

경사진 채널 밑면에 부착된 모사모듈의 복합열전달

이진호* · 조성훈**

Conjugated heat transfer of the simulated module on the bottom of a inclined channel

Jin-ho Lee, Seong-hoon Cho

Key Words: 복합열전달 (conjugated heat transfer), 모사모듈 (simulated module), 경사각 (inclined angle), 모듈지지부 (module support), 전도기판 (conductive board)

Abstract

The characteristics of conjugated heat transfer in the inclined channel was experimentally investigated. The simulated module is attached to the bottom of the inclined channel and is heated with constant heat flux. The experimental parameters of this study are input power ($Q=3, 7W$), inlet air velocity ($V_i = 0.1 \sim 0.9$ m/s) and inclined channel angle ($\varphi = 0 \sim 90^\circ$).

The results show that input power was most effective parameter on the temperature differences between module and air. As the inclined channel angle increases, the temperatures of the module are increased. And we obtained the best condition on the conductive board when $\varphi = 0^\circ$.

기호설명

- A : 채널의 단면적 [mm^2]
- D_h : 채널 수력직경 [mm], $4A/P$
- h : 열전달계수 [$W/m^2 \cdot K$]
- k : 열전도율 [$W/m \cdot K$]
- L : 모듈길이 [mm]
- Nu : Nusselt수 ($= h \cdot L/k$)
- P : 채널의 둘레길이 [mm]
- Q : 입력열량 [W]
- R : 열저항 [K/W]
- Re : Reynolds수 ($= V_i \cdot D_h/\nu$)
- S : 접촉면적 [mm^2]
- t : 모듈높이(두께) [mm]
- T : 온도 [K]
- V : 공기 속도 [m/s]

θ : 무차원온도 ($= (T_m - T_i)kL/Q$)

ν : 동점성계수 [m^2/s]

φ : 채널의 경사각 [$^\circ$]

하첨자

- A : 공기로의 대류열전달
- B : 전도기판을 통한 복합열전달
- c : 모듈지지부
- i : 채널입구
- m : 모듈 (module)

1. 서론

개인용 통신장비와 휴대용 계측장비, 그리고 노트북 컴퓨터 등 휴대가 가능한 전자장비의 필요성이 증대됨에 따라 전자장비는 소형화되고, 그에 따른 고밀도 집적이 요구되고 있다. 이러한 소형·고집적의 전자장비의 개발은 전자장비 내부에서의 발열량을 증가시켰다. 또한 이 발생열

* 육군 3사관학교 기계공학과

** 경북대학교 기계공학부 대학원

은 전자장비의 온도를 상승시켜 신뢰성과 안정성의 확보라는 해결과제를 남겼다. 예로써 미 공군의 조사에 따르면 전자장비의 주요 고장 원인 중 온도에 의한 것이 전체의 50% 이상을 차지하고 있다고 한다.

이처럼 전자장비의 소형·고집적화가 계속됨에 따라 전자장비 내부의 열유속(heat flux)이 가까운 장래에 $100 \sim 200 \text{ W/cm}^2$ 가 될 것으로 예측된다⁽¹⁾. 이 때 칩에서 발생하는 열은 칩의 온도를 상승시키는데, 실리콘 칩의 경우 그 신뢰성은 칩의 온도가 설계온도보다 10°C 상승할 때마다 50% 이상 감소한다고 한다⁽²⁾. 일반적으로 단일칩 모듈(single chip module)의 경우 상업용 전자장비는 65°C , 군사용 전자장비는 $110 \sim 125^\circ\text{C}$ 로 내부온도를 제한하고 있으며, 다중칩 모듈(multi chip module)의 경우는 $75 \sim 85^\circ\text{C}$ 범위로 제한하고 있다. 이를 위해 대부분 발열모듈 위에 냉각팬(cooling fan)을 부착하는 강제공냉방식이 많이 사용되고 있으나 소음, 먼지 등의 문제가 심각하다.

