

채널 유동장 내에 배열된 전자부품의 강제대류 냉각 특성에 관한 연구(I)

- 채널과 발열부품의 높이 비(H/B)의 영향(히트싱크가 부착되지 않은 경우) -

김 광 수, 양 장 식**
(주)에이팩, (주)기경 IE&C

Cooling Characteristics on the Forced Convection of an Array of Electronic Components in Channel Flow (I) - The Effect of H/B (without the Heat Sink) -

Kwang Soo Kim, Jang Sik Yang**
APACK Inc., DaeJeon 305-348, Korea

*K. K, Incinerator Engineering & Construction Co., Ltd., Pusan 616-829, Korea

(Received July 4, 2005; revision received December 12, 2005)

ABSTRACT: Present study is concerned with an experimental study on the cooling characteristics of heat-generating components arranged in channels which are made by printed circuit boards. To assess the thermal performance of the heat-generating components arranged by 5×11 in flow channel, three variables are used: the velocity of the fluid at the entrance, the height of channel, and row number of the component. The cooling characteristics of the heat-generating components such as the surface temperature rise, the adiabatic temperature rise, the adiabatic heat transfer coefficient, and the effect of thermal wake are compared with the result of the experiment and the numerical analysis. Based on the experiment analysis, some conclusions can be drawn: First of all, the experiment and numerical analysis are identical comparatively; the heat transfer coefficient increases as H/B decreases. However, when H/B is over 7.2, the effect of H/B is rather trivial. The effect is the biggest at the first component from the entrance, and it decreases until the fully developed flow, where it becomes very consistent. The thermal wake function calculated for each row decreases as H/B increases.

Key words: Adiabatic heat transfer coefficient(단열 열전달계수), Adiabatic temperature(단열온도), Thermal wake(열후류)

기 호 설 명

A : 발열부품의 전열면적 [m^2]

B : 발열부품의 높이 [m]

H : 채널 높이 [m]

h_{ad} : 단열 열전달계수 [$W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$]

I : 발열부품에 인가한 전류 [A]

k : 열전도계수 [$W/m\text{ }^\circ\text{C}$]

L : 발열부품 길이 [m]

Q_{cond} : 전도에 의한 전열량 [W]

† Corresponding author

Tel.: +82-51-336-6504; fax: +82-51-336-6514

E-mail address: yangjs@pusan.ac.kr

Q_{conv}	: 대류에 의한 전열량 [W]
Q_{rad}	: 복사에 의한 전열량 [W]
Re	: Reynolds 수 (= $V_{in}L/\nu$)
S	: 발열부품의 배열간격 [m]
T_{ad}	: 부품의 단열온도 [°C]
T_{aji}	: i 번째 부품 발열시 j 번째 부품의 단열온도 [°C]
T_{in}	: 입구공기온도 [°C]
T_m	: 혼합 평균 온도 [°C]
T_s	: 발열부품의 표면온도 [°C]
ΔT_{ad}	: 발열부품의 단열온도상승 [°C]
ΔT_s	: 발열부품의 표면온도상승 [°C]
V	: 발열부품에서의 전압강하 [V]
V_{in}	: 입구공기유속 [m/s]

1. 서 론

전자통신장비에 탑재된 인쇄회로기판에는 고발열 전자부품들이 고밀도로 실장되어 있으며, 이들 전자부품의 동작온도를 규정온도(일반적으로 75°C 이하)로 유지하기 위해 발열량, 발열밀도, 실장공간 등을 고려하여 자연대류, 강제대류, 비등냉각 등 여러 가지 냉각방식을 사용하고 있다.⁽¹⁾

이들 중 채널 유동장 내의 강제대류 냉각에 관한 연구는 전자부품의 냉각문제가 긴급한 현안으로 대두된 1980년도 중반부터 본격적으로 수행되어 왔으며, 그 전까지는 파이프 유동 또는 단순한 채널 내 유동 및 열전달에 관한 연구를 수행해 왔다.⁽²⁾

