

## 선회충돌제트에 의한 배열 칩의 열전달 특성에 관한 실험적 연구

박시우† · 최재욱\* · 전영우\* · 정인기\*\*

(원고접수일 : 2003년 11월 14일, 심사완료일 : 2004년 1월 26일)

### An Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Arrangement Chips by Swirl Jet Impingement

Si-Woo Park† · Jae-Wook Choi\* · Young-Woo Jeon\* · In-Kee Chung\*\*

**Abstract** : The experimental study on heat transfer characteristics of protruding heated block array as conducted to investigate and to compare the performance of impinging single circular jet in fully developed tube with a twisted tape as a swirl generator. The effects of jet Reynolds number( $Re=8700, 13800, 20000, 26500$ ), dimensionless jet-to-block distance( $H/d=1, 3, 5, 7$ ) and swirl number( $S=0.11, 0.23, 0.30$ ) of the swirl jet on the average Nusselt number for each block and all blocks have been examined. Measurements of heat transfer rate on block surfaces were used naphthalene sublimation technique. Mean velocity and turbulence intensity of the jet along the axis were measured. Potential core length of the jet was 5 times of nozzle diameter because it was fully developed and initially turbulent. With the twisted tape in the nozzle, heat transfer coefficients were higher than those without the twisted tape, which are mainly caused with increasing the jet Reynolds number and swirl number.

**Key words** : Arrangement Chip(배열 칩), Twisted Tape(비틀림 테이프), Swirl Jet Impingement Heat Transfer(선회충돌제트 열전달), Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌 승화법)

#### 1. 서 론

충돌제트는 높은 열(물질)전달 효과를 얻을 수 있기 때문에 가열, 냉각, 건조 등 각종 산업분야에서 광범위하게 응용되고 있다. 특히, 최근 전자부품들의 발열밀도가 크게 증가하고 있으며, 이들의

냉각문제와 관련하여 지금까지 충돌제트에 대한 유동특성 및 열·물질전달 특성에 대한 연구와 열전달 촉진 방안에 대한 다양한 인자와 변수들에 대하여 수많은 연구가 활발히 수행되어져 왔다.

Davalath 등<sup>(1)</sup>은 기관이 등온 또는 단열인 경우에 가열블록 주위의 유동 및 강제냉각 특성을

† 책임저자(경일대학교 기계자동차학부), E-mail : siwoo@kiu.ac.kr , T : 053)850-7130

\* 영남대학교 대학원 기계공학과

\*\* 영남대학교 기계공학부

수치적으로 연구하였으며, Huang과 El-Genk<sup>(2)</sup>은 선회류 발생체(swirl generator)를 삽입한 다중 채널 노즐을 이용하여 제트의 선회도 및 제트와 충돌면 사이의 거리가 증가할수록 벽제트영역에서 열전달계수의 분포가 균일함을 보고한 바 있다. Ward와 Mahmood<sup>(3)</sup>는 제트 선회도 변화에 따른 국소 및 평균열전달계수를 나프탈렌 승화법을 이용하여 측정하였으며, 이 와 윈<sup>(4)</sup>은 평판에 충돌하는 선회류 원형제트의 열전달 효과를 선회류 발생체를 삽입하지 않은 경우와 비교하여 15~35% 정도 증가함을 보고하였다.

본 연구에서는 충돌제트에 배열한 모사 전자칩(블록)의 열전달 증진을 목적으로, 칩 표면에 대한 전열특성을 파악하고자 한다. 원형노즐의 출구에 비틀림 테이프를 설치하여 제트에 선회를 주었으며 이 때, 비틀림 테이프의 비틀림 각도에 따른 선회도(swirl number)는  $S=0.11, 0.23$  및  $0.30$ 으로 하였다. 노즐 출구로부터 충돌면 사이의 무차원 거리를  $H/d=1, 3, 5, 7$ 로 변화시켰으며, 제트 Reynolds 수가  $Re=8700, 13800, 20000$  및  $26500$ 의 경우에 대해서 비틀림 테이프를 삽입하지 않은 경우와 비교하여 실험을 수행하였다. 본 실험에서 각 블록의 평균열전달계수 측정에는 나프탈렌 승화법(naphthalene sublimation technique)의 중량법을 사용하였다.<sup>(5)</sup>

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 나타낸다.

