

포텐셜 코어내에 설치된 충돌평판상의 열전달증진 및 유동특성에 관한 연구

Study on the flow characteristics and heat transfer enhancement on flat plate in potential core region of 2-dimensional air jet

이 용 화*
Y. H. Lee

Key words : Impinging jet(충돌분류), Potential core(포텐셜 코어), Turbulence promoter(난류촉진체), Flow visualization(유동 가시화), Heat transfer(열전달)

Abstract

A heat exchanging system employing the impinging air jet is still widely used in the various fields due to its inherent merits that include the easiness in engineering applications and the high heat and/or mass transfer characteristics. The purpose of this study is to investigate the enhancement of heat transfer and flow characteristics by placing a turbulence promoters in front of heat exchanging surface. In this study, a series of circular rods are placed at the upstream of a flat plate heat exchanger that is located at potential core region($H/W = 2$) of a two-dimensional impinging air jet. Heat transfer enhancement is achieved by inserting turbulence promoter that results in the flow acceleration and disturbance of boundary layer. The average Nusselt number of the flat plate with the turbulence promoters is found to be around 1.42 times higher than that of the flat plate without the turbulence promoters. Based on the results of flow visualization with a smoke wire, it is confirmed that the heat transfer enhancement is caused by the flow separation and disturbance of boundary layer by inserting the turbulence promoter.

기 호 설 명

C : 전열면과 난류촉진체 사이의 간극[mm]
D : 난류촉진체의 직경[mm]
d : 가시화시(니크롬선)의 직경[mm]
h : 열전달 계수[W/m^2C]= $q/(T_x - T)$

H : 노즐-충돌판간 거리[mm]
Nu : 국부 Nusselt수= $h \cdot W/\lambda$
 \overline{Nu} : 국부평균 Nusselt수= $(1/2x) \cdot \int_{-x}^x Nu \, dx$
P : 난류촉진체간의 피치[mm]
q : 열유속[W/m^2]
Re : Reynolds수= $U_e \cdot W/\nu$
Re_d : Reynolds수= $U_e \cdot D/\nu$

* 유한전문대학 건축설비과

- T_x : 전열면상의 국부온도[$^{\circ}\text{C}$]
 T : 노즐출구에서의 공기온도[$^{\circ}\text{C}$]
 X : 정체점으로부터의 거리[mm]
 U_0 : 노즐출구 유속[m/s]
 W : 노즐폭[mm]
 λ : 열전도율[W/m $\cdot^{\circ}\text{C}$]
 ν : 동점성계수[m 2 /s]

1. 서 론

노즐로부터 주위의 정지유체내로 분출되는 자유분류는 분류와 주위 유체와의 전단층에서 생성된 와류에 의해서 아주 높은 난류강도를 얻을 수 있기 때문에 난류분류를 전열면에 충돌시키는 “충돌분류”는 열전달증진의 가장 효과적인 방법의 하나로서 그동안 많은 연구가 있어 왔다. 즉, 충돌분류를 이용한 방법은 전열면의 정체점상에서 높은 열 및 물질전달효과를 얻을 수 있기 때문에 각종 건조, 냉각장치등에 널리 사용되어 왔으며, 근년에는 전자부품의 냉각에 이용하므로써 장치의 소형화를 도모하고 있다.^(1~5)

충돌분류계가 공업적으로 광범위하게 이용되는 것은 동력원의 용량이 작고 유량제어에 의한 열전달계수의 조정이 용이할 뿐만 아니라 물체상에서 국부적으로 높은 열전달효과를 얻을 수 있기 때문이다.

노즐로부터 정지유체로 분출되는 2차원 자유분류는 크게 포텐셜 코어(potential core) 영역, 천이영역, 완전난류영역으로 구분할 수 있는데, 일반적으로 포텐셜 코어 영역은 노즐출구폭의 4~5배 위치, 천이영역은 노즐출구폭의 10~12배 위치까지이며, 전열면을 천이영역에 설치하였을 때가 열전달효과는 가장 우수한 것으로 알려져 있다.^(1~4,6) 또한 분류가 평판에 수직으로 충돌하는 경우의 유동영역은 일반적으로 충돌영역 및 벽면분류영역으로 구분할 수 있다. 충돌영역에서는 분류의 중심인 정체점 근방에서의 열전달효과가 상당히 좋으며, 이 영역에서는 노즐로부터 분출된 분류가 벽면분류로 이행하기 때문에 흐름의 방향이 변화함과 동시에 큰 압력구배가 존재하며, 벽면상에는 경계층이 생겨, 정체점보다는 열전달효과가 떨어지게 된다.