Sparrow et al.⁽³⁾은 유동장 내에 장애물을 설치하여 열전달계수를 향상시키는 방법과 배열된 부품을 하나씩 제거할 경우의 열전달 영향을 나프탈렌승화법을 이용해 연구하였다. Moffat et al.⁽⁴⁾은 대류 냉각에서 임의로 배열된 부품의 온도분포를 계산하기 위해 중첩법을 제안하였으며, 직선으로 배열된 부품의 열전달계수와 중첩함수를 구하였다. Wirtz and Mathur⁽⁵⁾는 유동 채널 내 배열된 납작한 형상의 부품의 열후류함수와 열전달계수를 채널 높이와 입구유속의 함수로 제안하였다. Biber and Sammakia⁽⁶⁾는 3차원 부품배열로 넓은 영역의 레이놀즈수에 대해 중첩기술을 제시하였으나, 중첩함수 또는 열전달계수 등의 모델링 방안을 제시하지 못하였다. Copeland⁽⁷⁾는 열전달계수가 열(row) 순서나 채널 높이보다 발열체 간

의 간격 및 유속에 더 크게 영향을 받는다고 하였다. Kim et al.⁽⁸⁾은 5×8배열의 납작한 형상의 발열부품에 대해 유속과 채널 높이 변화에 따른 냉각 특성을 실험과 수치해석으로 구하였다. 이들에 의하면 Nu-Re 상관관계식은 $Nu=0.89Re^{0.49}$ 로 일반 통신시스템에서 많이 사용되고 있다.

본 연구에서는 히트 싱크가 부착되지 않은 경우에 채널 유동장 내에 배치된 발열부품의 열전달 특성 및 열후류의 영향을 실험으로 구하고자 한다. 본 연구에 이용된 실험모델은 기존 연구들과는 약간의 기하학적 차이가 있다. 기존 연구의 실험모델은 실제 사용되기 어려운 영역(부품 크기, 유속, 채널 높이 등)에서 대부분 수행한 것에 비해 본 연구에서는 발열부품을 현재 상용화되고 있는 일반적인 주면형 반도체의 크기와 거의 같게 하였으며, 유속영역도 실제 통신시스템에서 사용하고 있는 1.5~4.0 m/s 영역이다. 또한 인쇄회로기판이 형성하는 유동 채널 높이도 가능한 실제 사용되고 있는 것과 유사하게 하였다.

2 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 이용된 실험모델로서 통신시스템 내에 인쇄회로기판에 의해 형성된 유동 채널을 나타낸 그림이다. Fig. 2와 같은 가로, 세로, 높이의 크기가 35×35×5 mm 크기의 발열부품을 두께 4.0 mm의 플렉시글라스(plexi-glass, 650×265 mm)에 50 mm의 간격으로 배열(5×11)하여 부착하였다. 채널 입구와 출구의 영향을 최소화하기 위하여 입구 끝단으로부터 50 mm 위치에 첫번째

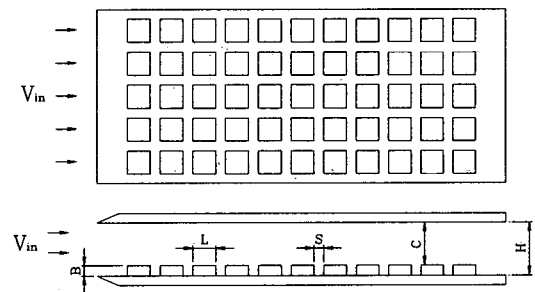


Fig. 1 Experimental model of coolant channel formed by printed circuit board.

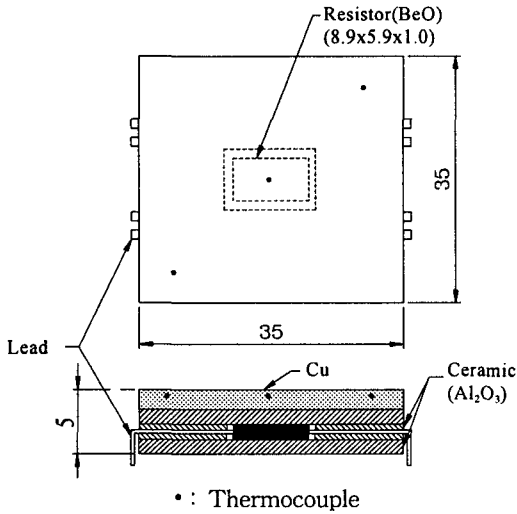


Fig. 2 Schematic of the heated component (Unit: mm).

