

배열 슬롯제트의 노즐간격 변화에 따른 충돌면에서의 열전달 특성

정인기* · 박시우** · 홍성호*** · 고완욱***

Heat transfer characteristics of impinging flat plate of multiple slot jets by changing of jet-to-jet distance

In-Kee Chung, Si-Woo Park, Sung-Ho Hong, Wan-Wook Ko

Key Words: Multiple Slot Jet(배열 슬롯제트), Jet Impingement Heat Transfer(분류충돌 열전달), Jet-to-Jet Distance(노즐간격), Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌 승화법)

Abstract

An experimental investigation of heat transfer characteristics on confined jet impinging plate using multiple slot jets has been performed. The effects of jet Reynolds numbers($Re=2000, 3950, 5900, 7900$), dimensionless slot-to-plate distances($H/B=2, 4, 6, 8$) and jet-to-jet distances($S=16B, 20B, 24B, 30B$) on the local and average heat transfer coefficients have been examined. To clarify local heat transfer characteristics, naphthalene sublimation technique were used. From the experimental results, it was found that the local and average heat transfer rates increase with increasing jet Reynolds number. Measurements of local heat transfer coefficients produced by multiple of slot jets have given an indication of the nature of the interaction between jets and of the uniformity of heat transfer obtainable with various arrangements. At $S/B=20, Re=7900$ and $H/B=6$, maximum average Nusselt number is obtained.

기호설명

B : 슬롯 노즐의 폭, 특성길이
 S : 제트와 제트사이의 거리
 D : 공기중의 나프탈렌 확산계수
 u' : 난류강도
 H : 덕트의 높이(슬롯과 충돌면사이의 간격)
 h_m : 물질전달계수
 Nu : 국소 Nusselt 수
 Nu_m : 평균 Nusselt 수
 U_e : 노즐 출구의 제트속도
 Pr : Prandtl 수

Re : 제트 Reynolds 수($=U_e B/\nu$)
 Sc : Schmidt 수
 Sh : 국소 Sherwood 수
 u : 제트의 축방향 속도
 x : 제트 정체점에서 주유동방향 거리

1. 서론

충돌분류(impinging jet)는 간단한 구조와 적은 소요동력으로 분류충돌면에서 대규모의 와류를 발생시킴으로써, 국소적으로 높은 열 및 물질전달 효과를 얻을 수 있어 물체의 가열, 냉각, 건조 등 각종 산업분야에서 광범위하게 응용되고 있다. 따라서, 지금까지 충돌제트의 유동 및 열전달 특성에 대하여 많은 연구가 수행되어 왔다.

배열충돌분류의 연구로는 Elbanna와 Gahin⁽¹⁾이 제한된 벽면을 가진 자유병렬제트에서의 유동특

* 회원, 영남대학교 기계공학부

** 회원, 영남대학교 대학원

*** 영남대학교 대학원

성, 난류강도 및 Reynolds shear stress 등에 대하여 단일제트와 비교하였으며, Koopman과 Sparrow⁽²⁾는 나프탈렌 승화실험으로 다중분류 충돌면에서 국소 및 평균 열(물질)전달계수를 측정하여, 노즐 사이의 간격 및 노즐과 충돌면 사이의 거리에 대한 열(물질)전달 특성을 규명하였다. 또, Metzger와 Korstad⁽⁹⁾는 강제 횡방향 유동에 의한 효과를 연구하였으며, Behbahani와 Goldstein⁽⁴⁾은 다열 배열제트의 열전달 특성에 대하여 고찰하였으나, 열전대를 이용한 측정으로 미세한 국소값을 얻지는 못했다.

또한, Krothapalli⁽⁵⁾는 사각제트 유동의 발달현상을 단일제트, 병렬제트, 배열제트로 구분하여 실험을 수행한 결과, 병렬제트의 경우 두 제트간의 상호작용으로 인해 완전한 혼합유동을 형성하여 거의 대칭으로 발달하는 반면, 3개 제트의 경우는 대칭성을 보이지 않고 각각의 제트가 독립적으로 발달함을 밝혀내었다.