이렇게 전자장비의 내부온도를 제한온도 이하로 유지시켜 전자장비의 핵심부품 보호, 신뢰성과 안정성 확보, 소음공해 해소를 위해서는 전자장비 내에서 저속의 공기로 효과적인 냉각을 할 수 있는 기술이 필요하다. 이 중 하나가 Fig. 1과 같이 발열모듈로부터 열이 대류열전달을 통해 공기로 전달되는 열량(Q_A)과 전도기관을 통해 전도되었다가 다시 공기로 전달되는 열량(Q_B)을 모두 고려한 복합열전달 냉각방식이다. 이 때 Q_R 은 복사에 의한 방열을 나타낸 것이다. 복합열전달에 의한 모듈의 냉각시에는 기관의 열전도성과 I/O Pin의 열저항이 냉각성능에 매우 큰 영향을 주는 요소가 된다.

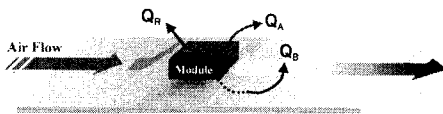


Fig. 1 Heat transfer paths at the module

복합열전달에 관한 연구는 최근까지 다양하게 진행되어 왔다. Graham과 Witzman⁽³⁾은 최초로 복합열전달의 중요성을 3차원 모듈연구를 통해 강조하였다. 유갑종 등⁽⁴⁾은 채널에 부착된 모듈로부터 공기와 전도기관을 통한 복합열전달에 관한 실험적 연구를 수행하였다. Kim과 Anard⁽⁵⁾는 기

판의 열전도율이 전자장치냉각의 설계와 분석에서 중요한 인자가 된다고 하였으며, Nakayama와 Park⁽⁶⁾은 복합대류열전달에서 I/O핀의 열저항이 기관으로의 전도열전달에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

현재까지의 연구에서는 경사진 채널에서의 돌출 가열모듈에 대한 복합열전달 현상에 대한 연구는 거의 찾아볼 수 없었다.

따라서 본 연구에서는 저속의 공기유동에서 경사진 채널 밀면의 전도기관 위에 실장된 모듈이 냉각 될 때, 발열모듈의 온도변화를 조사하였다. 이때 여러 가지 열적 데이터들의 변화를 구명함으로써 모듈 냉각의 최적조건을 구하는데 그 목적이 있다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 2는 본 실험에서 사용한 장치들의 개략도이다.

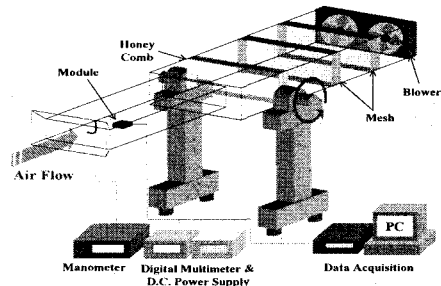


Fig. 2 Experimental apparatus

실험장치의 우측 말단에 설치된 12개의 직류팬(DC fan, Just Cooler FC 900L)에 의해 공기가 흡입방식으로 시험부에 유입되는데, 이 유입공기의 속도는 직류전원공급장치(DC Power supply, HP 6282A)로 조절하였다. 이때 유입공기의 속도측정은 채널 입구에서 3cm 떨어진 곳의 채널중앙부에 설치된 피토투관(pitot tube)과 마노미터(Micro Manometer, Furness FCO 510)를 이용하여 수행하였다. 또한 시험부 내로 유입되는 공기의 속도를 균일하게하기 위하여 메쉬(mesh)와 허니콤(honeycomb)을 설치하였다.

모든 실험은 항온챔버 내에서 수행하여 유입공기의 온도차를 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이내로 유지하도록 하였

다. 또한 모든 실험장치들은 전자기적 노이즈를 최소화하기 위해 동선으로 접지를 하였다.

모듈은 Fig. 3 (a)와 같이 동판을 사용하여 $31 \times 31 \times 4 \text{ mm}^3$ 로 만들고, 포일히터 (Kapton flexible thermo foil heater, OMEGA KHLV 101/5P)를 삽입하여 일정한 열량을 공급할 수 있도록 하였다.