발열부품을 부착하고, 출구로부터 65 mm 위치에서 마지막 11번째 발열부품이 위치하도록 하였다. 플렉시글라스 판 하부에는 단열을 위하여 10 mm 두께의 스펀지를 플렉시글라스 판 아래에 넣고 밀착하여 풍동 내에 고정하였다. 채널 상부판은 4.0 mm 두께의 플렉시글라스 판으로 그 채널 높이(H)를 16~46 mm 범위에서 10 mm 간격으로 조절할 수 있도록 하였다.

Fig. 2는 실험에 사용된 발열부품의 조립형상을 나타낸 것으로 1 mm 두께의 알루미늄(Al_2O_3) 상하판과 그 사이에 삽입될 중간판은 중앙부의 레이어 가공된 홈에 고발열 용량의 발열체인 베릴리아(BeO) 재질의 저항체(8.9×5.9×1.0 mm)를 부착한 후, 3개의 알루미늄 판을 에폭시 본드로 부착하여 조립하였다. 중간에 삽입된 저항체에 전력을 공급하기 위해 구리 분말을 전면에 걸쳐 도포하여 전원선까지 연결함으로써 발생열을 분산시

키는 효과와 전류밀도(current rate)를 낮춰 주는 효과를 가져오게 하였다. 조립된 알루미늄 상부에 1.5 mm 두께의 구리판을 열전도성 본드(Thermalloy Inc., 4592)로 부착하여 발열부품 전체 두께가 5 mm가 되도록 하였다.

상부에 부착된 구리판 내부의 중심과 가장자리에 3개 홈을 가공하여 각각 T형 열전대(직경 0.32 mm)를 부착하여 발열부품 표면으로부터 0.5 mm 하부에서 온도측정을 할 수 있도록 하였다. 발열부품의 온도는 중심과 가장자리 2개에서 측정된 온도를 산술 평균하여 그 부품의 온도로 취함으로써 실험의 신뢰성을 제고하였다. 이 발열부품은 50 Ω, 100 W 용량으로 온도변화에 매우 안정된 전기적 특성을 보유하고 있으며, 실제 SMD(Surface Mounting Device) 전자부품의 형상을 근접하게 모사하였다.

실험에 사용된 풍동(AD-SWT400)은 개방/흡입형이고, 측정부 크기는 400×400×1,000 mm이고, 측정범위는 1~7 m/s이다. 유속을 측정하기 위한 LDV 시스템은 Aerometrics사의 2-D Fiber Optic형으로 프로세서는 RSA-1000이다. 온도측정을 위해 16채널 용량의 Data Logger System(Campbell Scientific Inc.) 3대를 사용하였다. 입구공기온도와 보드를 통한 전도열량을 측정하기 위해 플렉시글라스 표면 및 뒷면에 열전도성 본드를 사용하여 부착하였다. 풍동의 측정부에는 각 채널에 균일한 유동을 공급하기 위해 측정부 채널 높이와 동일한 높이로 4 mm 두께의 더미보드(dummy board)를 설치하여 각 채널에 균일한 유량이 공급되도록 하였다.

2.2 실험방법

Table 1은 본 연구에서의 실험조건을 정리하여 나타낸 것으로 주요 실험변수는 채널과 발열부품

Table 1 Experimental parameters

Parameters	Conditions
Reynolds number ($V_{in}L/\nu$)	6028
Channel space ratio (H/B)	3.2~9.2 ($H=16\sim46$ mm)
Row number	11
Component length (L)	35 mm
Component thickness (B)	5 mm
Component spacing (S)	15 mm

의 높이 비(H/B), 입구유속, 부품 위치 등이며, 이에 따른 단열 열전달계수, 열후류 등의 열전달 특성을 구하고자 한다.

2.2.1 온도측정

열후류의 영향을 측정하기 위해서 각 열별 순서대로 1개의 열만 발열시키고 그 하류의 첫번째 열부터 순서대로 온도상승을 측정함으로써 상류에 위치한 발열부품으로 인한 열후류 영향을 구하였다. 이와 같이 하류의 발열부품의 온도상승은 자체 발열에 의한 온도상승과 상기에 언급한 열후류 영향의 합으로 나타난다.

2.2.2 유속측정

본 연구에서는 유속측정을 레이저 도플러 유속계를 사용함으로써 입구유속의 정확성을 제고하였다. 유속계의 Fiber Optic Transmitter/Receiver를 LDV 시스템과 연동되는 3축 이송장치에 부착하여 유동 채널 입구의 중앙에서 높이방향으로 0.5~1.0mm 간격으로 측정하였고, 각 위치에서 유효 측정데이터 수는 500개씩을 취하였다.