Gardon과 Akifirat⁽⁶⁾는 배열슬롯제트에서 제트와 전열면사이의 거리가 증가할수록 제트사이에서 유동의 교란으로 인하여 단일제트와는 달리 슬롯노즐의 기하학적 중심에서 최대열전달이 일어나지 않고 그 위치가 변화함을 보였으며, Habi와 Garimella⁽⁷⁾는 배열충돌분류를 이용한 pin-fin heat sink의 실험에서 동일한 Reynolds수에서는 배열제트의 열전달율이 단일제트보다 크게 나타나지만 동일한 풍량에서는 단일제트의 열전달율이 배열제트보다 높게 나타나고 있음을 규명하였다. 또, 조⁽⁸⁾등은 원형배열제트에서 유출홀을 사용함으로써 제트와 전열면 사이의 간격이 작은 경우 전열면에서 온도의 균일성을 향상시키는 결과를 얻었다.

배열충돌분류의 경우 단일 분류보다 넓은 영역에서 균일한 열(물질)전달의 효과를 얻을 수 있기 때문에 실제적인 열전달 기구에 널리 사용되고 있지만 상대적으로 많은 연구가 이루어지지 못했다. 즉, 배열충돌분류는 충돌전후에 인접한 제트간의 상호작용 때문에 지금까지 많은 연구가 이루어져 왔던 단일제트에서의 실험 및 수치해석적 결과들을 그대로 적용시킬 수 없다.

따라서, 본 연구에서는 제한된 2차원 슬롯노즐 배열충돌분류계에서 노즐간격 변화에 따른 열전달 특성을 파악하고자, Re수를 2000, 3950, 5900, 7900으로 변화시키고, 노즐에서 전열면까지의 무차원 거리비 $H/B=2, 4, 6, 8$ 일 때, 각각 인접한 제트사이의 거리(S)를 16B, 20B, 24B, 30B로 변화시켜 실험을 수행하였다.

분류의 유동특성을 파악하기 위해 열선유속계를 사용하여, 제트속도 및 난류성분을 측정하였으며, 국소열전달계수의 측정에는 나프탈렌 승화법(naphthalene sublimation technique)을 이용하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도이다. 작동유체인 공기는 온·습도 조절이 가능한 실험실내의 공기를 열교환기를 거쳐 인버터로 제어되는 송풍기로 흡입하며, 서지탱크를 거쳐 공기챔버로 유입된다. 이때, 송풍기에 연결되는 관은 송풍기로부터의 진동이 공기챔버에 전달되는 것을 방지하였고, 서지탱크에서는 공기의 맥동을 차단하였다. 서지탱크와 챔버사이에는 유량계를 설치하여 각각의 챔버에 균일한 공기량을 유지하도록 하였으며, 전열을 거친 공기는 실험실의 외부로 배출시켜, 유입 공기중에 나프탈렌이 혼입되는 것을 방지하였다. 공기챔버 내에는 충돌판을 설치하여 균일한 유동이 형성되도록 하였으며, 유동의 안정화를 위하여 상부에 하니콤(honeycomb)을 설치하였다. 챔버는 상·하 분리형으로 제작하였으며, 상·하 챔버사이에 3mm두께의 고무판을 설치하여 충돌판에 의한 진동이 챔버 하부로 전달되는 것을 방지하였다. 또, 실험장치는 바닥으로부터의 진동전달과 공기의 교란을 최대한 방지하였다.

Fig. 2에는 측정부의 단면과 사용한 노즐의 형상을 나타내었다. 측정부인 덕트는 10mm두께의 투명 아크릴로 제작하였으며, 슬롯노즐의 폭(B)은 6mm, 길이는 300mm로 2차원 분류유동이 충분하도록 하였고, 높이(H)를 조절하여 노즐과 충돌면 사이의 간격을 변화시킬 수 있으며, 노즐사이의 간격(S)을 조절할 수 있도록 하였다. 송풍기 출구와 공기챔버, 분류 충돌면에는 T형 열전대를 설치하여 노즐 출구의 공기온도가 $21 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 를 유지하도록 열교환기의 운전을 제어하였고, 실험시간 동안의 온도평균값을 구하여, 계산에 반영하였다.

피도우관으로 보정한 정온형 열선유속계를 사용하여 노즐출구의 제트속도와 난류강도를 측정하였으며, 난류강도가 5%정도인 초기 난류조건에서 실험을 수행하였다.

