

# 전자모듈의 배열에 따른 열전달특성의 실험적 연구

이대희<sup>†</sup>·이대근\*·차운석\*·이준식\*

## An Experimental Study of Heat Transfer Characteristics on the Electronic Module Arrangement

Dae Hee Lee, Dae Keun Lee, Yoon Seok Cha and Jun Sik Lee

**Key Words:** Electronic Module(전자모듈), Flow Separation(유동박리), Heat Transfer Enhancement(열전달 촉진), Nusselt Number(누셀트 수), Reynolds Number(레이놀즈 수),

### Abstract

Heat transfer from three-dimensional heat-generating modules was investigated. A simulated electronic module in an array configured with dummy module elements was used to measure the average heat transfer coefficients. Various module arrangements were tested using module spacings of 0.85 and 1.15 cm for six Reynolds numbers ranging from 500 to 975. The results show that a module placed in-line with and upstream of a heated module results in the heat transfer enhancement due to a high level in turbulence prompted by upstream modules. The highest enhancement occurs when the separation distance between modules is close to the module length in the flow direction. Flow visualization reveals laminar flow on the front of the first module, slow recirculation regions on the sides parallel to the air stream, and turbulence on the back side. It appears that the first module serves to trip the air stream and produce a high level of turbulence, which enhances the heat transfer rate downstream.

#### 기호설명

$A_M$  : 모듈의 단면적(  $m^2$  )  
 $D_h$  : 수력 직경(  $m$  )  
 $h$  : 평균 열전달계수(  $W/m^2K$  )  
 $I$  : 전류(  $A$  )  
 $k$  : 공기의 전도율(  $W/mK$  )  
 $L$  : 길이(  $m$  )  
 $Nu$  : 누셀트 수(  $= hL/k$  )  
 $q$  : 모듈에서 발생한 전체 열전달율(  $W$  )  
 $q_L$  : 평판을 통한 대류 열손실율(  $W$  )

$q_v$  : 정미 열전달율(  $W$  )  
 $R$  : 전기저항(  $\Omega$  )  
 $Re$  : 레이놀즈 수(  $= UD_h/\nu$  )  
 $T_a$  : 유체의 온도(  $^\circ C$  )  
 $T_w$  : 모듈의 온도(  $^\circ C$  )  
 $U$  : 공기 속도(  $m/s$  )

#### 그리스 문자

$\nu$  : 공기의 동점성계수(  $m^2/s$  )

### 1. 서론

반도체와 집적회로 제조기술의 발달로 인하여 전자부품에서의 열전달은 직접회로를 최소화하는데 있어서 중요하게 인식되어 왔다. 칩(Chips) 사이즈의 소형화로 인해 트랜지스터들을 조밀하게

<sup>†</sup> 회원, 인제대학교 기계자동차공학부  
E-mail : mechdhl@inje.ac.kr  
TEL : (055)320-3185 FAX : (055)324-1723  
\* 인제대학교 대학원 기계공학과

배치할 수 있었으나 이로 인해 칩에서 높은 열이 발생하는 원인이 되어 지난 몇 년간 열유속이  $100 \text{ W/cm}^2$ 까지 증가하였다.<sup>(1)</sup> 최근 열에 의한 전자부품의 큰 손실 때문에 열전달을 효과적으로 다루는 방법들을 찾는데 관심이 증가하고 있다. 특히, 전자부품의 배열이 열전달에 미치는 영향에 관한 연구가 진행되고 있다. 또한 Reynolds수, 전력손실, 열후류함수 및 가열된 모듈의 상류(upstream)에서의 전자모듈의 배열이 열전달에 미치는 영향에 관한 연구가 많이 행해지고 있다. 비록 다른 여러 연구자들의 결과를 서로 비교하는 것이 특성 길이 스케일과 실험 Set-up의 차이로 인하여 쉽지는 않으나, Reynolds수와 전자모듈 배열의 함수로 열전달 관계식을 나타낼 수 있는 점에서 유사성이 확실히 있다.