작동유체인 공기는 실내 공기를 흡입하며, 충돌면에서 제트(jet)의 온도를 일정하게 유지시키기 위하여 열교환기를 거쳐 인버터로 제어되는 송풍기로 압축 한 후, PVC관으로 연결된 공기유로를 따라 서지탱크를 거쳐 노즐에서 분사된다. 이때, 송풍기의 입·출구에 연결되는 관은 플렉시블 튜브(flexible tube)를 사용하여 송풍기로부터의 진동이 공기챔버에 전달되는 것을 방지하였고, 공기챔버에서는 공기의 맥동을 차단하였다. 또한,

공기챔버의 입구에는 균일한 공기 유량으로 제어하기 위한 오리피스 유량계가 설치되어 있으며, 전열면과의 충돌 이후의 공기는 사방으로 유로를 형성하여 전부 실험실의 외부로 배출되는 구조로 이루어져 있다. 따라서 장치에 유입되는 공기중에 나프탈렌이 혼입되어 실험장치 내부의 나프탈렌 증기밀도가 변화하는 것을 방지하였다. 또, 실험장치는 바닥으로부터의 진동전달을 차단하기 위한 방진장치 위에 설치하였고, 실험실 내에서 공기의 교란을 최대한 방지하였다.

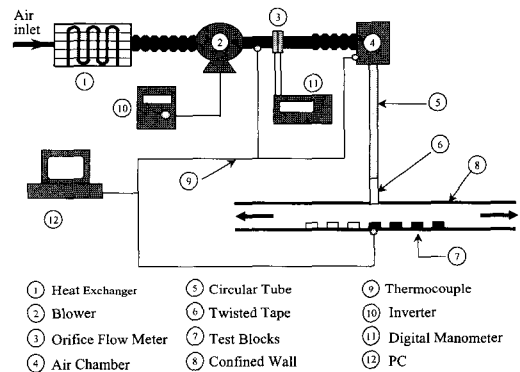


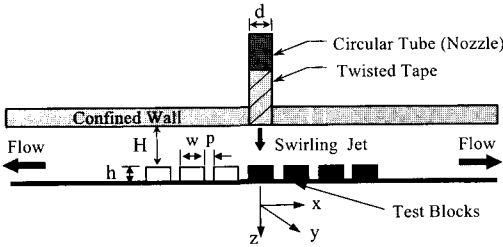
Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

송풍기 출구와 공기챔버, 제트 충돌면에는 T형 열전대(thermocouple)를 설치하여 노즐 출구의 공기온도가  $21\pm 0.5^\circ\text{C}$ 를 유지하도록 열교환기의 운전을 제어하였고, 실험시간 동안 온도의 평균값을 구하여 Sherwood 수의 계산에 반영하였다. 또한, 실험실내의 온·습도 및 압력을 자동기록장치로 기록하였으며, 측정데이터는 PC에 실시간 기록 저장하였다.

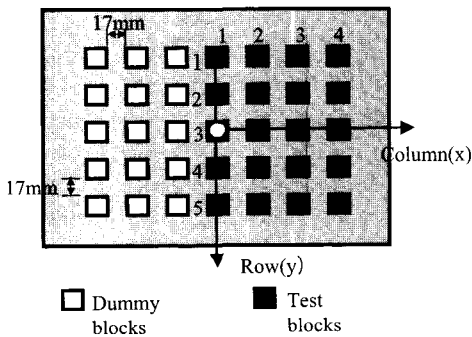
Fig. 2(a)에는 측정부의 단면도를 나타내었다.