제트충돌면에는 정체점에서 주유동방향으로 등은

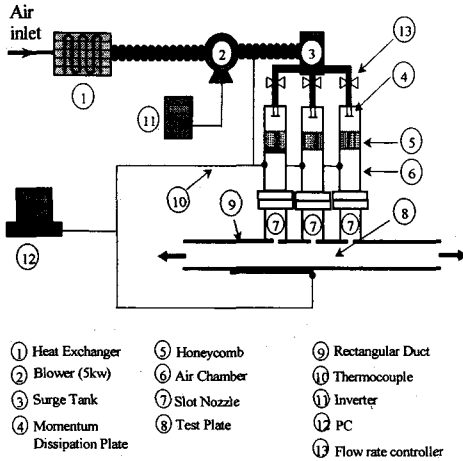


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

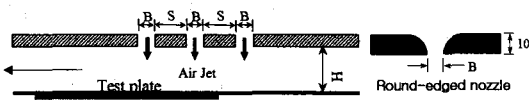


Fig. 2 Cross-sectional view of test section and nozzle geometry

전열면에 해당하는 나프탈렌 평판을 설치하였으며, 평판의 크기는 $100 \times 270\text{mm}$ 이다. 나프탈렌 평판은 나프탈렌 분말을 전기로에서 용융시켜 몰드에 주입한 후 상온에서 6시간 이상 냉각시켰다.

나프탈렌 평판표면에서의 국소승화깊이 측정은 Labview프로그램(National instrument PCI-Step-4CX, Oriental PK566-NAC 0.36°/step)에 의해 제어하였으며, 0.001mm의 반복 위치결정 정밀도를 가지는 3축 LM가이드를 설치한 정반위에 시편을 올려놓고 LVDT(Schaevitz LBB375TA-020,MP1000)로 표면 조도를 측정기록(IBM PC, National Instrument PC-LPM-16PnP) 하였다. 실험전과 충돌제트의 유동장에 노출시켜 나프탈렌을 승화시킨 후, 같은 위치에서 표면조도를 측정하여 실험시간동안의 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⁽⁹⁾이 제안한 나프탈렌 증기압을 대입함으로써 구할 수 있다.

Cho등⁽¹⁰⁾이 제시한 나프탈렌 확산계수(D)로부터 물질전달의 무차원수 Sherwood수를 다음식에서 산출한다.

$$Sh = \frac{h_m B}{D} \quad (2)$$

여기서, B는 특성길이인 슬롯의 폭이다.

또, 자연 승화에 의한 실험 오차를 줄이기 위해 식(3)을 사용하여 승화깊이차를 보정하였다.

$$\delta_{free} = C \times 10^{-10} [1.0 + 0.1(T_w - 297.15)]^{1.03} \times \Delta t \quad (3)$$

δ_{free} 는 자연 승화된 깊이, Δt 는 자연 승화 시간이며, 상온에서 평판에 대한 계수 C는 0.83이다.⁽¹¹⁾

Sherwood 수로부터 Nusselt 수로 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 n값은 0.4이고, Schmidt 수 Sc는 온도의 함수로써 주어진다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 속도분포 및 난류강도

Fig. 3은 $Re=2000$ 일 때, 인접 제트와의 무차원 거리비(S/B)가 16, 24, 30인 경우 중앙노즐의 분류 중심축상에서의 속도와 노즐출구속도와 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 영역이 $H/B \approx 4$ 로 단일제트에서 보다는 작았다. 그리고, 인접한 제트사이의 거리(S/B=16, 24, 30)에 따른 각각의 경우, 속도분포에서 포텐셜코어영역 내에서는 유사한 값을 가지며, 이후에는 S/B가 감소함에 따라 속도의 감소도가 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 배열충돌 분류의 경우 분류(jet)가 충돌면에 부딪히기 전에 일어나는 인접한 제트와의 상호작용으로 S/B가 감소함에 따라 주변유체와의 활발한 혼합 때문인 것으로 사료된다.

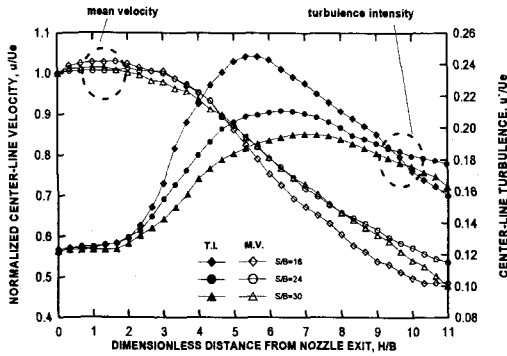
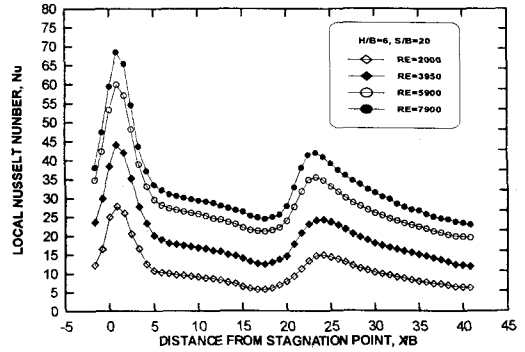


