

돌출 발열블록 표면에서의 배열 충돌제트에 의한 열전달 특성

정인기* · 박시우** · 홍성호**

Heat transfer characteristics of multiple slot jets at the surface of protruding heated blocks

In-Kee Chung, Si-Woo Park and Sung-Ho Hong

Key Words: Multiple Slot Jets(배열 슬롯제트), Jet Impingement Heat Transfer(제트충돌 열전달), Jet-to-Jet Distance(제트간격), Protruding Heated Block(돌출발열블록), Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌 승화법)

Abstract

An experimental investigation of heat transfer characteristics at the surface of two-dimensional protruding heated blocks using confined impinging multiple slot jets has been performed. The effects of jet-to-jet distances($S=16B, 24B$), dimensionless nozzle-to-block distances($H/B=2, 6$) and jet Reynolds numbers($Re=2000, 3900, 5800, 7800$) on the local and average heat transfer coefficients have been examined with five isothermally heated blocks at streamwise block spacing($p/w=1$). To clarify local heat transfer characteristics, naphthalene sublimation technique was used. From the results, it was found that the local and average heat transfer of heated blocks increases with decreasing jet-to-jet distance and increasing jet Reynolds number. Measurements of local heat transfer coefficients have given an indication of the nature of the interaction between jets and of the uniformity of heat transfer obtainable with various arrangements. In the case of $S/B=16, H/B=6$ and $Re=7800$, maximum average Nusselt number of overall blocks was obtained.

기호설명

B : 슬롯 노즐의 폭, 특성길이
 D : 공기중의 나프탈렌 확산계수
 H : 노즐과 블록 윗면사이의 거리
 h_m : 물질전달계수
 Nu : 국소 Nusselt 수
 Nu_m : 각 블록별 평균 Nusselt 수
 Nu_{mt} : 전체 블록의 평균 Nusselt 수
 Pr : Prandtl 수
 p : 블록과 블록사이의 거리
 Re : 제트 Reynolds 수($=U_e B/\nu$)
 S : 제트와 제트사이의 거리

Sc : Schmidt 수
 Sh : 국소 Sherwood 수
 U_e : 노즐 출구의 제트속도
 u : 제트의 축방향 속도
 u' : 난류강도
 w : 블록의 폭

1. 서론

충돌제트(impinging jet)는 간단한 구조와 적은 소요동력으로 고효율의 열전달 효과를 얻을 수 있어 물체의 가열, 냉각, 건조 등 산업현장에서 널리 사용되고 있으며 특히, 최근 전자부품의 발열 밀도 증가로 인한 냉각문제와 관련하여 충돌제트의 열전달 특성에 대한 연구가 활발하게 수행되고

* 회원, 영남대학교 기계공학부

** 회원, 영남대학교 대학원

있다.

이중 배열제트의 연구로는 Elbanna와 Gahin⁽¹⁾이 제한벽면을 가진 병렬제트에서의 유동특성, 난류강도 및 Reynolds shear stress 등에 대하여 단일제트와 비교하였으며, Koopman과 Sparrow⁽²⁾는 나프탈렌 승화실험으로 다중제트 충돌면에서 국소 및 평균 열(물질)전달계수를 측정하여 노즐사이의 간격 및 노즐과 충돌면 사이의 거리에 대한 열(물질)전달특성을 규명하였다. 또, Metzger와 Korstad⁽³⁾는 강제 횡방향유동에 의한 효과를 연구하였으며, Behbahani와 Goldstein⁽⁴⁾은 다열 배열제트의 열전달 특성에 대하여 고찰한 바 있다.

또한, Obot 등⁽⁵⁾은 충돌제트 열전달에서 제한된 벽면(confined wall)의 영향을 조사하여 벽면이 없는 경우에 비해 평균열전달이 10%정도 감소함을 밝혔으며, Wadsworth와 Mudawar⁽⁶⁾는 절연액체의 제한된 2차원 제트를 이용한 다중칩 전자부품의 냉각에 대한 연구에서 열전달률이 채널높이보다 제트 Reynolds 수와 슬롯폭에 의존함을 밝혔다. 또, Hung 등⁽⁷⁾은 충돌면에 배열된 3차원 발열블록 윗면에 초기 층류인 제한된 슬롯제트 충돌에 의한 열전달 특성을 실험적으로 연구한 바 있다.