2.3 열전달계수 및 열후류합수 계산

2.3.1 열전달계수 계산

열전달계수를 구하기 위해서는 가장 먼저 대류에 의한 열전달량을 계산하는 것이 필요하다. 단열 발열부품에서의 대류 열전달량은 다음 식과 같다.

$$Q_{conv} = P - Q_{cond} - Q_{rad} - Q_{leadwire} \quad (1)$$

여기서, P 는 발열부품에 공급되는 열량으로 전류와 전압의 곱, 즉 $P = IV$ 로 계산된다. $Q_{leadwire}$ 는 발열부품에 부착된 전원공급용 전선 2개와 열전대 3쌍을 통한 전도에 의한 열량으로 1.1% 정도로 계산되었다. Q_{rad} 는 고온의 발열부품 표면과 상부 덮개 판 사이에 전달되는 복사 전열량으로 입력된 열량의 1% 이하⁽⁹⁾이며, Q_{cond} 은 발열부품이 탑재되어 있는 플렉시글라스를 통한 전열량으로 수치해석을 통해 계산한 결과 입력된 열량의 평균 6.3% 정도이다.

2.3.2 열후류합수 계산

i 번째 발열부품의 단열 열전달계수는 식(2)와

같이 표현할 수 있다.

$$h_{ad} = h_i = \frac{Q_{conv}}{A(T_s - T_{ad})} \quad (2)$$

여기서, 단열온도는 열역학적으로 완전한 의미에서 단열이 아니고 해당 부품은 발열하지 않고 다른 모든 부품들은 발열하게 되었을 때 그 해당 부품의 온도라고 정의하였다.⁽¹⁰⁾

또한 본 연구에서는 폭방향의 열전달 특성은 고려하지 않고 중앙의 1개 행에 대한 열전달에 대해 고려하고자 한다. i 번째 부품이 발열할 때 그 하류에 있는 j 번째 부품의 단열온도를 T_{aji} 로 정의한다. 여기서 i 가 1인 경우 $j = i+1, i+2, i+3, \dots, i+10$ 으로 주어진다. T_{aji} 가 생성되는 열후류에 대해 식으로 표현하면 식(3)과 같고, 이 식은 전달함수를 의미한다.

$$\theta_{j,i} = \frac{T_{aji} - T_{in}}{T_{si} - T_{in}} \quad (3)$$

여러 개의 부품에서 발열하게 되면, 열후류의 영향은 중첩이 가능하고, 자체 발열로 인한 온도상승은 식(2)의 h_i 에서 구할 수 있으므로 발열부품 하류에 있는 i 번째 부품에서의 표면온도상승은 식(4)로 표현할 수 있다.

$$T_{si} - T_{in} = \frac{Q_{conv}}{h_i A} + \sum_{k=1}^{i-1} \theta_{i,k} (T_{sk} - T_{in}) \quad (4)$$

2.4 실험결과의 불확실성 계산

단열 열전달계수 계산의 불확실성은 온도와 발열량의 측정오차가 주원인이므로, 온도측정 및 발열량 계산의 부정확성을 이용하여 Kline and McClinton⁽¹¹⁾이 제안한 방법을 이용하여 불확실성 계산을 수행하였다. 단열 열전달계수의 불확실성 범위는 최소값 8.6%, 최대값 5.5%였다. 또 레이놀즈수의 불확실성은 유속측정의 오차가 주원인이므로, LDV 시스템으로 각 위치당 500개씩 샘플 데이터를 처리한 것을 고려하고, 유사한 조건에서 열선 유속계로 측정한 Lehmann and Pembroke⁽¹²⁾의 결과 4%에 비교할 때, 레이놀즈수의 불확실성은 3% 이하라고 판단하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열전달 특성

Fig. 3은 $H=26\text{ mm}$, 입구유속 2.9 m/s 일 때, 각 발열부품 배열위치에 따른 채널 내 유속분포를 LDV로 측정된 것이다. 하류로 감에 따라 채널 내 유속분포는 점점 완전발달유동의 유속분포를 보이고 있으며, 4번째와 5번째의 속도분포가 동일한 유동속도분포를 나타내고 있기 때문에 4번째 부품위치에서부터 완전발달유동이 된다. 채널 내에서 완전발달 유동영역까지의 유동 메커니즘을 설명하면 다음과 같다. 균일한 유속의 공기가 채널 내로 유입되면 배열된 발열부품 냉각에는 영향을 미치지 않고 그냥 지나치는 통과영역(bypass region)과 배열된 부품 사이로 실제 냉각에 영향을 미치는 부품영역(array region)으로 구성된다.