Buller와 Kilburn<sup>(2)</sup> 및 Roeller 등<sup>(3)</sup>은 강제대류 조건 하에서 채널에 부착된 3차원 돌출부에서의 열전달을 실험적으로 연구하였다. Buller와 Kilburn<sup>(2)</sup>은 모듈의 크기에 무관한 무차원수를 얻기 위하여 Reynolds수의 함수로서의 Colburn j-factor를 제시하였다. Roeller 등<sup>(3)</sup>은 채널에서의 전자모듈 폭이 평균 열전달계수에 미치는 영향을 연구하였다. 이때 채널의 수력지름에 기초한 Reynolds수는 500~10,000이었다. 이때 그들은 돌출부 주변에서의 자세한 유동구조를 알기 위하여 국소 평균속도와 난류강도를 측정하였다. 그들의 실험결과는 모듈 폭과 채널벽 간의 거리가 감소할 때 Nusselt수는 증가함을 보여주고 있다. 이 연구자들은 열전달 특성에 있어서 두 개의 서로 경쟁하는 인자가 있음을 보여준다. 즉 채널에 비하여 폭이 작은 모듈에서는 난류 혼합의 증가로 인해 Nusselt수가 증가하며, 동시에 모듈의 폭이 커지면 유동의 속도가 증가하여 Nusselt수가 또한 증가하게 된다. Moffate 등<sup>(4)</sup>은 완전한 배열(full array)상태의 사각형 블록 발열체에서의 강제 대류열전달을 연구 하였다. 채널의 높이가 모듈의 높이에 비하여 상대적으로 대단히 클 때는 채널의 높이와 모듈의 배열 수는 열전달에 크게 영향을 주지 않는다고 하였다. 그러나 또한 채널과 모듈블록 높이의 비는 열전달에 크게 영향을 준다고 지적하였다. 또한, Kang<sup>(5)</sup>은 일정한 유체흐름에서 직사각형 전자모듈 배열에서의 열후류함수에 관하여 연구하였다.

또한, 최근 컴퓨터 내부의 칩과 보드와 같은

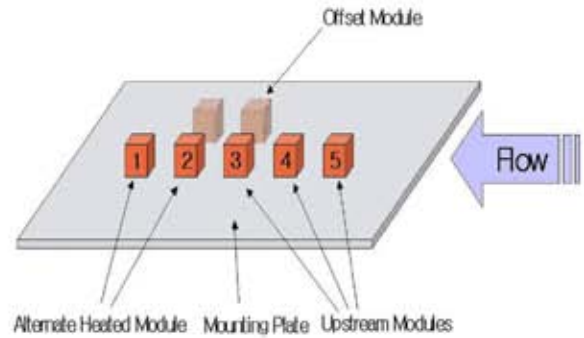


Fig. 1 Schematic diagram of the test model

전자부품 냉각의 중요성으로 인하여, 가상의 전자모듈을 이용한 열전달 특성에 관한 연구를 여러 연구자가 행하였다.<sup>(6)-(9)</sup>

본 연구의 목적은 첫째 드문 드문하게 배열된 발열체에서의 열전달 특성을 보다 잘 이해하고, 둘째 잘 정의된 경계조건 하에서 낮은 불확실도를 갖는 bench mark 데이터를 구하는데 있다.

이에 본 실험에서는 실제 전자부품의 크기와 발열량이 갖은 모듈을 사용하되 발열모듈과 비발열모듈을 번갈아 배치하였다. 이러한 발열모듈을 일정한 속도로 공기가 흐르는 풍동 안쪽에 배치하되 4개 혹은 5개의 비 발열모듈의 옆에 배치하였으며, 각 발열모듈의 위치에 따른 다양한 배열에서의 열전달 특성을 연구하였다. 열전달 특성을 철저하게 연구하기 위해서 여러 매개변수를 선택적으로 변화시켰다.