모듈에 공급되는 전원은 직류전원공급장치 (DC Power Supply, HP E3611A)와 디지털 멀티미터 (EDM-4750, HP 8842A)로 이루어진다. 또한 모듈은 Fig. 3 (b)와 같이 시험부 입구에서 정확히 250 mm 떨어진 중앙에 모듈지지부를 설치하고 그 위에 장착하였다. 이때 모듈지지부는 칩의 I/O Pin을 모사한 것으로써 Fig. 3 (a)와 같이 $31 \times 31 \times 3 \text{ mm}^3$ 크기의 사각링 형태의 순동(pure copper)으로 제작하였다. 이 때 모듈지지부의 열저항은 식 (1)을 사용하여 계산하였다.

$$R_c = t_c / k_c S_c \quad (1)$$

본 실험에서 사용한 모듈지지부의 열저항 R_c 값은 각각 0.05, 158 K/W로 계산되었다.

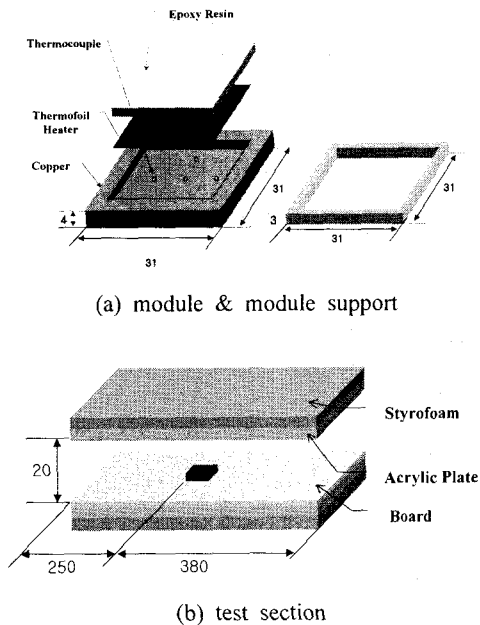


Fig. 3 Schematics of module and channel

Fig. 3 (b)는 채널 밑면에 모듈이 설치된 시험부

를 나타낸 그림이다. 시험부는 그림에서와 같이 두께 10 mm의 투명 아크릴판(acrylic plate)으로 길이 630 mm, 폭 300 mm, 높이 20 mm로 제작하였다. 그리고 모듈이 설치된 기판(board)은 동판으로 제작하였으며, 기판의 크기는 길이 500 mm, 폭 300 mm이고, 두께는 0.5 mm이다.

2.2 실험범위

본 실험에서 채널경사각(φ)는 0에서 90°이고, 입력열량(Q)은 각각 3, 7W, 그리고 유입공기속도(V_i)는 0.1~0.9 m/s로 변화하였다. 구체적인 실험조건은 Table 1에 표시하였다.

Table 1 Experimental conditions

Parameter	Condition
Input power(Q , W)	3, 7
Inlet air velocity(V_i , m/s)	0.1, 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)	0.05, 158
Reynolds Number (Re)	200 ~ 2000

3. 실험결과 및 분석

Fig. 4는 모듈입력열량 Q 가 각각 3, 7W일 때 채널 수력직경을 기준으로 얻어진 레이놀즈수 Re와 평균누셀트수 Nu의 관계를 나타낸 그림이다.

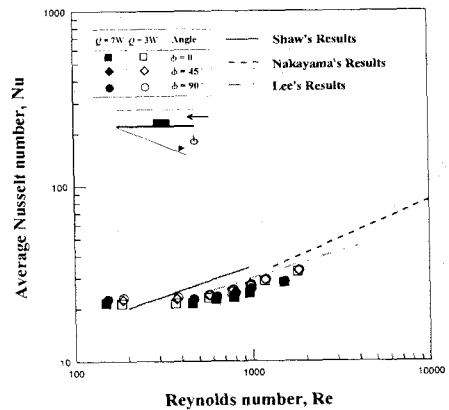


Fig. 4 Relations between Reynolds and Nusselt number

본 실험의 결과는 Re 가 250이하에서는 Shaw 등⁽⁷⁾의 연구결과와 최대 13% 정도의 오차가 있다. 그러나 Re 가 600에서 900까지의 범위에서는 최대 7% 이내로 잘 일치한다. 이는 Re 가 250이하에서의 결과는 공기속도가 매우 작아서 균일 정상유동을 얻지 못하여 발생한 실험오차로 판단된다. 한편 Re 가 900에서 2000까지의 범위에서는 Nakayama 등⁽⁶⁾의 결과와는 최대 8% 이내의 오차가 있고, Lee 등⁽⁹⁾의 결과와는 $600 < Re < 2000$ 에서 오차가 최대 5% 이내였다. 따라서 본 실험장치와 방법이 타당한 것으로 사료된다.