충돌분류계의 소형화를 이룩하기 위해서는 전열면을 포텐셜 코어 영역에 설치하면서도 천이영역에 설치한 경우 이상으로 열전달효과를 얻을 수 있어야 할 것이다. 그런데 동력의 증가없이 열전달을 증진시키기 위한 방법인 수동적 방법(passive technique)에 의한 것으로는 전열면의 확대, 인공적인 조도의 사용 및 난류촉진체(turbulence promoter)의 설치 등을 들 수 있다.^(4,7~12)

난류촉진체를 전열면에 직접 접촉시키지 않고 전열면으로부터 간극을 두고 설치하면 물체와 전열면간의 흐름의 가속에 의한 것, 물체의 상-하 두면으로부터 자유유선이 생기는 것 등에 의해서 열전달증진효과가 기대된다.^(10~12)

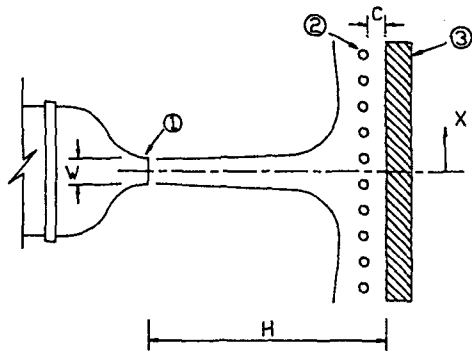
따라서 본 연구에서는 2차원 충돌분류계에서 평판전열면 근방에 난류촉진체를 설치하였을 때의 열전달 특성 및 열전달증진율을 고찰하여 소형화의 가능성을 검토하고, 열전달증진에 대한 유동기구를 가시화를 통해 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

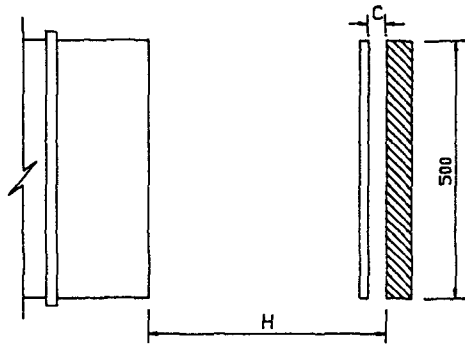
충돌분류계의 노즐-전열면간의 개략도를 Fig.1에 나타내었다. 노즐에서 분출되는 공기는 송풍기, 철망, 하니콧을 통과한 후, 4각노즐(출구폭 50mm, 교축비 15:1인 Sine 곡선)을 통해 분출되며, 이때 노즐폭을 대표길이로 한 Reynolds 수의 범위는 $0.64 \times 10^4 \sim 5.77 \times 10^4$ 이다.

노즐에서 대기중으로 분출된 분류는 평판전열면과 충돌하게 되며, 평판전열면 전방에 난류촉진체로서 원형봉군을 설치하였다. 그리고 실험에 사용한 4각 노즐에서 분출되는 분류의 초기 난류강도는 0.9%, 포텐셜 코어의 위치는 약 $H/W=5$, 그리고 4각 노즐의 2차원성은 이미 실험적으로 확인하였다.⁽¹³⁾

본 연구에서 노즐폭은 W , 노즐출구로부터 충돌판까지의 거리는 H 로 하고, 평판상에서의 좌표는 노즐 폭 방향을 X 로 하고 정체점으로부터의 노즐 폭 방향의 거리는 무차원거리(X/W)로 취했다. 또한 난류촉진체의 직경은 D , 난류촉진체와 전열면간 간극은 C 로 하였다. 난류촉진체로는 동봉($\phi 4 \times 490\text{mm}$)을 사용하였으며, 분류의 중심은 전열면



(a) Top view



(b) Front view

Fig.1 Diagram of nozzle-impinging flat plate system(1 : nozzle, 2 : turbulence promoter, 3 : flat plate)

중앙부에 있는 두 개의 난류촉진체사이의 중심선과 항상 일치하도록 하였으며, 또한 난류촉진체는 노즐 폭 방향으로 50mm 간격으로 설치하였다.