측정부는 15 mm 두께의 투명 아크릴로 제작하였으며, 높이(H)를 조절하여 노즐과 충돌면 사이의 간격을 변화시킬 수 있는 구조로 되어있다. 완전 발달된 유동을 갖기 위한 파이프 노즐은 내경이 17 mm, 길이가 600 mm인 동관을 사용하였으며, 출구 부분에 비틀림 테이프를 삽입했다. 또, Fig. 2(b)는 측정부의 좌표계를 나타내었다.  $34\times 34$  mm, 높이(h) 17 mm인 3차원 블록을 정

열 배열하였으며, 좌·우 대칭을 이루기 위하여 측정블록의 반대 영역에는 더미(dummy) 블록을 배열하였다.



(a) Test section



(b) Coordinate system

Fig. 2 Test section and coordinate system.

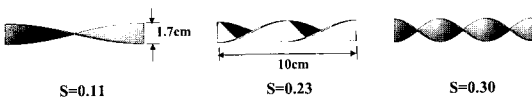


Fig. 3 Twisted tapes.

Fig. 3은 선회류 발생체인 비틀림 테이프의 형상을 나타낸다.

테이프는 두께 1 mm인 동판을 선회도  $S=0.11, 0.23$  및  $0.30$ 으로 제작하였으며, 선회도( $S$ )는 테이프의 비틀림 각도  $\theta$ 를 측정하여 식 (1)을 이용하여 계산하였다.<sup>(6)</sup>

$$S = \frac{\text{angular momentum}}{\text{axial momentum}} \approx \frac{2}{3} \tan \theta \quad (1)$$

Table 1에는 본 실험의 실험인자와 실험범위를

나타내었다.

Table 1. Experimental parameters and range

Parameters	Experimental range
H/d	1, 3, 5, 7
S	0.11, 0.23, 0.3
Re	8700, 13800, 20000, 26500
Test column blocks	1st, 2nd, 3rd, 4th, 5th
Test row blocks	1st, 2nd, 3rd, 4th

돌출 배열블록간은 열(Row)방향과 행(column) 방향으로 각각 4열 및 5행으로 실험하였으며, 비틀림 테이프를 삽입하지 않은 경우와 비교, 분석하기 위하여 비틀림 테이프가 삽입되지 않은 원형 제트(축류제트)에서 각각의 블록에 대한 평균 열 전달 계수와 전체 블록에 대한 열전달 특성을 조사하였다.

## 2.2 실험데이터의 처리 방법

먼저 제트의 특성을 파악하기 위하여 정온형 열 유속계로 노즐출구의 제트속도와 난류강도를 측정하였으며, 난류강도가 5%를 초과하는 초기 난류 제트 조건에서 실험하였다. 충돌제트에 의한 전자 칩의 열전달 특성을 파악하기 위해서는 나프탈렌으로 구조된 3차원 블록을 배열하였으며, 중량법을 이용하여 각 블록의 평균열전달을 측정하였다. 실험은 미리 제작 보관한 나프탈렌 시편을 먼저 정밀화학천칭으로 초기중량을 측정한 후, 유동장에 노출시킨다. 실험 종료후 신속히 중량의 변화를 측정하여 실험전후의 중량차를 이용하는 평균 물질전달계수를 계산한다. 이때 외부로의 승화손실량은 예비실험을 통하여 미리 측정된 값을 사용하여 계산에서 보정하였다.

나프탈렌 블록의 중량차이로부터 평균물질전달 계수를 구하는데는 다음 식을 사용하였다.

$$K_{avij} = \frac{\Delta M_{ij}}{\Delta t \cdot A(\rho_{v,w} - \rho_{v,bij})} \quad (2)$$

즉, ij번째 위치에 있는 블록의 평균물질전달계수( $K_{avij}$ )는 ij번째 나프탈렌 블록의 중량 차이 ( $\Delta M_{ij}$ ), 실험시간( $\Delta t$ ), 시편표면의 나프탈렌 증기밀도( $\rho_{v,w}$ ), 주류중의 나프탈렌 증기밀도( $\rho_{v,bij}$ )로부터 계산된다. 이때, 나프탈렌 증기밀도는 이상기체 상태방정식에 Ambrose 등<sup>(7)</sup>이 제안한 나프탈렌 증기압을 대입하여 구할 수 있다. 또, Cho 등<sup>(8)</sup>이 제시한 나프탈렌 확산계수( $D$ )로부터 물질전달의 무차원수인 Sherwood 수를 다음 식으로 산출하였다.