본 연구에서는 제한된 2차원 배열슬롯제트의 정체점 및 벽제트영역에 배열된 돌출 발열블록에 대하여 유동변화에 따른 각 블록 표면에서의 국소 열전달계수 분포 및 평균전열특성을 파악하고자 한다. 발열블록으로서는 5개의 2차원 블록을 사용하였으며, 블록의 주 유동방향 배열간격은 $p/w=1$ 로 고정시켰다. 그리고, 인접한 제트사이의 무차원 거리를 $S/B=16, 24$ 로, 노즐 출구로부터 충돌면 사이의 거리를 $H/B=2, 6$ 으로 변화시켰다. 또한, 제트 Reynolds 수는 $Re=2000, 3900, 5800, 7800$ 의 경우에 대해서 실험을 수행하였다.

제트의 유동특성을 파악하기 위해 제트속도 및 난류성분을 측정하였으며, 국소열전달계수의 측정에는 나프탈렌 승화법(naphthalene sublimation technique)을 사용하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도이다. 작동유체는 온·습도의 조절이 가능한 실험실내의 공기를 열교환기를 거쳐 송풍기로 흡입되며, 서지탱크를 거쳐 공기챔버로 유입된다. 이때, 송풍기에 연결되는 관은 플렉시블 튜브를 사용하여

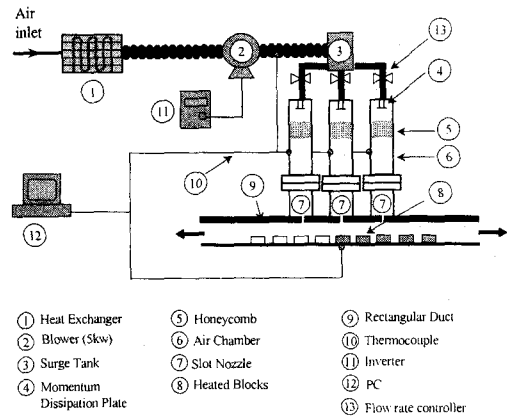


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

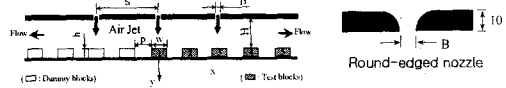


Fig. 2 Cross-sectional view of test section and nozzle geometry

송풍기로부터의 진동이 공기챔버에 전달되는 것을 방지하였고, 서지탱크에서는 공기의 맥동을 차단하였다. 서지탱크와 챔버사이에는 유량계를 설치하여 각각의 챔버에 균일한 공기량을 유지하도록 하였으며, 공기챔버 내에는 충돌판과 유동의 안정화를 위하여 상부에 하니컴(honeycomb)을 설치하였다. 챔버는 상·하 분리형으로 제작하였으며, 상·하 챔버사이에 3mm두께의 고무판을 설치하여 충돌판에 의한 진동이 챔버 하부로 전달되는 것을 방지하였다.

Fig. 2에는 측정부의 단면과 사용한 노즐의 형상을 나타내었다. 측정부인 덕트는 10mm두께의 투명 아크릴로 제작하였으며, 슬롯노즐의 폭(B)은 6mm, 길이는 300mm로 2차원 제트유동이 충분하도록 하였다. 또, 높이(H)를 조절하여 노즐과 충돌면 사이의 간격을 변화시킬 수 있으며, 노즐사이의 간격(S)을 조절할 수 있도록 하였다. 나프탈렌으로 주조된 블록의 크기는 높이(h) 및 폭(w)이 각각 12mm 및 24mm이고, 길이가 180mm인 2차원 블록을 정체점 및 주 유동방향으로 배열하여 각각의 블록 표면에서 국소열전달계수를 측정하였다. 이때, 흐름에 대칭성을 유지하기 위하여 주 유동방향의 반대방향으로도 더미(dummy)블록을 배열하였다.