Fig. 3 Mean velocity and turbulence intensity distributions of center nozzle along the centerline at $Re=2000$

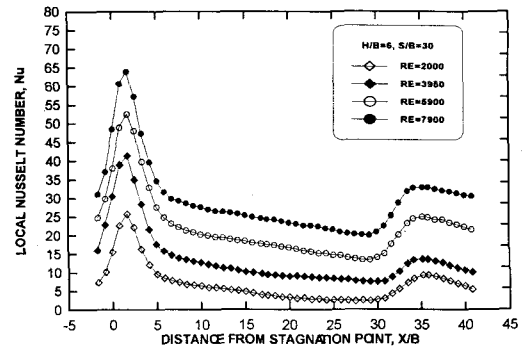
또, 포텐셜코어영역에서 평균속도비(u/U_e)가 1보다 큰 것은 오리피스(orifice)형 슬롯 노즐에서 나타나는 유동수축 현상(vena contracta)에 따른 유동특성으로 사료된다. 난류강도의 분포는 $H/B \approx 2$ 까지 거의 일정한 값을 유지하다가 급격히 증가하여 $H/B \approx 6$ 에서 최대값을 가진 후 감소한다. 또, S/B 가 감소함에 따라 더욱 큰 난류강도 값을 가지는 것을 알 수 있으며, 이는 노즐간격이 작아짐에 따라 주변유체와의 혼합이 더욱 활발하기 때문으로 사료된다.

3.2 국소 열전달계수

Fig. 4 (a), (b)는 $H/B=6$ 에서 인접 제트와의 무차원 거리비(S/B)가 각각 20과 30일 때 Reynolds 수에 따른 국소 열전달계수의 분포를 나타낸 것이다. Re 수가 증가함에 따라 정체점뿐 아니라 벽면제트영역에서도 국소열전달계수는 높게 나타나고 있으며, 벽면제트영역에서는 노즐로부터 분출된 분류가 벽면분류로 흐름의 방향이 변화하여, 큰 압력구배와 벽면상에서 온도경계층의 성장으로 인해 정체점 보다는 열전달 효과가 떨어진다. 하류 노즐의 정체점에서 중양노즐에서 발달한 유동과의 혼합에 의한 속도감소 및 횡방향 유동 등의 영향으로 국소 값을 나타내고 있다. S/B 가 감소함에 따라 중양노즐의 정체점에서 국소열전달계수가 높게 나타나는 것은 전술한 바와 같이 S/B 가 감소함에 따라 인접 제트와의 상호작용으로 인한, 난류강도 증가의 원인으로 사료된다. $Re=2000$ 에서는 이와 반대의 경향을 보이는데, 이는 S/B 가 감소함에 따라 횡방향 유동에 의한 제트속도 감소의 영향이 더 크게 작용하기 때문인 것으로 사료된다.



(a) $S/B=20$

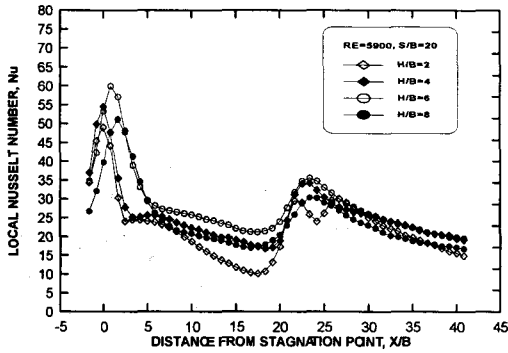


(b) $S/B=30$

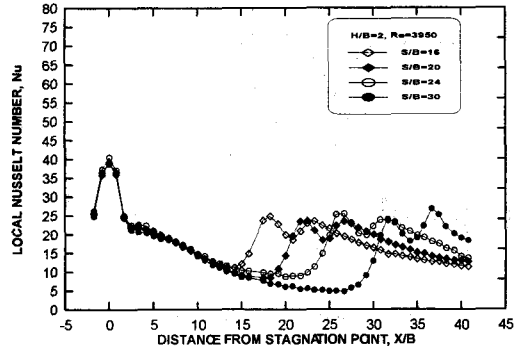
Fig. 4 Distributions of local Nusselt number for various Re at $H/B=6$