Table 1에는 본 연구에서의 실험범위를 나타내었다.

Fig.2는 전열면의 형상을 나타낸 것이다. 전열면은 두께 20mm의 베이클라이트판(500×500mm)에 두께 0.03mm인 스테인리스강 박판(10×500mm) 3매를 X방향으로 부착하여 직렬연결 하였으며, 자동전압조정기를 사용하여 1,020W/m²의 등열유속 조건이 유지되도록 공급전압을 조절하는 직접통전 가열법을 사용하였다. 전열면의 온도측정은 ϕ 0.07mm 인 C-C 열전대를 정체점으로부터 5mm 간격으로 스테인리스박판의 이면에 납땜부착하고 Data Log-

Table 1 Conditions and ranges of experimental parameters

| Experimental parameters | Conditions and ranges |
|---------------------------------|--|
| Nozzle exit width(W) | 50mm |
| Nozzle exit length(L) | 500mm |
| Heat flux | 1,020W/m ² |
| Diameter of turbulence promoter | 4mm |
| Reynolds number(Re) | $0.64 \times 10^4 \sim 5.77 \times 10^4$ |
| Dimensionless distance(H/W) | 2~4 |
| Dimensionless distance(X/W) | 0~5 |
| Clearance | 1~6mm |

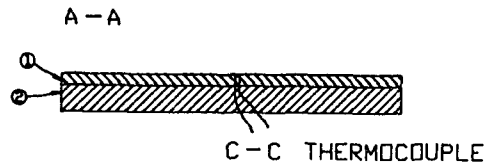
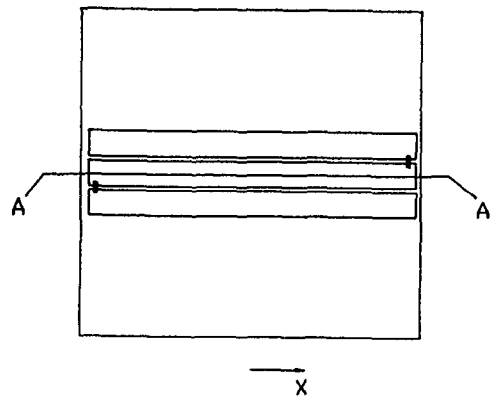


Fig.2 Detail of heating apparatus (1 : stainless steel foil, 2 : bakelite plate)

ger에 연결하여 각 점마다 10회 반복측정하여, 평균온도차가 0.1°C 이하인 경우의 온도를 정상온도로 취하였다. 층돌판 후면으로의 방출열량은 전체 가열량의 0.13% 미만이었기 때문에 열손실은 무시하였다.

그리고 난류촉진체와 전열면 근방의 유체유동에 대한 가시화는 비교적 간단히 행할 수 있는 smoke-wire법⁽¹⁴⁾을 채용하였는데, 연기발생은 유동파라핀에 기계유를 소량 섞어 니크롬선(d=0.1mm)에

도포한 후 AC 30-40V를 통전시켜 연기를 발생시켰다. 그리고 가시화 실험시에는 니크롬선의 직경을 대표길이로 한 Re_d 가 16이 되게 하였다. 이때의 흐름상태는 실제의 흐름과는 다르겠지만 정성적 논의에는 지장이 없다고 생각된다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig.3 및 Fig.4는 난류촉진체를 설치하지않은 전 열면에서 정체점으로부터의 국부 Nusselt수와 국부평균 Nusselt수의 분포를 H/W 에 따라 나타낸 것이다. 정체점에서의 국부 Nusselt수는 자유분류의 천이영역인 $H/W=10$ 인 위치에서 최대가 되며, 전열면 전체의 열전달효과도 $H/W=10$ 에서