## 2. 실험 장치 및 방법

실험 장치는 폭과 길이의 비가 1인 풍동과 다양한 모듈 형태의 실험 모델로 구성되어 졌다. Fig. 1은 실험 모델의 개략도를 보여준다. 실험 모델은 다섯 개의 정방향(in-line) 모듈, 오프셋(offset) 모듈과 설치 평판으로 구성되어 있다. 모듈을 가열하기 위해서 알루미늄 블록이 사용되었고, 100Ω, 1W인 저항체를 모듈 1과 2에 심었다. 지름 0.008cm의 Copper-Constantan 열전대(T-type) 4개를 1mm 직경의 홈에 삽입하고 열전도성에 폭시로 봉인시켰다. 전도에 의한 열손실을 최소화하기 위해서 열전대의 길이가 열전대 접합점 직경의 20배가 되도록 하였다. 모듈의 바닥을 통해 모듈 설치판(금속)으로 빠져 나가는 열전달을 측

정하기 위하여 RDF사에서 제작한 열유속 게이지를 부착하였다. 열유속 게이지는 micro-foil-type thermopile로서, 물성치가 잘 알려진 폴리에스터 필름(RDF Co)의 양면에 40개의 열전대(differential thermocouple)가 부착되어 있다. 이 열유속 게이지는 이미 알려진 필름의 물성치와 크기 및 필름의 양면 간의 온도구배를 이용하여 열유속을 측정할 수 있다. 열유속 게이지의 보정은 RDF사에서 복사 열유속장비를 이용하여 수행하였고 Ortolano and Hines<sup>(10)</sup>가 자세히 기술하고 있다.

한편 발열체 모듈이 설치된 금속판을 통하여 빠져나가는 열을 최소화하기 위하여 알루미늄 발열체 모듈의 바닥에 0.32cm 두께의 Balsa 나무(열전도도가 매우 낮다)를 접착제를 이용하여 부착하였다. 이제 자석을 Balsa 나무의 바닥에 부착함으로써 비로소 발열체 모듈이 만들어 진다. 또한 이 발열체 모듈이 자력에 의해서 금속 철판에 붙게함으로써 우리가 원하는 모듈의 배열을 자유자재로 구현할 수가 있는 장점이 있다. 모듈은 판의 중앙에 위치하도록 하였다.

유체 유동에 방해를 주지 않기 위해서 평판에 구멍을 뚫어서 발열체 모듈의 아래쪽으로 전원 공급선이 연결되도록 하였다. Reynolds수는 수력 직경(hydraulic diameter)에 대해서 정의되었고, 평균 열전달계수는 식 (1)로부터 계산되어진다.

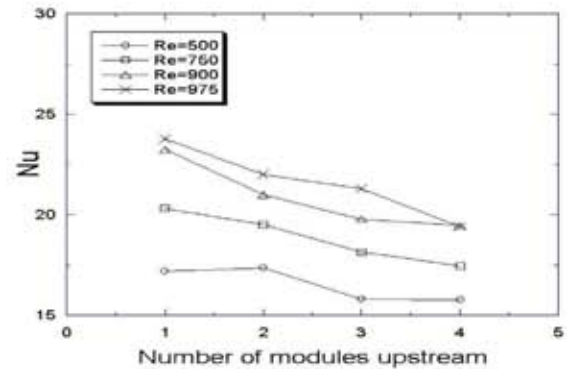
$$h = \frac{q_v}{A_M(T_w - T_a)} \quad (1)$$

여기서, 정미 열전달율( $q_v$ )는 전체 열전달율로부터 금속 설치판을 통해서 빠져나간 열전달율을 제한 값이며,  $A_M$ 은 모듈의 단면적이다. 이제 Nusselt수는 유동방향의 길이에 근거하여 식(2)에 의해서 아래와 같이 계산된다.