Fig. 5 (a)와 (b)는 $Re=5900$ 일 때, $S/B=20, 30$ 에서 H/B 의 변화에 따른 국소열전달계수의 분포를 나타낸 것이다. $S/B=20$ 인 경우 중양노즐의 정체점부근에서 열전달계수의 값이 $S/B=30$ 보다 높게 나타나고 있는데, 이는 전술한 바와 같이 인접 제트간의 상호작용이 더 크게 작용하여, 난류강도가 증가하기 때문인 것으로 사료된다. 또한, $S/B=20$ 에서 $H/B=6$ 까지 국소열전달계수는 증가하나, $H/B=8$ 에서는 오히려 감소하는 경향을 보이는데, 이는 H/B 가 증가에 따른 제트속도의 감소에 의한 영향으로 사료된다.

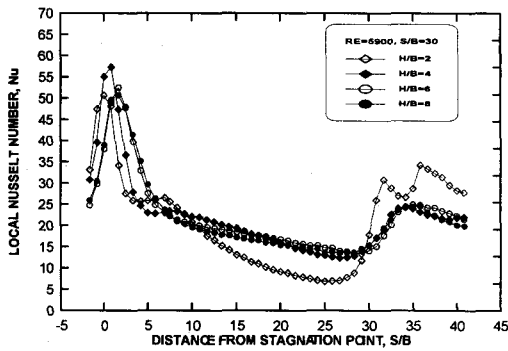
또한, H/B 가 증가함에 따라 중양노즐의 최대열전달점은 노즐의 기하학적 중심에서 일어나지 않고 하류 노즐쪽으로 이동하는 경향을 보이고 있다. 이는 병렬제트의 경우 H/B 의 증가에 따라 인접한 제트와의 상호작용으로 인한 유동의 교란 때문이며, 그 이동은 독립적으로 발달하는 3개의 분류(jet)중에서 본 실험에서는 유동저항이 작은 쪽으로 이동하고 있다. H/B 의 증가에 따라 제



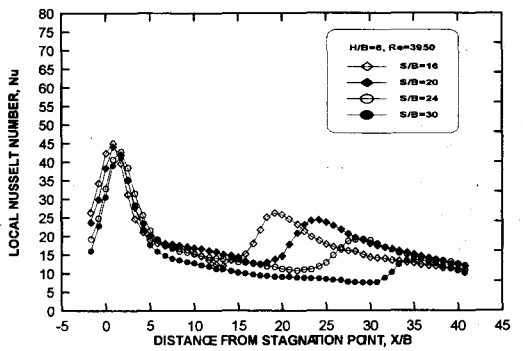
(a) S/B=20



(a) H/B=2



(b) S/B=30



(b) H/B=6

Fig 5. Distributions of local Nusselt number for various H/B at Re=5900

Fig 6. Distributions of local Nusselt number for various S/B at Re=3950

트유동의 특성을 유지하려는 성질이 줄어들어 그 이동폭 또한 증가하는 것으로 사료된다.

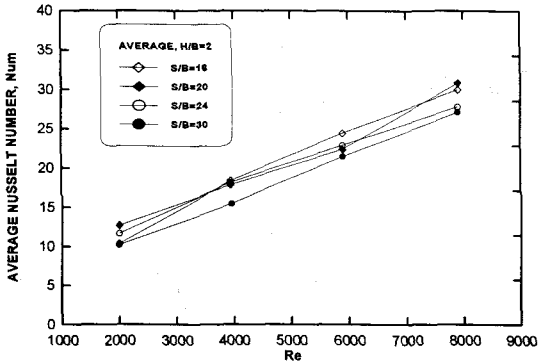
Fig. 6 (a)와 (b)는 Re=3950일 때 H/B=2와 6에서 S/B의 변화에 따른 국소열전달계수의 분포를 나타낸 것이다. H/B=6인 경우가 2보다 중앙노즐의 정체점의 열전달계수 값이 높게 나타나고 있다. 이는 전술한 바와 같이 인접한 제트의 상호작용으로 인한 난류강도의 증가때문으로 사료되며, H/B=2인 경우에 하류노즐의 정체점 영역에서 나타나는 제2극대점은 단일제트와 동일한 경향으로 제한벽면과 전열면 사이에서 유동의 가속 효과와 재부착 등의 영향으로 사료된다. 이러한 경향은 H/B가 증가함에 따라 충돌면에 충돌 후 인접한 제트간의 상호작용 및 주변유체와의 활발한 혼합등의 영향으로 감소되고 있다. 또, H/B=6인 경우 노즐간격이 증가함에 따라 하류노즐에서 국소열전달계수의 값이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 인접제트 사이와의 거리가 증가함에 따라 중앙노즐에서 발달한 유동과의 혼합에 의한

속도감소와 횡방향 유동 등의 영향으로 사료된다.