가장 크게 나타난다. 이와같은 현상에 대해서는 그동안의 많은 연구결과로부터 이 위치에서 난류성분이 가장 강하게 나타나기 때문이다.^(1,2,13) 평판전열면을 포텐셜 코어영역($H/W=2, 4$)인 위치에 설치한 경우, 정체점의 국부 Nusselt수는 천이영역($H/W=10$)의 값보다 현저하게 떨어지지만, 정체점으로부터 거리가 멀어짐에 따라 Nusselt수는 감소하기 시작한 후, $X/W=3$ 근방에서 열전달계수가 재상승하는 현상이 나타난다. 이것은 Fig.5의 가시화 결과에서도 확인되듯이 노즐 양단에서 생성된 소규모의 와류가 점차 성장하여 벽면분류영역에서 대규모의 와류가 되어 전열면 근방에 침투하여 경계층을 교란시키기 때문이다.^(1, 3, 6, 13)

그런데 포텐셜 코어 영역내에 전열면이 설치되면

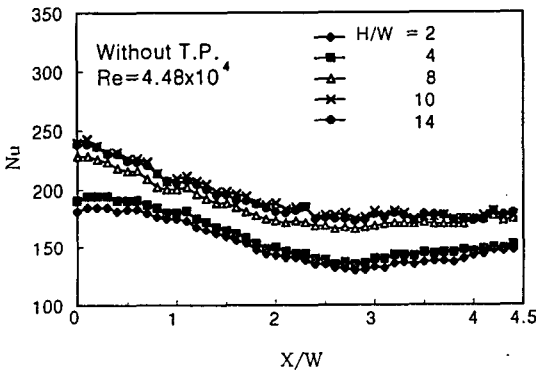


Fig.3 Distribution of local Nu on the flat plate without turbulence promoter (T.P. : Turbulence promoter)

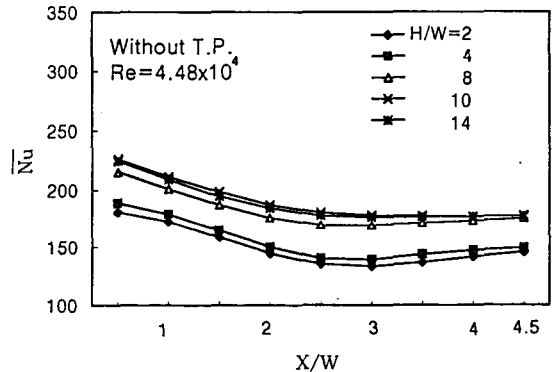


Fig.4 Distribution of local average Nu on the flat plate without turbulence promoter



Fig.5 Flow-visualization for flat plate without turbulence promoter

서도 천이영역에 설치된 경우 이상으로 열전달효과를 이룩할 수 있다면, 층돌분류계를 이용한 냉각 가열장치의 소형화가 가능할 것이다.

Fig.6은 포텐셜 코어 영역($H/W=2$)내에 전열면을 설치한 경우, Reynolds수 증가에 따른 국부 Nusselt수 분포를 $H/W=10$ 인 위치에 설치한 경우와 비교하여 나타낸 것이다. Re 를 3.85×10^4 에서 5.76×10^4 으로 증가(노즐출구유속으로 50% 증가)시켜도 $Re=3.85 \times 10^4$, $H/W=10$ 인 경우보다 열전달효과는 떨어짐을 알 수 있다. 즉, 층돌분류계에서 열전달효과가 좋으면서도 소형화가 가능하게 하기 위한 방법으로서, 유속을 증가시키는 방법은 높은 동력증가를 의미하기 때문에 바람직하지 않다. 전열면을 포텐셜코어 영역에 설치하면서도 동력의 증가없이 천이영역에 설치한 이상으로 열전달을 촉진시킬 수 있는 방법이 강구되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 전열면 근방에 난류촉진체를 설치하여 열전달증진을 꾀하고, 난류촉진체가 열전달증진에 기여하는 유동기구를 가시화를 통해 밝히고자 한다.

Fig.7은 노즐출구의 Re 를 4.48×10^4 으로 한 경우에 전열면과 간극을 두고 난류촉진체를 설치하였을 때, 간극변화에 따른 국부 Nusselt수 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 난류촉진체는 $X/W=0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5$ 인 위치에 설치되어 있다.