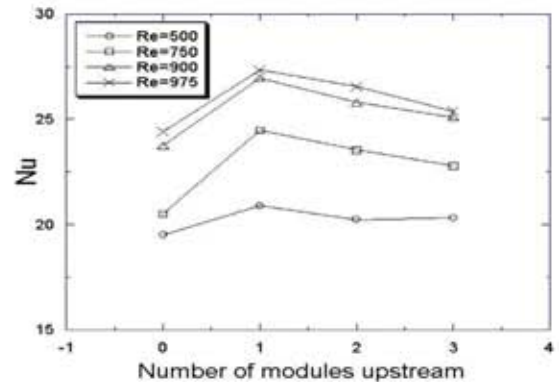
$$N = \frac{hL}{k} = \frac{q_v}{A_M(T_w - T_a)} \frac{L}{k} \quad (2)$$

### 3. 결과 및 고찰

Figures 2와 3은 발열모듈 1의 상류(upstream)에 모듈이 첨가될 때 Nusselt수에 미치는 영향을 보여준다. 모듈 간격이 0.85cm인 경우, 하나의 모듈이 상류에 첨가되면 각각의 Reynolds수 범위(500~975)에서 10 ~ 20%의 열전달 증가를 가져왔



(a) At heated module position 1



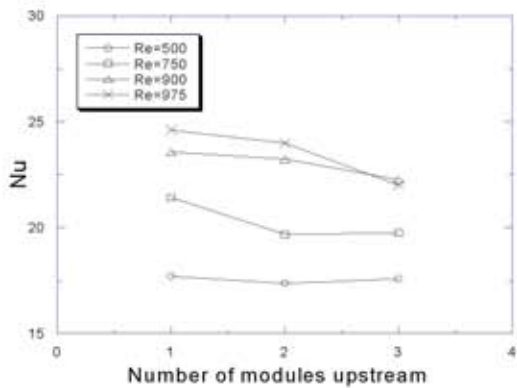
(b) At heated module position 2

Fig. 2 The Nusselt number distributions with several upstream modules at module spacing of 0.85 cm

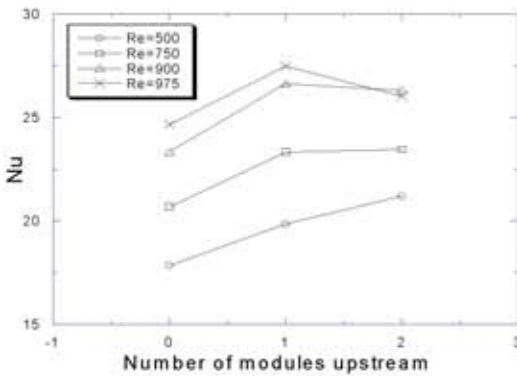
다. 상류에 설치되는 모듈의 수가 증가함에 따라서 하나의 모듈을 가질 때 얻은 최대의 열전달율 보다 감소되는 것으로 나타났다. 또한 모듈 하나를 상류에 설치할 때 볼 수 있는 Nusselt수의 상대적인 증가는 Reynolds수가 작아지면서 감소되는 경향을 보였다. 모듈 간격이 1.15cm인 경우에도 0.85cm의 경우와 유사하게 나타났다. 이것은 가열된 모듈 바로 상류에 놓인 모듈로 인해서 가열된 모듈 근처에서의 유동이 가장 잘 혼합되고 이로 인해 높은 열전달을 유발하는 것으로 설명할 수 있다.

한편 Reynolds수와 모듈 간격이 변함에 따라서 모듈 사이에 존재하는 와류(vortices)의 크기가 변한다. 따라서 이 와류가 열전달에 미치는 영향은 하류로 갈수록 더 크게 작용한다. 이러한 사실은 스모크 와이어를 이용한 유동가시화 실험에 의해 확인되었다. 모듈의 일렬 배열의 경우, 첫째와 둘째 모듈 사이와 둘째와 셋째 모듈 사이에서의 공