$$Sh_{avij} = \frac{K_{avij} \cdot d}{D} \quad (3)$$

여기서,  $d$ 는 특성길이인 원형노즐의 직경이다. 그리고, Sherwood 수로부터 Nusselt 수를 구하는 열-물질전달의 상사식은 다음과 같이 정의된다.

$$Nu_{avij} = (Pr/Sc)^n \cdot Sh_{mij} \quad (4)$$

공기의 Prandtl 수는  $Pr=0.707$ 이며, 지수  $n$  값은 0.4이고, Schmidt 수  $Sc$ 는 온도의 함수로써 주어진다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 속도분포 및 난류강도

Fig. 4는 비틀림 테이프를 삽입하지 않은 경우 제트 중심선에서 평균속도와 노즐 출구속도와의 비( $u/U_e$ ) 및 난류강도( $u'/U_e$ )의 분포를 나타낸 것이다.

제트의 포텐셜 코어 길이는 Reynolds 수와 상관없이 대략  $H/d \cong 5$ 였고, 난류강도는  $H/d=4$ 에서부터 급격히 증가하여 주위 유체와의 혼합이 충분히 이루어지는  $H/d=7$  근처에서 최대가 된 후 다시 감소하였다. 또한, Reynolds 수가 작을수록 노즐 출구에 대한 평균속도의 감소 폭이 증가하므로  $H/d \leq 8$ 에서 난류강도는 크게 나타났다.

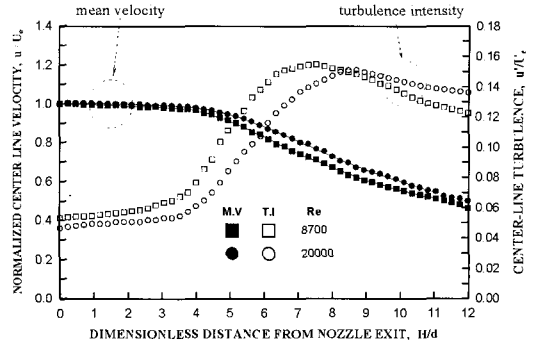
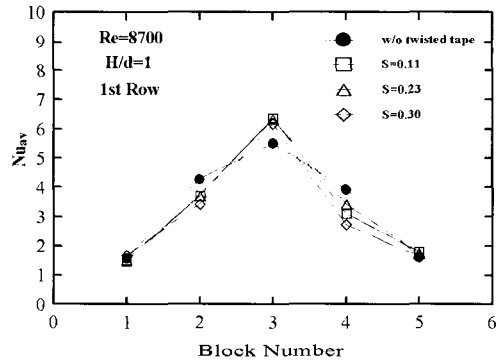


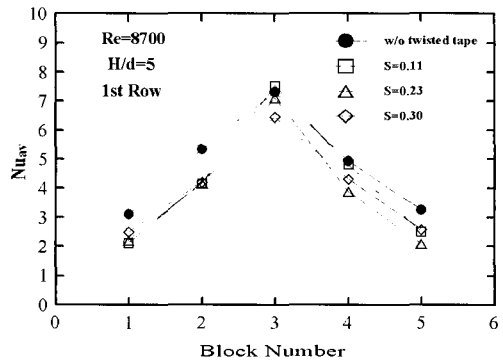
Fig. 4 Mean velocity and turbulence intensity distributions of jet along the axis without a twisted tape.

#### 3.2 평균열전달계수 및 분포

Fig. 5는 Reynolds 수  $Re=8700$ 이고 노즐 출구로부터 블록 윗면까지의 무차원 거리가  $H/d=1$



(a)  $H/d=1$



(b)  $H/d=5$

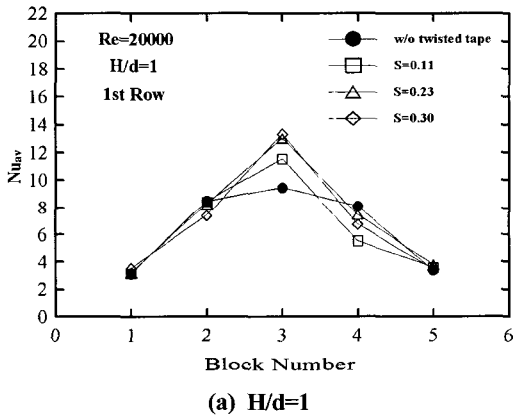
Fig. 5 Distributions of average Nusselt number for the 1st row at  $Re=8700$ .