Fig. 5 (a), (b)는 모듈지지부의 열저항 R_c 가 0.05 K/W이고 입력열량(Q)이 각각 3W, 7W일 때, 유입공기속도의 변화($V_i = 0.1 \sim 0.9$ m/s)와 채널 경사각($\varphi = 0, 45, 90^\circ$)에 따른 모듈과 공기의 온도차(ΔT)의 관계를 나타낸 그림이다.

Fig. 5 (a)에서 ΔT 는 V_i 가 증가함에 따라 선형적으로 감소하며, Q 가 7W일 때가 3W일 때보다 그 감소폭이 더 크다. 이는 Q 가 커지면 모듈의 온도가 상승하고 모듈 주위의 온도도 상승하게 된다. 그 결과 모듈 주위 공기의 부력과 유입공기의 구동력이 더해져서 모듈표면에서의 대류 열전달이 향상되기 때문이다. 또한 V_i 가 0.5 m/s 이상에서는 0.1~0.5 m/s 일 때에 비해 ΔT 의 감소폭이 작다. 이는 강제대류의 영향이 지배적인 0.5 m/s 이상에서는 부력의 영향이 거의 없기 때문이라 사료된다.

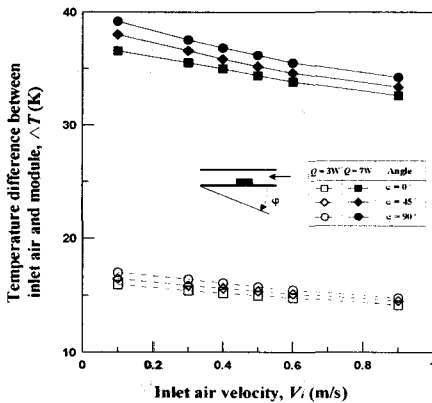


Fig. 5(a) Temperature differences vs. air velocities for various inclined angles

Fig. 5 (b)는 채널 경사각의 변화에 따른 유입공기와 모듈의 온도차의 관계를 나타낸 그림이다.

φ 가 커짐에 따라 ΔT 는 선형적으로 증가하며, Q 가 3W일 때 φ 가 0° 에서 90° 까지 변화하면 ΔT 는 약 6% 상승하였고, 7W일 때는 약 5% 상승하였다. 이러한 현상은 Fig. 5 (a)의 결과와 잘 일치한다. 이때 모듈의 냉각에 가장 중요한 모듈의 온도는 입력열량의 크기에 따라서 가장 큰 영향을 받으며, 다음으로 유입공기속도, 채널경사각 순으로 영향을 받고 있다.

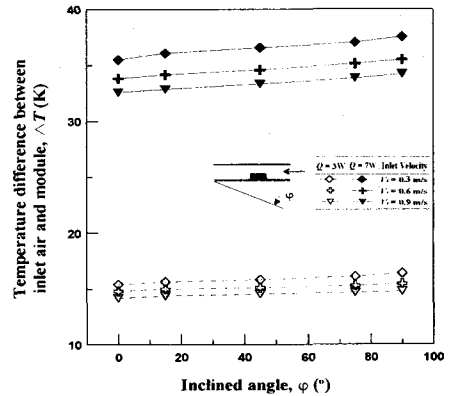


Fig. 5 (b) Temperature differences vs. inclined angles for various air velocities

Fig. 6은 Fig. 5와 같은 조건에서 Re 와 무차원 온도(θ)의 관계를 나타낸 그림이다.⁽⁸⁾

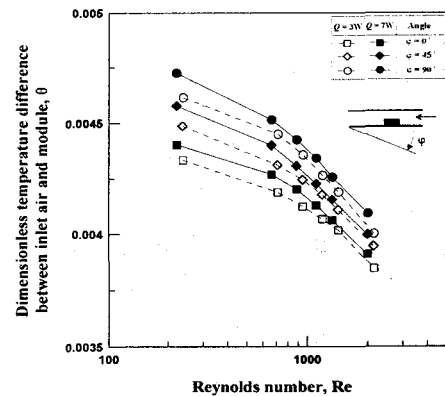


Fig. 6 Dimensionless Temperature differences vs. Reynolds number for different inclined angles

그림에서 보는 바와 같이 θ 는 Re가 200~900에서는 입력열량이 7W인 경우가 3W인 경우보다 더 크지만, 900이상에서는 그 차이가 작아진다. 또한 채널 경사각이 0°에서 90°으로 증가함에 따라 θ 는 증가한다. 이는 Re가 900이상인 경우에는 모듈에 의해 가열된 공기의 부력이 모듈냉각에 미치는 영향이 거의 없기 때문이다.