Fig. 4는 유속을 일정하게 하고 채널 높이를 변

화시킬 때 발열부품 표면의 평균 온도상승을 나타낸 것이다. 본 연구에 이용된 수치해석은 상용 코드인 FLUENT를 이용하였으며, 지배방정식, 경계조건, 난류모델링에 관한 사항은 Kim⁽⁹⁾에 상세하게 기술되어 있기 때문에 결과에 대해서 기술하고자 한다. 수치해석의 결과는 실험의 결과와 거의 동일한 경향을 보이지만 실제값은 최고 8% 정도 더 높게 나타났다. 동일한 유속에서 채널 높이가 낮을수록 ΔT_s 는 낮아지는데, 이것은 기존 연구의 채널 유동 냉각 결과⁽⁴⁻⁵⁾와 잘 일치한다. 그러나 실험과 수치해석에서 동일하게 나타나는 현상으로 $H/B=3.2$, 즉 채널 높이가 가장 낮을 때, 9번째 발열부품까지는 ΔT_s 가 가장 낮게 되지만, 그 이상에서는 $H/B=5.2$ 에 비해 더 높아지고 있다. 이것은 채널 내 하류의 부품 표면온도(ΔT_s)는 자체 발열에 의한 온도상승과 상류의 열후류에 의한 온도상승의 합으로 나타나므로, Fig. 5의 열후류 특성에서 상세히 설명하고자 한다.

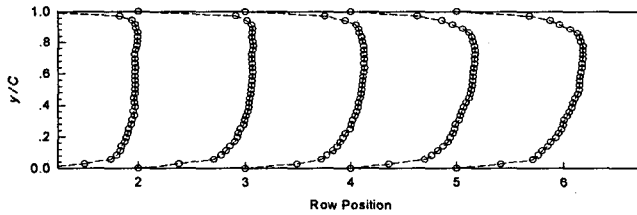


Fig. 3 Velocity distribution according to row number for $H=26\text{ mm}$.

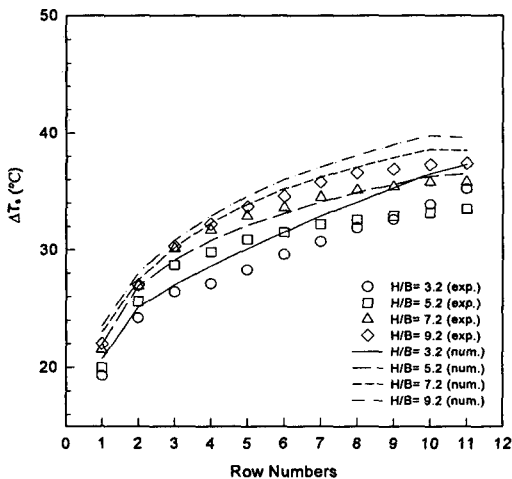


Fig. 4 Average surface temperature rise vs. row number for $Re=6028$, parametric in channel height ratio (H/B).

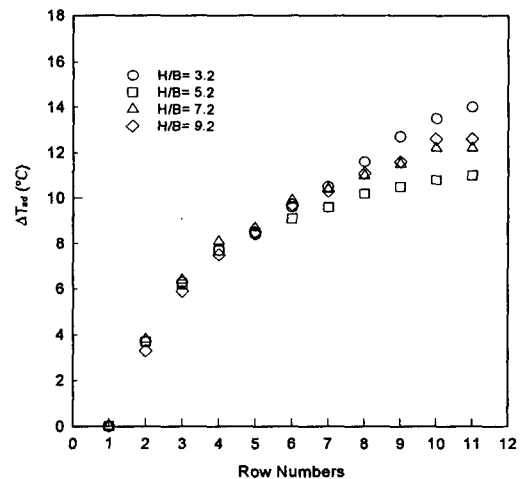


Fig. 5 Adiabatic temperature rise vs. row number for $Re=6028$, parametric in channel height ratio (H/B).