Fig.6과 Fig.7로부터 Re 가 4.48×10^4 일 때, 평판전열면상에 간극을 두고 난류촉진체를 설치한 경우의 열전달특성은 난류촉진체를 설치하지 않은 전

열면상에서 열전달효과가 급격히 감소하는 영역에서도 높은 열전달계수를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그리고 난류촉진체를 설치하므로써 정체점으로부터 첫번째 난류촉진체까지의 영역($X \leq 0.5$)인 정체점 근방에서는 간극의 변화에 따른 영향은 거의 없지만 첫번째 난류촉진체 이후의 벽면분류영역($X \geq 0.5$)에서는 간극의 변화에 따른 영향을 확실하게 알 수 있다. X/W 전영역에서의 국부 Nusselt수는 정체점보다 전반적으로 증가하고 있으며, 그 증가 경향은 난류촉진체 직하 및 난류촉진체사이에서 최대치가 나타나며, 난류촉진체 직전 및 직후에서 최소치가 나타난다. 난류촉진체 직하에서의 최대치는 유체의 가속때문이며,⁽¹⁰⁾ 난류촉진체간에 나타나는 최대치는 흐름의 재부착 및 난류촉진체 후미류의 효과, 그리고 최소치는 박리에 의한 효과임을 Fig.8에서 확인할 수 있다. 그리고 난류촉진체 직하점에서의 가속에 의한 열전달계수는 간극이 가장 좁을때 최대가 된다.

첫번째와 두번째 난류촉진체사이에서의 국부 Nusselt수 분포는 간극변화에 따라 다른 양상을 나타내고 있는데, 이것은 층돌분류의 흐름이 완전히 벽면분류로 발달하기 이전에 난류촉진체(첫번째 난류촉진체)가 설치됨으로써 난류촉진체의 설치 높이에 따른 영향이 나타나고 있기 때문이다. 즉, Fig.8에서 알 수 있듯이 간극이 작은 경우, 즉 전열면으로부터 난류촉진체까지의 높이가 가까운 경우($C=1mm$)에는 난류촉진체위를 타고 넘은 흐름이 다음 난류촉진체에 도달하기 이전에 벽면에 영