송풍기 출구와 공기챔버, 제트 충돌면에는 T형 열전대를 설치하여 노즐 출구의 공기온도가 $21 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 유지되도록 열교환기의 운전을 제어하였고, 실험시간 동안의 온도평균값을 구하여 계산에 반영하였다.

피토투관으로 보정한 정온형 열선유속계를 사용하여 노즐출구의 제트속도와 난류강도를 측정하였으며, 난류강도가 5%정도인 초기 난류조건에서 실험을 수행하였다. 나프탈렌 시편표면에서의 국소승화깊이 측정은 0.001mm의 반복 위치결정 정밀도를 가지는 3축 LM가이드를 설치한 정반 위에 시편을 올려놓고, LVDT(Schaevitz LBB375 TA-020, MP1000)로 표면조도를 측정기록(IBM PC, National Instrument PC-LPM-16PnP)하였으며, Labview프로그램(National instrument PCI-Step-4CX, Oriental PK566-NAC 0.36°/step)에 의해 제어하였다. 실험전과 충돌제트의 유동장에 노출시켜 나프탈렌을 승화시킨 후 같은 위치에서의 표면조도를 측정하여 실험시간 동안에 승화된 깊이 차이를 구하였다.

2.2 데이터 처리방법

국소 물질전달계수는 다음 식으로 계산하였다.

$$h_m = \frac{\rho_s \delta}{\Delta t \rho_{v,w}} \quad (1)$$

물질전달계수(h_m)는 고체 나프탈렌의 밀도(ρ_s), 나프탈렌 승화깊이 차이(δ), 실험시간(Δt), 시편 표면에서 나프탈렌 증기밀도($\rho_{v,w}$)로부터 계산되며, 나프탈렌 증기밀도($\rho_{v,w}$)는 이상기체 상태방정식에 Ambrose등⁽⁸⁾이 제안한 나프탈렌 증기압을 대입함으로써 구할 수 있다.

이때, 자연 승화에 의한 실험 오차를 줄이기 위해 식(2)를 사용하여 승화깊이차를 보정하였다.

$$\delta_{free} = C \times 10^{10} [1.0 + 0.1(T_w - 297.15)]^{1.03} \times \Delta t \quad (2)$$

δ_{free} 는 자연 승화된 깊이, Δt 는 자연 승화 시간이며, 상온에서 평판에 대한 계수 C 는 0.83이다.

또, Cho등⁽⁹⁾이 제시한 나프탈렌 확산계수(D)로부터 물질전달의 무차원수 Sherwood수를 다음식에서 산출하였다.

$$Sh = \frac{h_m B}{D} \quad (3)$$

여기서, B 는 특성길이인 슬롯의 폭이다.

Sherwood 수로부터 Nusselt 수로의 환산에는

다음의 열-물질전달 상사식을 사용하였다.

$$Nu = (Pr/Sc)^n \cdot Sh \quad (4)$$

이때, 공기에 대한 Prandtl 수는 $Pr=0.707$ 이며, 난류일 때 지수 n 값은 0.4이고, Schmidt 수 Sc 는 온도의 함수로써 주어진다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 속도분포 및 난류강도

Fig. 3은 $Re=3900$ 일 때, 인접 제트와의 무차원 거리비(S/B)가 16, 24인 경우 중앙노즐의 제트중심축상에서의 속도와 노즐출구속도와의 비(u/U_e) 및 난류강도(u'/U_e)를 나타낸 것이다. 속도와 난류강도의 분포는 단일제트와 유사한 경향을 나타내고 있으나, 노즐출구속도의 95%를 유지하는 포텐셜코어의 길이는 $H/B \approx 3$ 으로 단일제트보다 작았다. 또, 인접 제트사이의 거리비($S/B=16, 24$)에 따른 속도분포가 포텐셜코어 영역내에서는 유사한 값을 가지나, 이후에는 S/B 가 감소함에 따라 속도의 감소도가 큰것을 확인할 수 있었다. 이는 배열충돌제트의 경우 제트가 충돌면에 부딪히기 전에 일어나는 인접 제트와의 상호작용으로 S/B 가 감소함에 따라 주변유체와의 혼합이 더욱 활발하기 때문인 것으로 사료된다. 포텐셜코어 영역에서 평균속도비(u/U_e)가 1보다 큰 것은 오리피스(orifice)형 슬롯노즐에서 나타나는 유동 수축현상(vena contracta)에 따른것으로 생각된다. 난류강도의 분포는 $H/B \approx 2$ 까지 거의 일정한 값을 유지하다가 급격히 증가하여 $H/B \approx 6$ 에서 최대값을 가진 후 감소한다. 또, S/B 가 감소함에 따라 더욱 큰 난류강도 값을 가지는 것을 알 수 있으며, 이는 노즐간격이 작아짐에 따라 주변유체와의 혼합이 더욱 활발하기 때문으로 사료된다.