(a) At heated module position 1

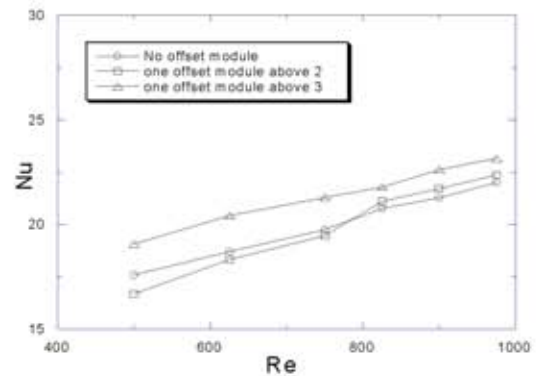


(b) At heated module position 2

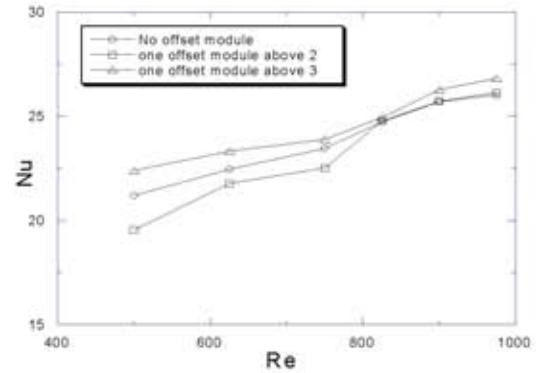
**Fig. 3** The Nusselt number distributions with several upstream modules at module spacing of 1.15 cm

기의 흐름은 다른 위치에서 보다 강한 난류가 형성되는 것으로 관찰되었다. 여기에서 알아야 할 것은 모듈 설치판의 제한된 사이즈로 인해 발열 모듈의 상류에 0.85cm 간격으로 4개의 모듈 설치가 가능하였으나 1.15cm 간격으로는 4개를 설치할 수가 없어서 두 경우의 열전달 결과를 직접적으로 비교하기에는 다소 무리가 있다.

Figure 4는 모듈 간격 1.15cm에서 오프셋(offset) 모듈이 열전달에 미치는 영향을 보여준다. 오프셋 모듈이 일렬 배열의 중앙선에서 1.6cm 떨어진 지점에 설치되어 있다. 첫 번째 실험은 모듈 3 옆에 오프셋 모듈이 포진되어 있는 경우로서, 일렬 배열의 경우의 모듈 1과 2에서 비해서 오프셋 모듈이 있는 경우가 모듈 1과 2에서 열전달이 상대적으로 증가되었다. 그러나 모듈 2의 옆에 오프셋 모듈을 설치했을 때는 일렬 배열에 비해서 모듈 1과 2에서 둘 다 열전달이 감소되었다. 유동



(a) At heated module position 1

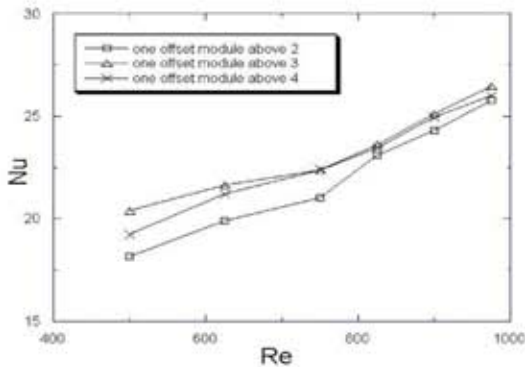


(b) At heated module position 2

**Fig. 4** Comparison between the Nusselt number distributions without an offset module and those with one offset module above module positions 2 & 3 at module spacing of 1.15 cm

가시화 실험결과에 의하면 이러한 현상이 일어나는 것은 유동 패턴의 변화에 기인함을 보여주었다. 오프셋 모듈을 설치하지 않았거나 모듈 2 옆에 오프셋 모듈을 설치했을 때보다 모듈 3 옆에 설치했을 때, 모듈 1과 2 사이와 모듈 2와 3 사이에서 더 많은 유동의 혼들림이 나타났다.