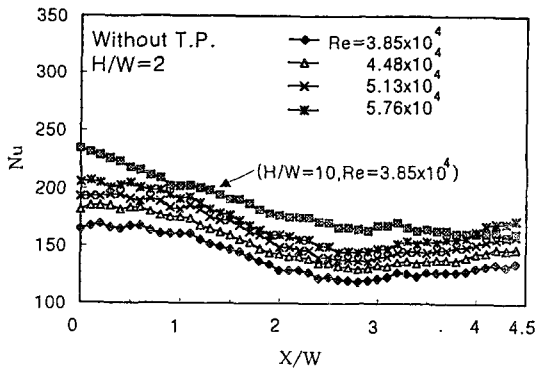


Fig.6 Distribution of local Nu along the flat plate without turbulence promoter

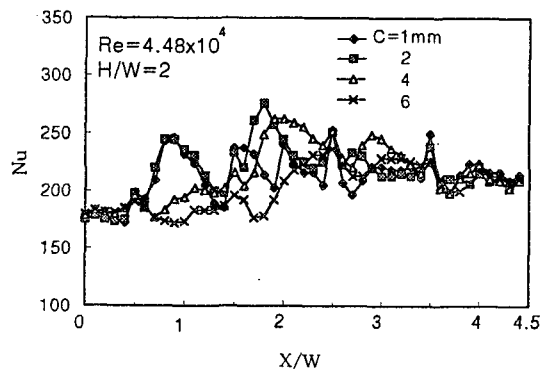


Fig.7 Distribution of local Nu on the flat plate with turbulence promoter

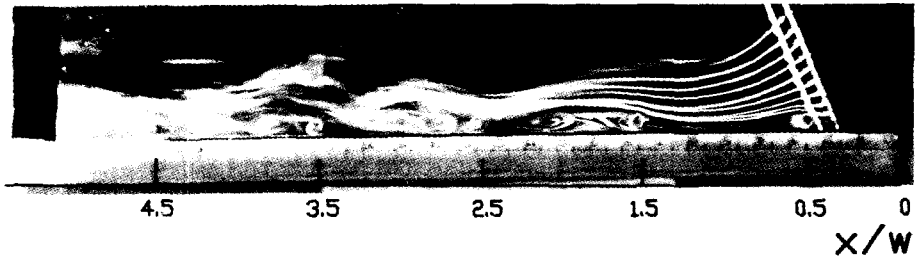
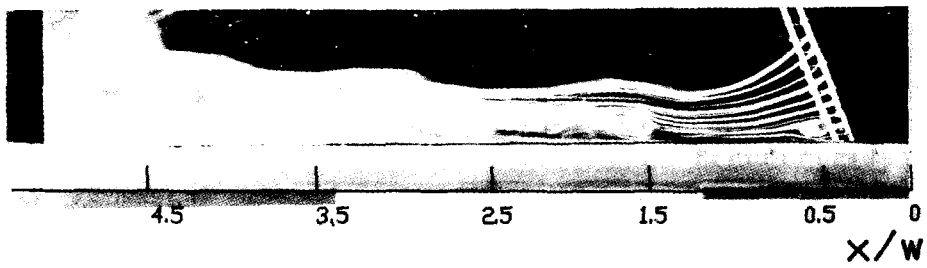
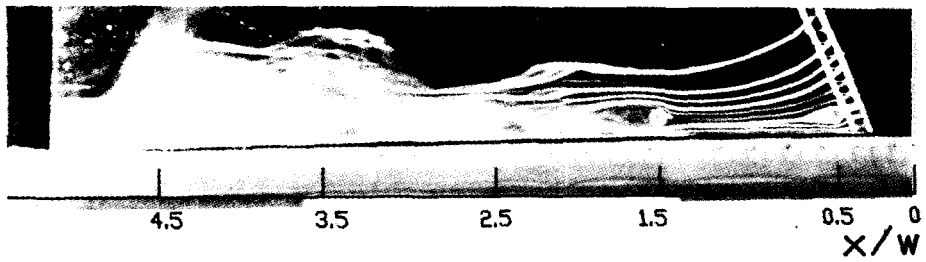
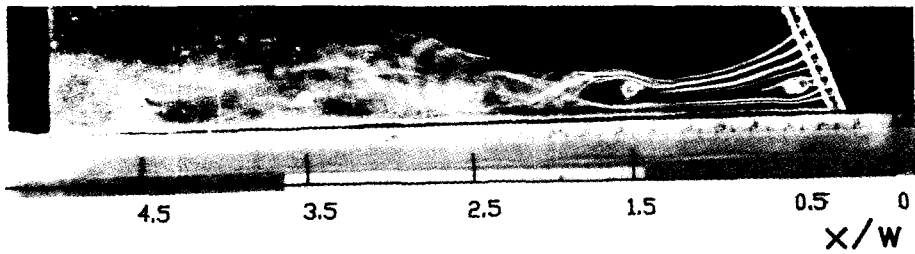
(a) $C=1\text{mm}$ (b) $C=2\text{mm}$ (c) $C=4\text{mm}$ (d) $C=6\text{mm}$

Fig.8 Flow visualization for various clearance between the flat plate and turbulence promoters

향(일종의 재부착)을 미치면서 두번째 난류촉진체와 전열면간의 간극을 통과하지만, 이와 같은 벽면에 영향을 미치는 현상은 간극이 증가할수록 점차 감소한다. 이것은 Fig.7의 열전달 결과와 비교하여도 잘 일치된다. 즉, 첫번째와 두번째 난류촉진체 사이에 나타나는 Nusselt수의 최대치는 간극이 증가함에 따라 크게 감소하며, 또한 최대치가 나타나는 위치도 간극이 증가할수록 첫번째 난류촉진체로부터 떨어진 위치에 나타난다.

두번째와 세번째 난류촉진체 사이에서의 Nusselt수의 최대치도 간극이 증가함에 따라 두번째 난류촉진체로부터 떨어진 위치에 나타나는데, 이것은 Fig.8에서 두 번째 난류촉진체 후미에 생기는 와류의 크기 때문임을 알 수 있다. 난류촉진체 후미의 와류가 전열면상의 경계층을 교란시키고, 또한 와류의 크기는 간극이 증가함에 따라 커지므로 Nusselt수의 최대치도 난류촉진체로부터 떨어진 위치에서 나타나게 된다.

그리고 세번째 난류촉진체 이후부터는 흐름의 확산으로 인하여 난류촉진체 직하에서의 가속류에 의한 영향을 제외하고는 열전달특성에 미치는 영향이 명확하게 나타나지 않고 있으며, 간극의 효과도 점차적으로 감소하고 있다.

Fig.9는 전열면이 $H/W=4$ 인 위치에 설치된 경우로서 Fig.8의 $H/W=2$ 인 경우와 유사한 Nusselt수 분포를 나타내고 있다.