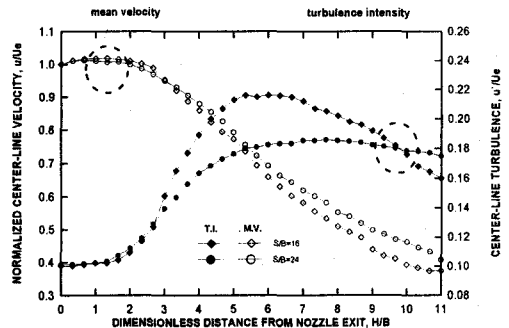


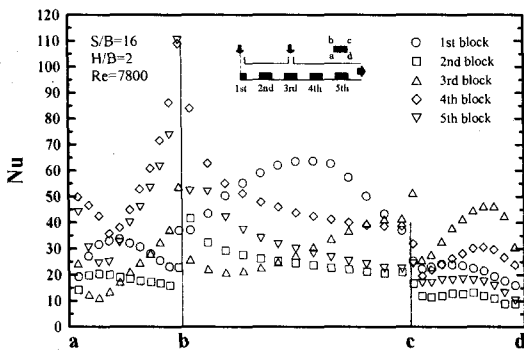
Fig. 3 Mean velocity and turbulence intensity distributions of center nozzle along the centerline at $Re=3900$

3.2 국소 열전달계수의 분포

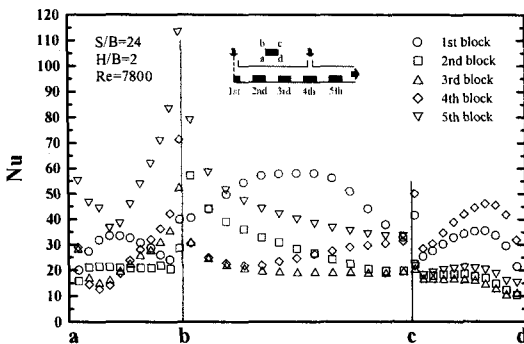
Fig. 4 (a), (b)는 $H/B=2$ 일 때 인접제트와의 무차원거리비(S/B)가 각각 16과 24이고, $Re=7800$ 인 경우 각 블록에 대한 국소 Nusselt 수의 분포를 나타낸 것이다. 중앙노즐 직하 1번블록 윗면에서 제트의 충돌로 인하여 높은 열전달계수를 나타내고 있으며, $S/B=16$ 과 24에서 각각, 하류노즐의 직하 블록인 3번과 4번블록의 윗면은 전면 모서리(b) 부근 이후 감소하다가 다시 증가하여, 후면 모서리(c)까지 증가하는데, 이는 중앙노즐에서 분출된 제트가 1번블록의 윗면에 충돌한 후 박리되었다가 하류노즐 직하블록의 윗면에서 하류제트와 함께 재부착하기 때문으로 사료된다. 하류노즐로부터 분출된 제트는 유량의 증가로 인해 가속되어진 후 각각의 하류블록인 4번과 5번블록의 전면 상부모서리(b)에 충돌한다. 그리고, 블록 윗면을 빠르게 흐르는 유체의 영향으로 블록과 블록사이에서 매우 강한 재순환유동이 형성되기 때문에 4번과 5