과 5일 때, 비틀림 테이프를 삽입하지 않은 경우와  $S=0.11, 0.23, 0.30$ 인 경우 제1열(row)에서 각 블록에 대한 평균열전달계수를 나타낸 것이다.

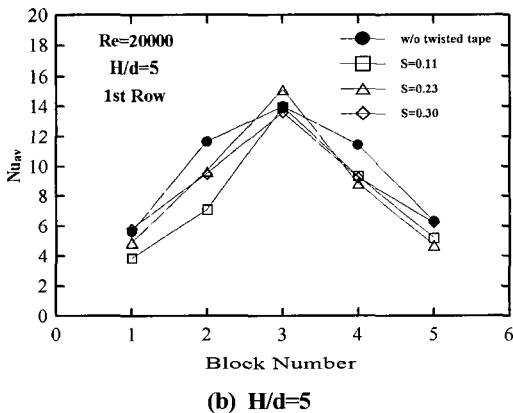
모든 경우 평균열전달계수는 정체점영역에 해당하는 3번 블록에서 최대값을 나타내었으며, 반경 방향으로 갈수록 현저히 감소하는 원형충돌제트의 전형적인 현상을 보이고 있다. 이는 노즐 직하의 3번 블록에 충돌한 제트가 벽제트영역으로 진행할수록 블록에 의한 유동방해로 운동량이 급격히 감소하기 때문으로 사료되며, 선회류 제트에서 그 현상이 더욱 현저하였다.  $H/d=1$ 인 경우, 3번 블록에 대한 열전달효과는 비틀림 테이프를 삽입한 경우가 삽입하지 않은 경우보다 10% 증가하였으나, 벽제트영역의 블록에서는 오히려 감소하는 현상으로 보였으며, 선회도의 영향은 거의 없었다.

한편,  $H/d$ 가 증가할수록 선회제트유동이 전열면에 미치는 영향은 줄어들며, 전반적으로 열전달효과가 감소하였다.

Fig. 6에는  $Re=20000$ 이고,  $H/d=1$ 과 5일 때, 제1열(row)에서의 각 블록에 대한 평균열전달계수를 나타내었다.

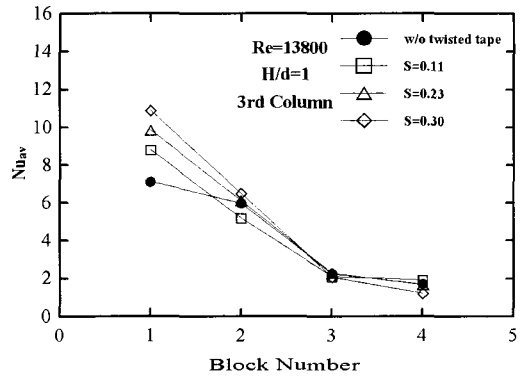


(a)  $H/d=1$

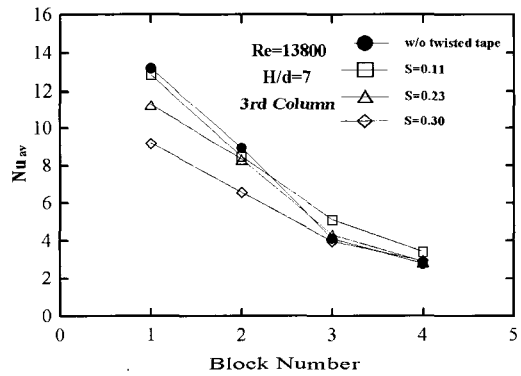


(b)  $H/d=5$

Fig. 6 Distributions of average Nusselt number for the 1st row at  $Re=20000$ .