Fig.10은 전열면이 포텐셜코어 영역인 $H/W=2$ 인 위치에 설치된 경우, 난류촉진체를 설치($C=2mm$)

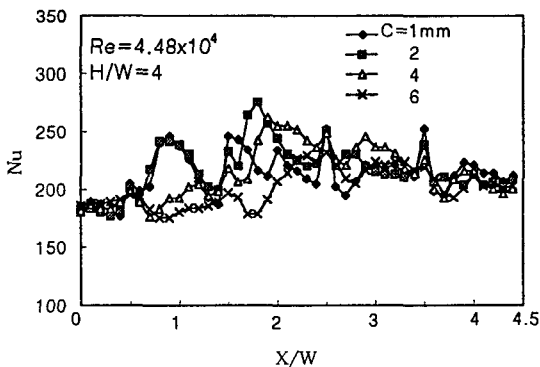


Fig.9 Distribution of local Nu on the flat plate with turbulence promoter

한 경우의 열전달특성을 난류촉진체를 설치하지 않은 경우($H/W=2$ 및 10)와 비교하여 나타낸 것이다. $H/W=2$ 인 경우에 난류촉진체를 설치하지 않은 전열면에 대한 열전달증진율을 살펴보면 국부적으로 난류촉진체의 직하점과 난류촉진체의 사이에서 2배에 가까운 높은 열전달증진율을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 $H/W=2$ 인 경우에 난류촉진체를 설치하므로서, $X/W \geq 0.9$ 인 영역에서 난류촉진체를 설치하지 않았을 때 열전달효과가 최대로 되는 $H/W=10$ 의 경우보다도 열전달효과는 크게 상승됨을 나타낸다.

Fig.11은 $C=6mm$ 인 경우를 Fig.10과 동일하게 나타낸 것으로서, $C=2mm$ 인 경우와 유사한 경향을 나타내지만, 간극이 증가함에 따라 열전달증진율은 떨어진다. 그러나 $X/W \geq 2$ 인 영역에서는 난류촉

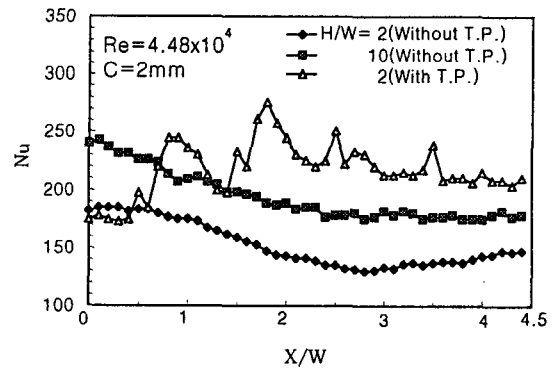


Fig.10 Comparison of local Nu on the flat plate with and without turbulence promoter

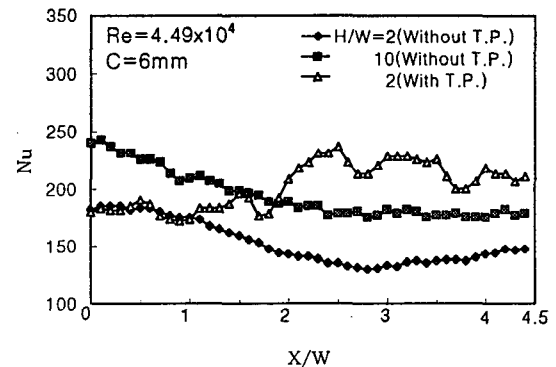


Fig.11 Comparison of local Nu on the flat plate with and without turbulence promoter

전체를 설치하지 않은 $H/W=10$ 의 경우보다 열전달효과는 좋게 나타난다.

Fig. 12는 간극이 2mm인 경우에 노즐출구의 유속변화에 따른 국부 Nusselt수의 분포를 나타낸 것이다. Re 가 증가하면 Nusselt수는 증가하며, 국부 Nusselt수 분포도 Re 에 관계없이 유사한 경향을 갖는다.

Fig.13은 $Re=4.48 \times 10^4$ 인 경우에 난류촉진체와 전열면간 간극을 파라미터로 하여 X/W 의 변화에 따른 국부평균 Nusselt수의 변화를 나타낸 것이다.