번블록 전면(a-b)의 윗모서리 부근에서 최대열전달계수를 나타내고 있다. 또, 블록 전면(a-b)의 하단(a)에서 열전달계수 값이 높게 나타나는 것은 소규모 와류(small scale eddy)의 발생때문인 것으로 사료된다. $S/B=16$ 과 24인 경우 각각, 2번과 3번블록에서의 열전달계수의 값이 4번과 5번 블록에 비해 현저히 낮은 값을 보이고 있는데, 이는 유동의 박리와 횡방향유동의 영향 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 5 (a), (b), (c) 및 (d)는 $Re=3900$ 일 때, 각각 1번, 3번, 4번 및 5번블록에서 S/B 와 H/B 의 변화에 따른 국소 열전달계수의 분포를 나타낸 것이다. 국소 열전달계수의 분포는 각각의 중앙노즐의 직하블록인 1번블록의 윗면에서 국소 열전달계수의 분포는 평판에 대한 충돌제트 실험에서 정체점 열전달계수의 분포와 비슷한 양상을 보이고 있다. 제트의 난류강도가 최대인 $S/B=16$, $H/B=6$ 에서 최대값을 보여주는데, 이것은 충돌제트에서 난류강도와 열전달이 밀접한 관계가 있음을 시사하고 있다. 또한, 1번블록의 측면(a-b, c-d)에서 바닥으로부터 10mm정도의 지점에 낮은 열전달계수를 나타내다가 아래쪽(a, d)으로 갈수록 다시 증가한 후 감소하는 현상을 나타내고 있는데, 이것은 블록과 블록사이에서 발생한 재순환유동의 영향때문으로 사료된다. 이 재순환영역은 Reynolds 수가 증가할수록 반경이 작아져서 재부착영역이 아래부분으로 밀리고 있으며, Reynolds 수가 증가할수록 제트의 운동량 증가로 재순환유동의 속도를 증가시켜 블록 옆면에서 열전달계수의 편차를 증가시키고 있음을 알 수 있다. 그리고, 이러한 현상은 H/B 가 작을수록 좁은 유로에서 유동의 가속화로 인해 크게 나타났다. $S/B=16$ 인 경우, 하류노즐 직하블록의 하류방향으로 인접한 4번블록($S/B=24$ 인 경우에는 5번블록)의 전면(a-b) 상부모서리(b)에서 최대값이 나타나고 있는데, 이것은 하류노즐에서 분출된 제트에 의한 유량의 증가로 가속되어 뒷쪽블록의 전면 상부모서리에 충돌하기 때문인 것으로 사료된다. 반면, $S/B=16$, 24의 두가지 경우에 노즐과 노즐사이의 블록인 2번과 3번블록에서는 4번과 5번블록에 비해 낮은 값을 나타내었다. 4번과 5번블록의 윗면에서는 앞쪽지점에서 최대값을 보이다가 하류로 갈수록 낮아지고 있는데 이는 경계층의 발달 때문인 것으로 사료된다. 또한, 각 블록의 후면(c-d)바닥으로부터 10mm 정도의 지점에서 낮은 열전달계수값을 나타내다가 아래쪽(d)으로 갈수록 다시 증가하는 현상을 나타내는 것은 블록과 블록 사이에서 발생한 재순환유동이 블록의 높이만큼 성장하고 하부코너에서 작은 와류가 생성되기 때문인 것으로 사료된다.



(a) $S/B=16$



(b) $S/B=24$

Fig. 4 Distributions of local Nusselt number on each block for $Re=7800$ at $H/B=2$