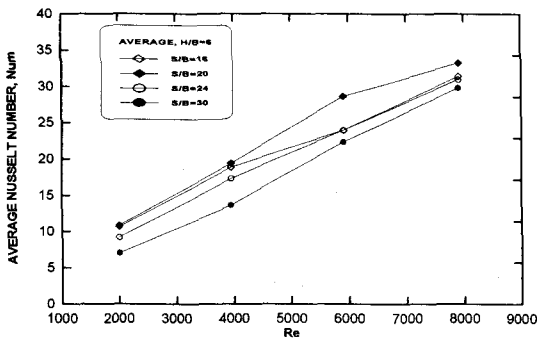
3.3 평균 열전달계수

Fig 7 (a)와 (b)는 각각 H/B가 2, 6인 경우 S/B의 변화에 따른 평균열전달계수를 나타낸 것이다. Re수가 증가함에 따라 평균열전달계수는 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, S/B가 감소함에 따라 전체적인 평균열전달계수의 값이 증가함을 보이고 있다. 이러한 경향은 인접 제트와의 거리가 짧아져서 충돌면과 충돌 직후의 인접한 제트간의 상호작용과 주변유체와의 혼합효과가 증가하며, 횡방향 유동의 영향을 적게 받아 하류노즐에서의 유동특성이 더욱 크게 나타나기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결론



(a) H/B=2



(b) H/B=6

Fig 7. Average Nusselt number ratio on the plate for Reynolds number and various S/B

- (1) Re수의 증가에 따라 포텐셜코어의 길이 및 난류강도는 감소하며, S/B가 증가함에 따라 난류강도는 감소하고, 포텐셜코어의 길이는 증가한다.
- (2) 국소열전달계수의 분포에서 노즐출구와 전열면사이의 거리가 포텐셜코어의 길이보다 짧은 영역에서는 하류노즐의 정체영역 부근에서 제2의 극대값이 나타난다.
- (3) 배열충돌분류에서 각 제트의 유동은 인접한 제트와의 상호작용을 받고 있으나, 병렬제트에서와 같은 완전 혼합의 형태로 나타나지 않고 각각 독립적인 형태로 발달한다.
- (4) S/B의 감소에 따라 횡방향 유동의 영향을 적게 받음으로써 하류 노즐에서의 열전달계수는 증가한다.
- (5) 중앙노즐의 정체점에서 최대열전달이 일어나는 지점은 인접 제트와의 간섭작용으로 인해 유동저항이 작은 쪽으로 이동하고, H/B가 증

가함에 따라 이동폭은 증가한다.

- (6) 평균열전달계수는 Re수가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하며, S/B가 감소함에 따라 증가하나, S/B=20에서 최대값을 가진다.

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. Krothapalli, A. and Baganoff, D., 1980, "Development and structure of a rectangular jet in a multiple jet configuration", AIAA, Vol. 18, No. 8, pp.945-950.
6. Gardon, R. and Akifirat, J. C., 1966, "Heat transfer characteristics of impinging two-dimensional air jets", ASME J. of Heat Transfer, pp. 101-108.
7. Habi, A. El-Sheikh. and Garimella, V., 2000, "Heat Transfer from pin-fin heat sinks under multiple impinging jets", IEEE Transaction on advanced packaging, Vol. 23, No. 1., pp.113-120.
8. 조형희, 윤필현, 황상동., 2000, "유출홀을 사용한 배열충돌제트의 열/물질전달 특성", 대한기계학회 춘계학술대회논문집 B, pp.125-131.
9. Ambrose, D., Lawrenson, I.J. and Sprake, C. H. S., 1975, "The Vapour Pressure of Naphthalene", J. Chem. Thermodynamics, Vol. 7, pp. 1173-1176.
10. 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.
11. Goldstein, R.J. and Cho, H. H. 1995, "A Review of Mass Transfer Measurements using Naphthalene sublimation", Experimental thermal and Fluid Science, Vol. 10, pp. 416-434.