(a)  $H/d=1$



(b)  $H/d=7$

Fig. 7 Distributions of average Nusselt number for the 3rd column at  $Re=13800$ .

$H/d=1$ 일 때, 비틀림 테이프를 삽입한 경우가 삽입하지 않은 경우보다 3번 블록에서 평균열전달이 30%정도 높게 나타났으며, 벽제트영역으로 갈수록 급격히 감소하고 있다. 반면,  $H/d=5$ 에서는 비틀림 테이프를 삽입함에 따라 열전달효과가 오히려 감소하고 있다. 이는 비틀림 테이프의 삽입에 따른 선회유동의 확산에 의한 원인으로 사료된다. 그리고 평균열전달계수의 값이 비틀림 테이프

를 삽입하지 않은 경우와 비교해 정체점을 기준으로 좌우 비대칭을 보이고 있는데, 이러한 현상은 비틀림 테이프에 의하여 분리된 2개의 선회유동이 H/d와 선회도(S)의 변화에 따라 블록에 대한 충돌지점을 변화시키기 때문으로 생각된다.

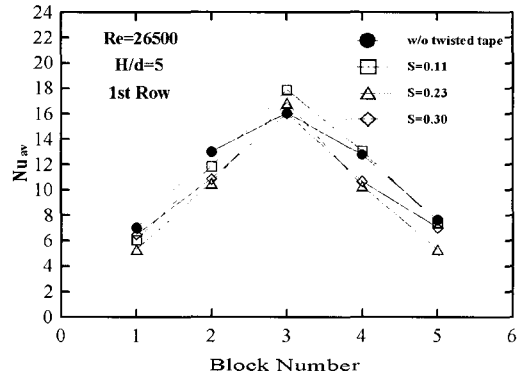
Fig. 7은 Re=13800이고 H/d=1 및 7일 때, 제3 행(column)의 각 블록에 대한 평균열전달계수를 나타낸 것이다.

H/d=1일 때, 노즐 직하의 1번 블록에서는 비틀림 테이프를 삽입한 경우의 열전달계수가 비틀림 테이프를 삽입하지 않은 경우보다 최대 45%가 증가하였으나, 하류블록으로 갈수록 선회유동에 대한 효과는 급격히 감소하였으며, H/d가 작을수록 현저하였다. 또, Fig. 7(b)와 같이 H/d가 클수록 선회제트의 열전달효과는 정체 영역에서 현저히 떨어졌고, 선회도가 클수록 현저하였다. 벽제트영역에서는 선회유동에 의한 열전달 증대를 약간 기대할 수 있으나, 그 효과는 매우 낮았다. 이는 선회유동이 하류영역에서 블록에 의한 유동 방해가 더욱 현저하였기 때문으로 사료된다.

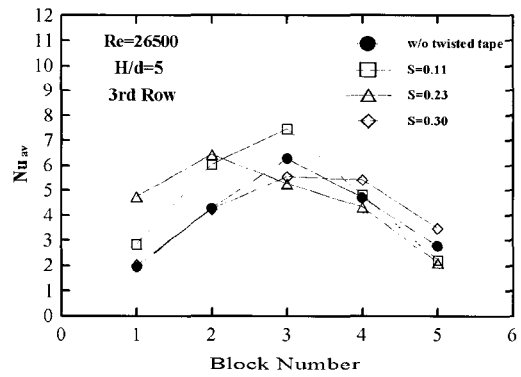
Fig. 8은 Re=26500이고 H/d=5일 때 각각 제1열과 제3열, 제4열에서 비틀림 테이프를 삽입한 경우와 삽입하지 않은 경우에서의 각 블록에서 평균 열전달계수의 값을 나타낸 것이다.