모듈 간격이 0.85cm인 경우의 실험에서도 유사한 현상이 나타났다. 4개의 모듈을 모듈 1의 상류에 일렬로 배치하고 오프셋 모듈을 일렬 배열의 중앙선에서 1.6cm 떨어진 위치에 설치하였다. Figure 5는 모듈 간격이 0.85cm인 경우 오프셋 모듈의 위치를 바꾸었을 때의 열전달 결과를 보여준다. 모듈 간격 1.15cm의 경우와 같이 일렬 배열의 3번째 모듈 옆에 오프셋 모듈을 설치했을 때가 가장 높은 열전달을 보여주고 있다. 유동가시화에 의하면 3번째 모듈 주위에서의 강한 유체의 혼합이 열전달을 크게 증가시키는 요인으로



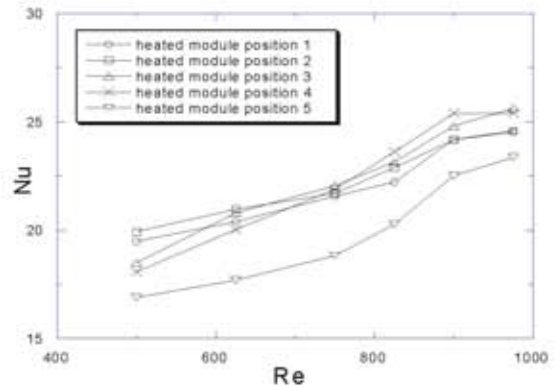
**Fig. 5** The Nusselt number distributions at a heated module position 1 with various offset modules from an in-line array at module spacing of 0.85 cm

보여주고 있다.

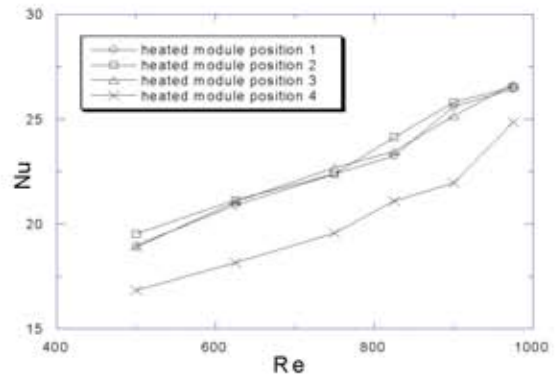
Figure 6은 모듈 간격 0.85cm와 1.15cm에서 일렬 배열로 가열된 모듈의 다양한 위치에서의 열전달 결과를 보여주고 있다. 유체의 흐름을 처음으로 맞이하는 5번 모듈을 제외한 모듈들은 앞뒤로 서로 근접하게 위치한다. 모듈 간격 0.85cm와 1.15cm 두 경우 모두 Reynolds수가 작은 쪽 영역에서 2번 모듈에서 가장 높은 열전달이 나타났다. 그러나 모듈 간격이 0.85cm인 경우에는 Reynolds수가 점점 커지면서 이러한 현상은 사라진다.

그리고 재미있는 현상은 작은 Reynolds수 영역에서 4, 5번 모듈(1.15cm 간격에서는 3, 4번 모듈)에서 열전달이 가장 낮은 것으로 나타났는데, 이들의 위치는 가장 선단(최상류)에 위치하고 있어서 유체의 직접 충돌에 의한 냉각이 일어나는 곳이다. 그럼에도 불구하고 이곳에서의 열전달이 가장 낮은 이유는 선단에 부딪히는 층류유동 보다는 유체가 여러 모듈을 거치면서 하류로 흐를 때 유동 박리와 재순환을 하면서 난류로 변하고 잘 혼합이 되어서 결과적으로 열전달이 증가하게 된다.

한편 유동가시화가 이러한 점을 잘 뒷받침해주고 있다. 즉 모듈의 선단에서 층류유동, 유체유동과 평행한 모듈의 옆면에서 느린 재순환이 나타나며, 모듈의 뒤쪽에서는 난류유동을 보여준다. 특히 난류는 하류 모듈의 4분면 모두에서 나타났다. 또한 모듈 간의 간격이 줄어들수록 모듈 사이에 존재하는 와류의 사이즈도 그만큼 줄어든다.