Fig. 5는 H/B 를 변경하면서 측정 대상 부품의 해당 열의 전원을 차단하고 나머지 부품 전체를 발열시켰을 때 그 부품의 온도상승을 나타낸 것이다. 동일한 유속에서 채널 높이가 변경되더라도 5~6번째 발열부품까지는 거의 비슷하게 상승하지만, 그 이상에서는 H/B 가 작을수록 단열온도상승(ΔT_{ad})은 작아진다. 그러나 $H/B=3.2$ 에서는 예외적으로 하류까지 계속 상승하여 출구에서 가장 높은 온도가 된다. 이것은 채널 높이가 낮은 $H/B=3.2$ 인 경우, $H/B=5.2, 7.2, 9.2$ 와 달리 단열온도 측정 대상 부품의 상류 발열부품들로부터 발생한 열이 채널 내에서 충분히 혼합될 뿐만 아니라, 발달된 유동이 단열온도 측정 대상 부품으로 이동하면서 발열부품들로부터 발생한 열이 단열온도 측정 대상 부품에 누적되기 때문이다. 즉, $H/B=3.2$ 의 경우 공기의 질량유량이 가장 작고 하류로 이동하면서 상류 발열부품의 누적에 의한 총발열량($\sum Q_i$)의 증가로 혼합온도($T_m = T_{in} + \sum Q_i / \dot{m} C_p$)가 가장 크게 된다. 이와 같은 이유로 Fig. 4에서 $H/B=3.2$ 일 때 $H/B=5.2$ 에 비해 8번째 발열부품까지는 부품 표면온도가 낮지만 그 이후 출구측에서 더 높아지게 되는 원인이 된다.

Fig. 6은 H/B 의 변화에 따른 단열 열전달계수를 나타낸 것이다. 단열 열전달계수는 H/B 가 감소할수록 증가하며, $H/B=7.2$ 와 9.2 인 경우, H/B

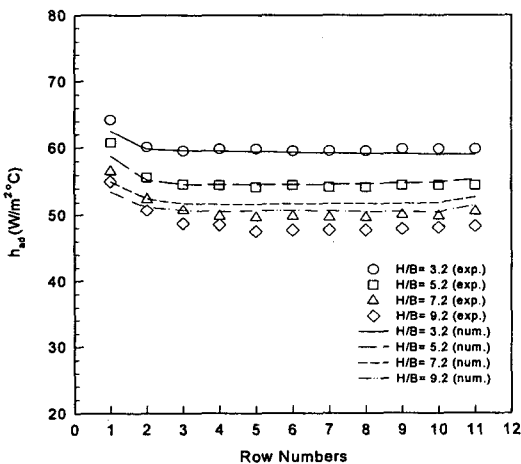


Fig. 6 Adiabatic heat transfer coefficient vs. row number for $Re=6028$, parametric in channel height ratio (H/B).

$=3.2$ 와 5.2 와 비교해 열전달계수의 감소율이 작은 것으로 보아 $H/B=7.2$ 이상에서는 H/B 의 영향이 적은 것을 알 수 있다. 또 수치해석 결과에서는 $H/B=7.2$ 와 9.2 조건에서 출구 마지막 발열부품의 열전달계수가 약간 상승하는 출구영향을 보이고 있다.

입구속도를 일정하게 유지할 때 채널 높이가 증가하면 유입되는 유량이 많아지는 데도 불구하고 단열 열전달계수가 감소하게 되는 현상은 Kim et al.⁽⁸⁾이 수행하였던 실험 및 수치해석 결과와도 잘 일치하고 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 비록 채널 높이가 커서 통과하는 유량은 많지만, 통과영역이 커지고, 압력강하가 작아지면서 유량의 많은 부분이 부품영역에서 통과영역으로 전환되기 때문이다. 즉, 채널 높이가 증가되면 냉각에 직접적인 영향을 주는 부품영역의 유량이 감소하게 되어 열전달계수가 낮아진다.⁽⁹⁾

3.2 열후류 특성

본 절에서는 상류의 발열부품이 하류에 배열된 부품에 어떤 열적인 영향을 주는지를 분석하고자 한다.