제3열과 제4열의 블록은 제트의 정체점을 지나 벽제트로 이행하는 위치에 배열된 블록이며, 유동이 정체점을 거쳐 벽제트영역으로 진행하면서 비틀림 테이프를 삽입하지 않은 경우에는 제1 열에서의 분포와 비슷하게 3번 블록의 평균 열전달계수가 최대가 되고, 1번과 2번 블록 및 4번과 5번 블록으로 가면서 감소하는 전형적인 원형 축류제트에서의 국소 열전달계수 분포를 나타내고 있다. 그러나 비틀림 테이프를 삽입한 선회제트의 경우에는 간혹 3번 블록에서의 평균 열전달계수 값이 1, 2번 블록이나 4, 5번 블록의 평균 열전달계수 값보다 더 낮게 나타나는 현상을 보이고 있다. 이러한 현상은 Reynolds 수와 H/d가 증가할수록 더욱 크게 나타났으며, 이는 비틀림 테이프에 의하여 분리된 2개의 선회유동이 회전하면서 H/d와 선회도(S)의 변화에 따라 선회제트의 충돌지점을

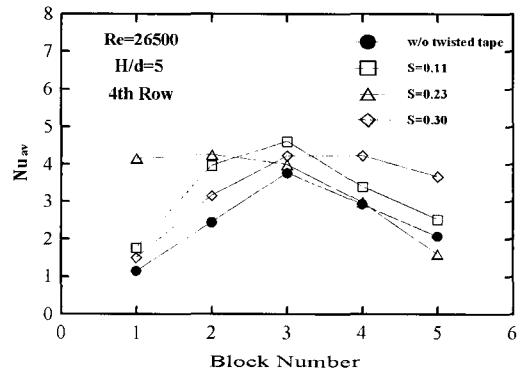
변화시키기 때문으로 사료된다. 이와 같이 선회제트는 반경방향으로 확산되면서 Reynolds 수와 H/d 및 S가 적당한 조건일 때 하류에 배열된 블록까지 영향을 미치는 것으로 나타났다.



(a) 1st Row



(b) 3rd Row

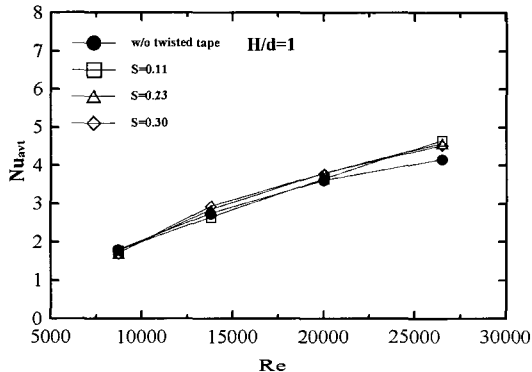


(c) 4th Row

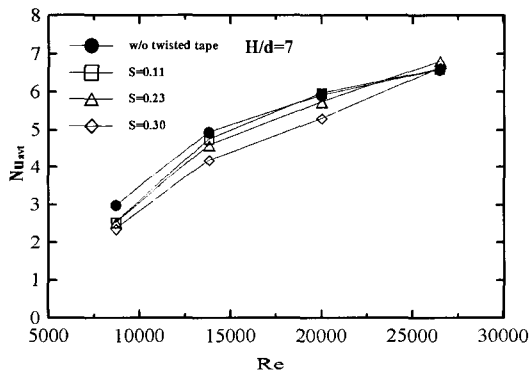
Fig. 8 Distributions of average Nusselt number for the H/d=7 at Re=26500.

### 3.3 전체 블록의 평균열전달계수

Fig. 9는  $H/d=1$ 과 7이고  $S=0.11, 0.23, 0.3$ 인 경우 제트 Reynolds 수의 변화에 따른 전체 블록의 평균열전달계수를 나타낸 것이다.



(a)  $H/d=1$



(b)  $H/d=7$

Fig. 9 Overall average Nusselt number for various Reynolds numbers at  $H/d=1, 7$ .