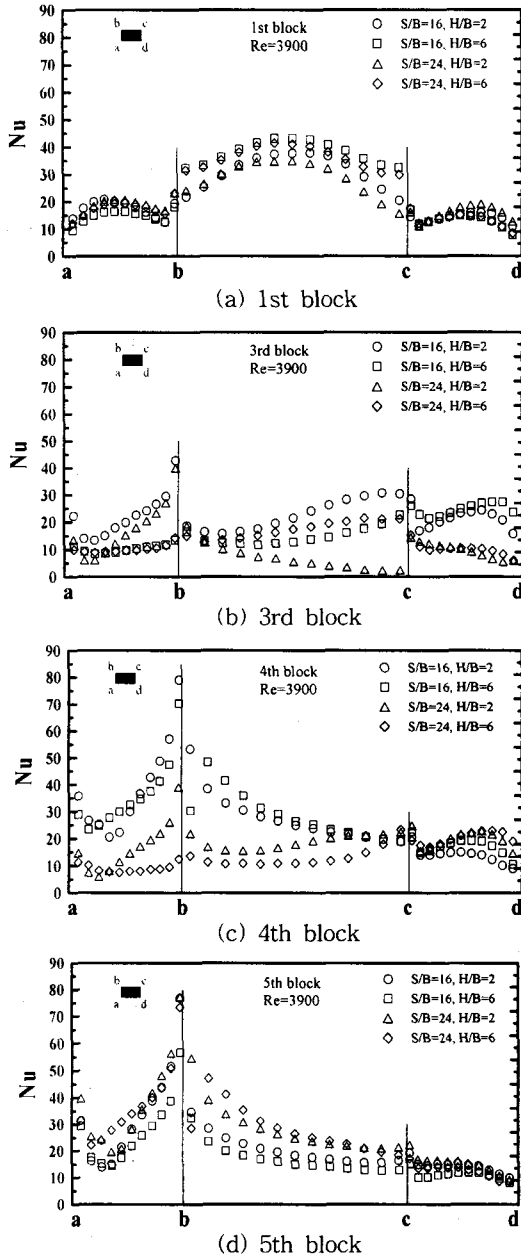


Fig 5. Distributions of local Nusselt number for various S/B and H/B at Re=3900

3.3 평균 열전달계수

Fig. 6은 S/B=16, 24 및 H/B가 2, 6일 때 각 블록에서의 평균 열전달계수(Nu_m)를 나타낸 것이다. 평균 열전달계수는 하류영역에 있는 4번과 5번 블록에서 가장 높았으며, 두 노즐의 사이에 있는 2번과 3번블록에서 가장 낮았다. 이는 전술한 바

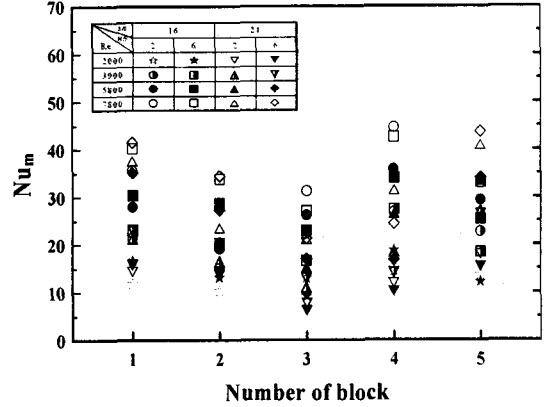


Fig 6. Average Nusselt number of each block for various S/B and H/B

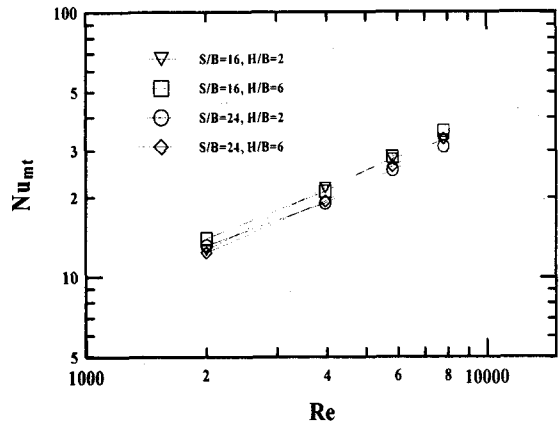


Fig 7. Overall average Nusselt number vs. Reynolds number

와 같이 S/B=16 및 24의 경우, 각각 하류노즐에서 분출된 제트가 중앙노즐에서 분출된 제트의 횡방향유동과 혼합되어 하류방향으로 인접한 블록인 4번과 5번 블록에 충돌하고, 증가한 유량으로 인한 유동의 가속으로 경계층의 발달이 억제되어 블록윗면에서의 열전달을 증가시킬 뿐만 아니라 블록사이에서의 강한 재순환유동의 발달을 촉진시키기 때문인 것으로 사료된다. 또한, 2번과 3번 블록에서 낮은 열전달계수 값을 나타내는 것은 배열충돌 제트의 경우 중앙노즐에서 분사된 제트가 블록의 윗면에 충돌한 후 횡방향유동으로 전환되어 덕트유동을 형성하고 하류제트의 영향으로 유속이 느려져서 급격한 열경계층의 발달로 인하여 낮은 열전달계수 값을 나타내는 것으로 사료된다.