Fig. 7 (a), (b)는 모듈지저부의 열저항(R_c)이 0.05 K/W이고 입력열량(Q)이 각각 3W, 7W일 때, 유입공기속도의 변화($V_i=0.1\sim 0.9$ m/s)와 채널경사각($\varphi=0, 45, 90^\circ$)에 따른 모듈에서 전도기판으로의 열저항(R_B)의 관계를 나타낸 그림이다.

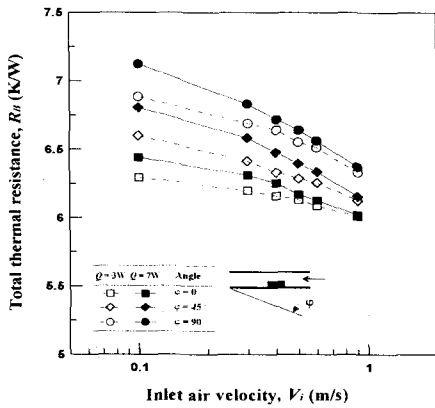


Fig. 7 (a) Conduction thermal resistances vs. air velocity for various inclined angles

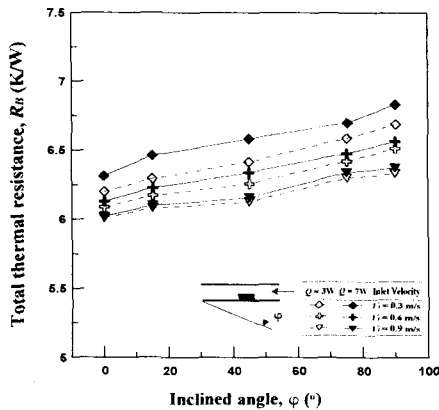


Fig. 7 (b) Conduction thermal resistances vs. inclined angle for various air velocities

Fig. 7 (a)에서 R_B 는 V_i 가 0.1~0.4m/s까지는 서서히 감소하다가 0.5m/s 이상에서는 급격히 감소한다. 이는 V_i 가 0.5 m/s 이상에서는 강제대류에 의한 냉각효과가 커지기 때문으로 사료된다.

Fig. 7 (b)에서 R_B 는 φ 의 증가에 따라 선형적으로 커진다. φ 가 커지면 모듈에 의해 가열된 공기의 부력이 커지고, 여기에 유입공기의 구동력이 더해져 모듈에서 공기로의 열전달량이 커지게 된다. 그 결과 대류열저항(R_A)는 감소하기 때문에 R_B 가 상대적으로 증가하게 된다. 따라서 채널경사각이 큰 경우에는 전도기판을 통한 복합열전달에 의한 냉각효과가 감소함을 알 수 있다.

따라서 동일한 입력열량과 공기속도인 경우, 모듈의 냉각은 채널의 경사각을 작게 하는 것이 더 효과적이다.

Fig. 8 (a), (b)는 Fig. 7(a), (b)와 같은 조건하에서 Re의 변화에 따른 입력열량에 대한 전도열전달량 비(Q_B/Q)의 관계를 나타낸 그림이다.

Fig. 8 (a)에서 보는 바와 같이 Re가 증가함에 따라 Q_B/Q 는 선형적으로 감소한다. 이는 유입공기의 속도가 증가하면 모듈에서 공기로의 대류열전달량이 증가하게 되어 결국 기판으로의 복합열전달량이 감소하기 때문이다.

Fig. 8 (b)에서 φ 가 증가함에 따라 Q_B/Q 는 선형적으로 감소한다. 이러한 경향은 Fig. 7(b)의 결과와 잘 일치한다.