여기서, 전체 블록의 평균열전달계수 ( $Nu_{ave}$ )는 각 블록에 대한 평균열전달계수 ( $Nu_{av}$ )를 산술평균한 값이다. 전체블록의 평균열전달계수는 Reynolds 수의 증가에 따라 거의 대수 비례적으로 증가하고 있으며, 비틀림 테이프의 삽입 유무와 상관없이  $H/d$ 가 증가할수록 열전달계수가 높게 나타나고 있다. 비틀림 테이프 삽입에 따른 전체 블록의 평균열전달계수는  $H/d=1$ 에서  $Re=26500, S=0.11$ 일 때 비틀림 테이프를 삽입

하지 않은 경우보다 약 12% 증가하였으며, 이는  $H/d$ 가 작을수록 선회유동에 의한 열전달 촉진효과가 있음을 시사하고 있다. 그러나  $H/d=7$ 일 때, 저 Reynolds 수 범위에서는 선회제트가 오히려 블록의 열전달을 저하시키는 것으로 밝혀졌다.

## 4. 결 론

(1) 비틀림 테이프의 삽입유무에 관계없이 각 블록별 평균 열전달계수는 정체영역에 배열된 블록에서 최대값을 나타내며, 벽체영역에서 열전달 감소율은 비틀림 테이프를 삽입한 경우에서 더욱 크게 나타난다.

(2) 비틀림 테이프의 삽입에 의한 선회제트의 충돌 열전달은  $H/d$ 가 작을수록 Reynolds 수가 클수록 크고,  $H/d$ 가 증가할수록 선회유동의 반경 방향 확산으로 전열증진효과는 현저히 감소한다.

(3) 제트의 선회도( $S$ )에 대한 영향은  $H/d$ 에 따라 달라지며,  $H/d$ 가 작을수록, 선회유동에 의한 열전달 촉진효과가 증가하고, 정체점에 위치한 블록일수록 현저하다.

(4) 비틀림 테이프 삽입에 따른 전체 블록의 평균열전달계수는  $H/d=3$ 에서  $Re=8700, S=0.11$ 일 때 비틀림 테이프를 삽입하지 않은 경우보다 24% 정도 증가한다.

(5) 선회제트를 이용한 배열 돌출발열블록의 냉각효과는 제트 Reynolds 수와  $H/d$ , 제트의 선회도 등이 매우 한정된 범위에서만 나타난다.

## 참고문헌

- [1] Davalath, J. and Bayazitoglu, Y., 1989, "Forced Convection Cooling across Rectangular Blocks," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 109, pp. 321-328.
- [2] Huang, L. and El-Genk, M. S., 1997, "Heat Transfer and Flow Visualization Experiments of Swirling, Multi-channel and Conventional Impinging Jets," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 41,

No. 3, pp. 583-600.

- [3] Ward, J. and Mahmood, M., 1982, "Heat Transfer from a Turbulent, Swirling, Impinging Jet," Proceedings of 7th International Heat Transfer Conference, HTD-3, pp. 401-407.
- [4] 이대회, 원세열, 1999, "평판에 충돌하는 와류 원형제트의 열전달 특성 연구," 대한기계학회 열공학부문학술대회논문집, pp. 154-160.
- [5] 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.
- [6] Bach, T. V. and Gouldin, F. C., 1982, "Flow Measurements in a Model Swirl Combustor," J. of AIAA, Vol. 20, No. 5, pp. 642-651.
- [7] Ambrose, D., Lawrenson, I. J. and Sprake, C. H. S., 1975, "The Vapour Pressure of Naphthalene", J. Chem. Thermodynamics, Vol. 7, pp. 1173-1176.
- [8] 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.
- [9] 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.

**저 자 소 개**



**박시우 (朴時佑)**

1970년 4월 4일생, 1994년 경일대학교 기계공학과 졸업(학사), 1996년 영남대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 2001년 영남대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 현재 경일대학교 기계자동차학부 전임강사.



**최재욱 (崔在郁)**

1974년 5월생, 2001년 경일대학교 기계공학과 졸업(학사), 2003년 영남대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사)



**전영우 (田瑛宇)**

1973년 1월생, 1995년 경일대학교 기계공학과 졸업(학사), 1998년 영남대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 현재 영남대학교 대학원 기계공학과 박사과정.



**정인기 (鄭仁基)**

1945년 8월 19일생, 1968년 영남대학교 기계공학과 졸업(학사), 1971년 영남대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1995년 일본 시즈오카대학교 대학원 졸업(박사), 현재 영남대학교 기계공학부 교수.