Fig. 7은 S/B 및 H/B의 변화에 대한 전체 블

록의 평균 Nusselt 수를 Reynolds 수의 변화에 대하여 나타낸 것이다. 전체 블록의 평균 Nusselt 수는 Reynolds 수의 증가에 따라 거의 대수비례적으로 증가하고 있다. 따라서, 열전달과 유동사이에 $Nu_{mi} \propto Re^m$ 의 상관관계가 있을 것으로 예측된다. 또한, S/B=16인 경우가 S/B=24인 경우보다 높은 열전달계수를 보여주고 있으며, Reynolds 수가 커질수록 더욱 현저하다. 이것은 열경계층의 발달로 인한 영향을 많이 받는 제트와 제트사이의 중간 부분인 충돌면 사이 유로에 있는 블록의 수가 적기 때문인 것으로 사료된다.

본 실험의 경우, S/B=16, H/B=6, Re=7800에서 전체블록의 평균 Nusselt 수가 가장 큰 것으로 나타났다.

4. 결 론

제한된 2차원 배열슬롯제트의 정체점 및 벽제트영역에 배열된 돌출발열블록에 대하여 유동변화에 따른 각 블록 표면에서의 국소열전달계수 분포 및 평균 전열특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제트의 정체점영역에 설치된 중앙노즐 직하의 1번블록 윗면의 국소 Nusselt 수는 제트의 난류강도가 최대인 H/B=6에서 최대가 된다.
- (2) 각 블록 측면에서의 열전달효과는 블록 사이의 재순환 유동이 지배적인 요인으로 작용한다.
- (3) 국소 열전달계수는 하류노즐의 직하블록 바로 뒷쪽에 위치한 블록의 전면 상부모서리에서 최대값이 나타난다.
- (4) 각 블록에 대한 평균 열전달계수는 노즐사이에서 있는 블록에서 최소값이 하류노즐 직하블록에 이웃한 하류블록에서 최대값이 나타난다.
- (5) 전체블록에 대한 평균 Nusselt 수는 Reynolds 수의 증가에 따라 거의 대수 비례적으로 증가한다.

참 고 문 헌

1. Elbanna, H. and Gahin, S., 1982, "Investigation of two plane parallel jets", AIAA, Vol. 21, No. 7. pp.986-991.
2. Koopman, R.N. and Sparrow, E.M., 1976, "Local and average transfer coefficients due to an impinging row of jets", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 19, pp.673-683.
3. Metzger, D.E. and Korstad, R. J., 1972, "Effects of crossflow on impingement heat transfer", J. Engineering for Power, Vol. 94, pp.35-42.
4. Behbahani, A.I. and Goldstein, R.J., 1983, "Local heat transfer to staggered arrays of impinging circular air jets", J. Engineering for Power, Vol. 105, pp.354-360.
5. Obot, N., Mujumdar, A. and Douglas, W., 1982, "Effect of semi-confinement on impinging heat transfer", Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf. Vol. 3, pp. 395-400.
6. Wadsworth, D. C. and Mudawar, I., 1990, "Cooling of a multichip electronic module by means of confined two dimensional jets of dielectric liquid", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 112, pp. 891-898.
7. Hung, Y. H. and Lin, P. Y., 1997, "Cooling performance of slot jet impinging onto a simulated multi-chip module", Advances in Electronic Packaging, Vol. 2, pp. 1795-1801.
8. Ambrose, D., Lawrenson, I.J. and Sprake, C. H. S., 1975, "The vapour pressure of naphthalene", J. Chem. Thermodynamics, Vol. 7, pp. 1173-1176.
9. Cho, K., Irvine, T. F. J. and Karani, J., 1992, "Measurement of the diffusion coefficient of naphthalene into air", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, No. 4, pp.957-966.