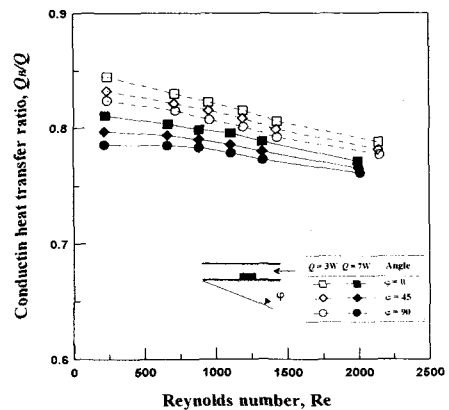


Fig. 8 (a) Conduction heat transfer ratio vs. Reynolds number for various inclined angles

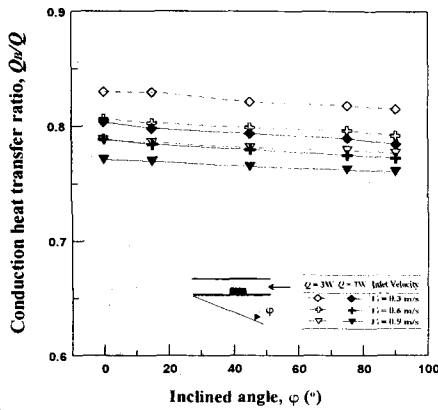


Fig. 8 (b) Conduction heat transfer ratio vs. inclined angles for various air velocities

4. 결론

본 연구에서는 모듈지지부의 열저항(R_c)이 0.05 K/W, 입력열량(Q)이 각각 3W, 7W이고, 유입공기속도(V_i)가 0.1~0.9 m/s ($Re \approx 200 \sim 2000$)일 때, 채널경사각(ϕ)의 변화($0^\circ \sim 90^\circ$)에 따른 모듈의 냉각특성을 실험적 방법으로 조사하였다. 특히 전도기판을 발열모듈의 전열 확장면으로 하는 복합열전달 냉각방식에 대해 중점적으로 구명하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 동일한 입력열량과 공기속도인 경우, 모듈의 냉각은 채널의 경사각을 작게 하는 것이 더 효과적이다. 따라서 전도기판을 사용하는 전자장비는 기판의 각도가 수평($\phi = 0^\circ$)일 때 모듈의 냉각효과가 가장 크다.

둘째, 레이놀즈수가 약 900이상일 때, 공기의 부력이 모듈의 냉각에 미치는 영향은 거의 없다.

셋째, 채널경사각이 증가함에 따라 모듈온도는 선형적으로 증가한다. 이때 채널경사각이 0° 에서 90° 까지 변화하면, 모듈온도는 입력열량이 3W, 7W일 때 각각 약 6%, 약 5% 상승한다.

- (1) A. Gupta, Y. Jaluria, 1998, "Forced Convective Liquid Cooling of Arrays of Protruding Heated Elements Mounted in a Rectangular Duct," ASME Journal of Electronic Packaging, Vol. 120, pp. 243~252.
- (2) Nelson L. A., Sekhon K. S. and Fritz J. E., 1978, Direct Heat Pipe Cooling of a Semiconductor Devices, Int. Heat Pipe Conf., pp. 373-376.
- (3) Graham, K. and Witzman, S., 1988, Analytical Correlation of Thermal Design of Electronic Packages, Cooling Technology for Electronic Equipment, pp. 249-264.
- (4) 유갑중, 이진호, 박상희, 1998, 채널벽면에 탑재된 모듈로부터 혼합대류 공기류로의 복합 열전달, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 122-127.
- (5) Kim, S. H and Anard, 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.
- (6) Nakyama, W. and Park, S. H., 1996, Conjugate 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.
- (7) Shaw, H. J. and Chen, W. L., 1991, Study on the laminar mixed convective heat transfer in Three-Dimensional Channel With a Thermal Source, Journal of Electronic Packaging, Vol. 113, pp. 40-49.
- (8) Yutaka Asako, Mohammad Faghri, 1989, Three-dimensional heat transfer analysis of arrays of heated squared blocks, Int. J. Heat Transfer, Vol. 32, No. 2, pp.395-405.
- (9) 이진호, 유갑중, 이병화, 2000, 수평채널 밑면에 탑재된 단일모듈의 열저항과 기판재질이 모듈의 냉각에 미치는 영향, 공기조화냉동공학회 하계학술발표회 논문집(I), pp. 164-171.