Fig. 7은 첫번째 열만 발열시켰을 때, 그 하류에서의 열후류 영향을 나타낸 것으로 동일한 유속에서 H/B , 즉 채널 높이가 낮을수록 열후류함

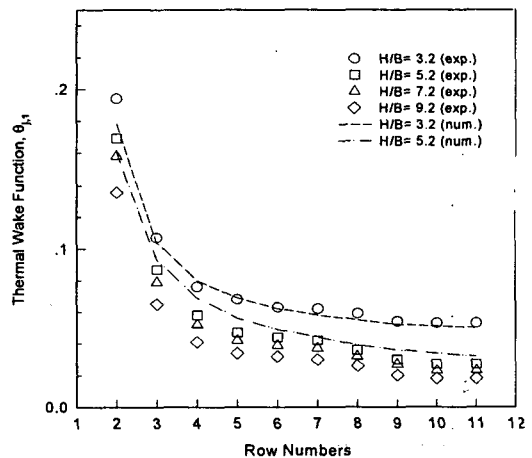


Fig. 7 Thermal wake function vs. row number for $Re=6028$, parametric in channel height ratio (H/B) (only row 1; power on).

수값은 커진다. 이것은 채널 높이가 낮을수록 냉각성능이 좋아져서 첫번째 발열부품의 표면온도 (T_{s1})는 낮아지며, 여기에 첫번째 발열부품을 냉각시킨 유동의 열은 부품영역 내에 많이 존재하면서 하류부품의 온도가 증가된다. 즉, 채널 높이

가 낮아지면 식(3)의 분모는 작아지고 분자는 커지므로 열후류함수값은 커진다. 많은 계산량으로 인해 $H/B=3.2$ 와 5.2 조건만 계산하였고, 수치해석 결과에서도 동일한 현상을 보이고 있다.

Fig. 7의 결과에서와 같이 $i+1, i+2, i+3$, 즉 발열부품 다음의 3번째까지 부품을 제외한 나머지 하류부품에 대한 열후류 영향은 적으므로, 이후 검토하는 열후류 영향도 이 부분까지만 고려할 것이다.

Fig. 8의 (a), (b), (c)는 각각 1차($\theta_{i+1,i}$), 2차($\theta_{i+2,i}$), 3차($\theta_{i+3,i}$) 열후류함수를 나타낸 것이다. H/B 가 작을수록 열후류함수값은 커지며, 입구부를 지나서 $H/B=3.2$ 인 경우를 제외하고 나머지 채널 높이에서는 거의 비슷한 값을 보이고 있다. 그리고 Fig. 8(b)의 $H/B=3.2$ 에서는 입구부에서 첫번째 발열부품의 열후류함수값이 더 높게 되는데, 이것은 채널 높이가 낮아 부품영역의 유동이 많아져 발생하는 현상이라고 판단된다. 또한 수치해석의 결과로 $H/B=3.2$ 에서의 열후류함수값을 같이 비교하였으며, 1차($\theta_{i+1,i}$) 열후류함수값은 실험과 비슷하지만, 2차($\theta_{i+2,i}$)와 3차($\theta_{i+3,i}$)에서 오차가 증가하였다.

4. 결론

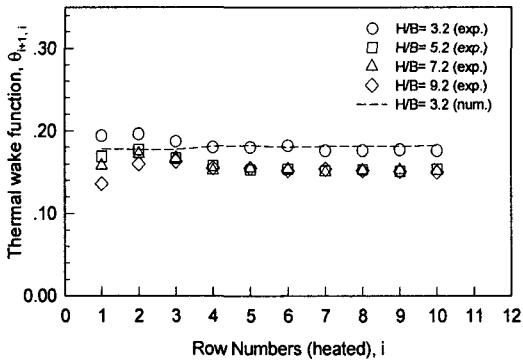
채널 내 5×11 로 배열된 발열부품에 히트싱크가 부착되지 않은 상태에서 채널 내 유속측정, 표면온도, 단열온도, 단열 열전달계수, 열후류 영향 등에 대해 실험과 수치해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) H/B 가 작을수록 발열부품 표면온도와 단열온도는 감소하며, $H/B=3.2$ 인 경우 출구측까지 계속 증가하는 반면, $H/B=5.2 \sim 9.2$ 조건에서는 출구측으로 갈수록 온도경계층이 커지면서 온도상승이 완만해지는 경향을 보였다.

