타났다.



(a) $Q = 3W$



(b) $Q = 7W$

Fig. 10 Temperature differences between inlet air and module vs. inclined angle for different inlet air velocities

4. 결론

본 연구는 단열기관에 부착된 모사모듈이 평행 평판으로 이루어진 직사각형 채널밀면에 놓여 있

을 때, 유입공기 속도 V_i 가 0.1~0.9m/s이고 입력 열량 Q 가 3W와 7W일 때, 채널 경사각 ϕ 가 0° 에서 90° 로 증가함에 따른 모듈의 냉각특성을 실험적으로 구명하였다 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 모듈의 냉각에 가장 크게 영향을 미치는 것은 입력열량이며, 다음으로 유입공기 속도, 채널 경사각의 순이다.

둘째, 입력열량이 3W일 때는 유입공기 속도가 약 0.5m/s 이상, 그리고 입력열량이 7W일 때에는 약 0.9m/s 이상일 때, 모듈냉각에 미치는 채널 경사각에 의한 영향은 거의 무시할 수 있다($\phi=0^\circ \sim 90^\circ$ 에서 모듈온도의 변화는 약 2%이내).

끝으로 저전도성 기판에 실장된 모듈이 저속의 유동 속에 놓여 있을 때, 채널 경사각을 증가시키면 모듈의 표면온도를 감소시킬 수 있으며, 채널 경사각이 수직(90°)일 때 표면온도가 가장 낮다.

참고문헌

- (1) F. P. Incropera, 1988, "convection Heat Transfer in Electronic Equipment Cooling," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 1097~1111.
- (2) B. H. Kang, Y. Jaluria, S. S. Tewari, 1990, "Mixed Convection Transport From an Isolated Heat Source Module on a horizontal Plate," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 653~661.
- (3) S. S. Tewari, Y. Jaluria, 1990, "Mixed Convection Heat Transfer From Thermal Source Mounted on horizontal and Vertical Surface," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 975~987.
- (4) 이진호, 박상희, 유갑중, 방창훈, 2000, "3차원 채널 밑면에 탑재된 모듈로부터의 혼합대류 열전달," *대한기계학회논문집(B)*, 제24권 제5호, pp. 632~639.
- (5) Kamal K. Sikka, Timothy S. Fisher, Kenneth E. Torrance, and Charles R. Lamb, 1997, "Effects of Package Orientation and Mixed Convection on Heat Transfer from a PQFP," *IEEE transaction on components, packaging and manufacturing technology*, Part A, Vol. 20, No. 2 pp. 152~159.
- (6) C. Y. Choi and A. Ortega, 1993, "Mixed Convection in an Inclined Channel with a Discrete Heat Source," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 12, pp. 3119~3134.