**(a)** At module spacing of 0.85 cm



**(b)** At module spacing of 1.15 cm

**Fig. 6** The Nusselt number distributions at various positions of the heated module from an in-line array at module spacings of 0.85 cm and 1.15 cm

#### 4. 결론

본 연구는 Reynolds수, 모듈의 간격, 모듈의 수 및 위치가 열전달에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험적 연구로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 발열 모듈의 상류에 일렬 배열(in-line array)로 위치한 모듈에 의하여 열전달이 증가하는 것은 유체가 여러 상류 모듈을 거치면서 하류로 흐를 때 유동 박리와 재순환을 하면서 난류로 변하고 잘 혼합이 되어서 결과적으로 하류의 발열 모듈에서 열전달이 증가하게 된다.

(2) 모듈 간의 거리가 모듈의 길이에 근접할 때 열전달 증가율이 최대로 나타났으며, Reynolds수가 클수록 이러한 현상은 더 현저하게 나타난다.

(3) 일렬 배열 모듈의 3번째 모듈 옆에 오프셋 모듈을 설치했을 때가 가장 높은 열전달을 보여주고 있다. 유동가시화에 의하면 3번째 모듈 주위에서의 강한 유체의 혼합이 열전달을 크게 증가시키는 요인으로 보여주고 있다.

(4) 발열 모듈이 가장 선단(0.85cm 간격에서 4, 5번 모듈, 1.15cm 간격에서 3, 4번 모듈)에 위치하고 있을 때 유체 충돌에 의한 냉각이 일어남에도 불구하고 열전달이 가장 낮은 이유는 모듈의 선단에서의 유동은 층류유동이고, 모듈의 옆면에서는 느린 재순환이 나타나며, 모듈의 뒤쪽에서는 난류유동이 일어나서 하류에 위치한 모듈에서 열전달이 상대적으로 높게 나타난다. Reynolds수를수록 이러한 현상은 더 현저하게 나타난다.

#### 참고문헌

- (1) Weiss, J., Fortner, P., Pearson, B., Watson, K. and Monroe, T., 1989, "Modeling Air Flow in Electronic Package," *Mechanical Engineering*, pp. 56-58.
- (2) Buller, M. L. and Kilburen, R. F., 1981, "Evaluation of Surface Heat Transfer Coefficients for Electronic Module Packages," *Heat Transfer in Electronic Equipment, HTD*, Vol. 20, *ASME Winter Annual Meeting*, Nov. 15-20.
- (3) Roeller, P. T., Stevens, J. and Webb, B. W., 1991, "Heat Transfer and Turbulent Flow Characteristics of Isolated Three-Dimensional Protrusions in Channels,"
- (4) Moffat, R. J., Arvizu, D. E. and Ortega, A., 1985, "Cooling Electronic Components : Forced Convection Experiments with an Air-Cooled Array," *Heat Transfer in Electronic Equipment, HTD*, Vol. 48.
- (5) Kang, S. S., 1994, "The Thermal Wake Function for Rectangular Electronic Modules," *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 116, pp. 55-59.
- (6) Young, T. J. and Vafai, K., 1999, "Experimental and Numerical Investigation of Forced Convective Characteristics of Arrays of Channel Mounted Obstacles," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 34-42.
- (7) Nakayama, 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.
- (8) Kang, B. H., Jaluria, Y. and Tewari, S. S., 1990, "Mixed Convection Transport From an Isolated Heat Source Module on a Horizontal Plate," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 653-661.
- (9) Wirtz, R. A. and Colban, D. M., 1996, "Comparison of the Cooling Performance of Staggered and In-Line Arrays of Electronic Packages," *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 118, pp. 27-30.
- (10) Ortolano, D. J. and Hines, F. F., 1983, "A Simplified Approach to Heat Flow Measurement," *Proceedings of the ISA International Conference and Exhibit, Advances in Instrumentation*, Vol. 38, October 10-13.