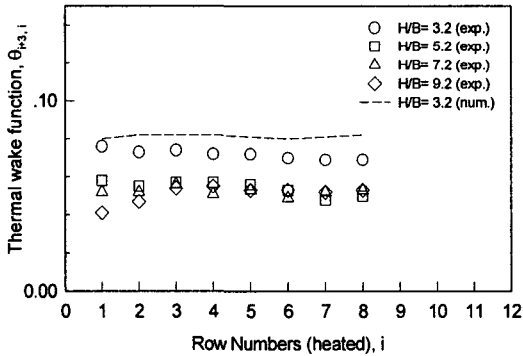
(2) H/B 가 작을수록 단열 열전달계수는 증가하였으며, $H/B=7.2$ 이상에서는 H/B 의 영향이 작았다. 또한 단열 열전달계수는 입구 첫번째 발열부품에서 가장 크고, 그후로 감소하여 완전발달 유동영역에서는 거의 일정하게 되었다.

(3) 각 열에서 구한 열후류함수값은 H/B 가 증가할수록 감소하였으며, $H/B=5.2$ 이상에서 H/B 의 영향은 작았다.

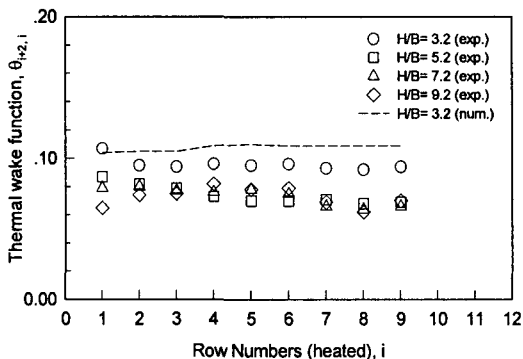
(4) 열후류 함수에서 2차 열후류함수값($\theta_{i+2,i}$)



(a) $\theta_{i+1,i}$



(b) $\theta_{i+2,i}$



(c) $\theta_{i+3,i}$

Fig. 8 Variation of thermal wake function with heated row position i , $Re=6028$.

은 1차($\theta_{i+1,i}$)의 평균 48%, 3차($\theta_{i+3,i}$)는 1차의 32%로 감소하였다.

참고문헌

1. Bar-Cohen, A., 1992, State-of-the-art and trends in the thermal packaging of electronic equipment, *ASME Journal of Electronic Packaging*, Vol. 114, pp. 257-270.
2. Pecht, M., 1991, *Handbook of electronic package handbook*, Marcel Dekker, Inc., New York.
3. Sparrow, E. M., Vemuri, S. B. and Kadle, D. S., 1983, Enhanced and local heat transfer, pressure drop, and flow visualization for arrays of block-like electronic components, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 26, No. 5, pp. 689-699.
4. Moffat, R. J., Arvizu, D. E. and Ortega, A., 1985, Cooling electronic components: forced convection experiments with an air-cooled array, *Proceedings of The 23rd National Heat Transfer*, HTD-Vol. 48, pp. 17-27.
5. Wirtz, R. A. and Mathur, A., 1994, Convection heat transfer distribution on the surface of an electronic package, *ASME Journal of Electronic Packaging*, Vol. 116, pp. 49-54.
6. Biber, C. R. and Sammakia, B. G., 1986, Transport from discrete heated components in turbulent channel flow, *ASME Preprint 86-WA/HT-68*, pp. 1-9.
7. Copeland, D., 1992, Effects of channel height and planar spacing on air cooling of electronic components, *ASME Journal of Electronic Packaging*, Vol. 114, pp. 420-424.
8. Kim, K. S., Kim, W. T. and Lee, K. B., 1998, Cooling characteristics on the forced convection of an array of flat-form electronic components in channel flow, *KSME International Journal*, Vol. 12, No. 1, pp. 132-142.
9. Kim, K. S., 1998, Cooling characteristics on the forced convection of an array of electronic components in channel flow, Ph.D. Thesis, Pusan National University.
10. Moffat, R. J. and Anderson, A. M., 1990, Applying heat transfer coefficient data to electronics cooling, *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 882-890.
11. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainties in single-sample experiments, *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3-8.
12. Lehmann, G. L. and Pembroke, J., 1991, Forced convection air cooling of simulated low profile electronic components: Part 2-heat sink effects, *ASME Journal of Electronic Packaging*, Vol. 113, pp. 27-32.