$X/W \leq 2.5$ 인 영역에서는 간극 $C=2mm$, $X/W \geq 2.5$ 인 영역에서는 간극 $C=4mm$ 인 경우가 국부평균 Nusselt수의 값이 최대로 나타난다. 그리고 전열면 전체의 열전달효과는 $C=2mm$ 인 경우에 최대

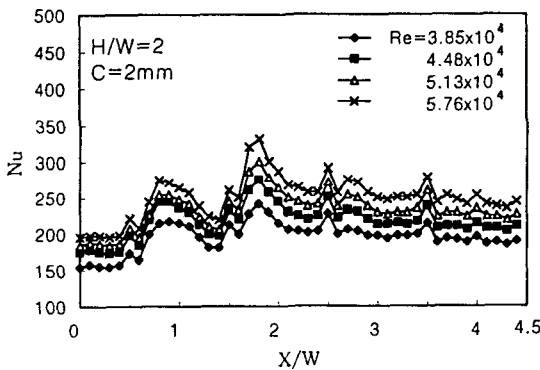


Fig.12 Distribution of local Nu on the flat plate with turbulence promoter

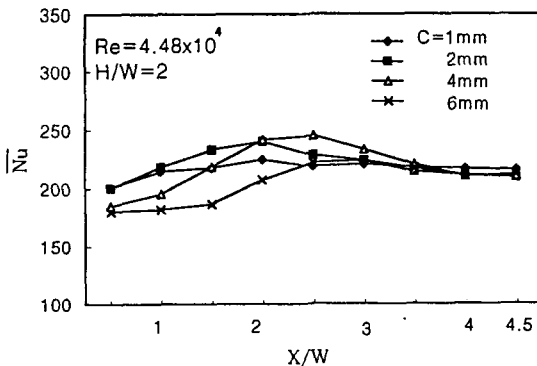


Fig.13 Distribution of local average Nu along the flat plate with turbulence promoter

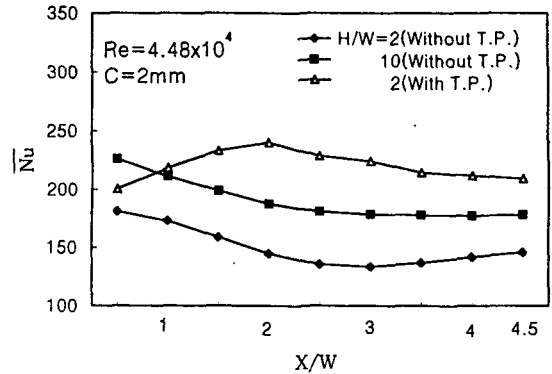


Fig.14 Comparison of local average Nu on the flat plate with and without turbulence promoter

가 된다.

Fig.14는 전열면이 포텐셜코어 영역인 $H/W=2$ 인 위치에 설치된 경우, 난류촉진체를 설치($C=2mm$)한 경우의 국부평균 Nusselt수를 난류촉진체를 설치하지 않은 경우($H/W=2$ 및 10)와 비교하여 나타낸 것이다. $H/W=2$ 인 경우에 난류촉진체를 설치하므로서 난류촉진체를 설치하지 않은 경우보다 국부평균 Nusselt수가 크게 나타났으며, 전열면 전체의 열전달증진율은 42.4% 향상된다. 또한 난류촉진체를 설치하지 않은 경우에 열전달효과가 최대로 되는 $H/W=10$ 인 경우와 비교하여도 정체점 근방을 제외하고는 열전달효과가 크게 나타나며, $H/W=2$, $C=2mm$ 인 경우, 난류촉진체를 설치하지 않은 $H/W=10$ 인 경우보다도 전열면 전체의 열전달효과는 12% 증진된다.

4. 결론

2차원 층돌공기분류계에서 평판전열면을 포텐셜코어 영역내인 $H/W=2$ 인 위치에 설치한 경우, 열전달증진을 위하여 전열면전방에 간극이 1, 2, 4, 6mm 떨어진 위치에 피치가 50mm, 직경이 4mm인 원형의 난류촉진체군을 설치하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 난류촉진체를 설치하지 않은 평판전열면에서 열전달계수가 급격하게 감소하는 영역에서도 난류촉진체군을 설치하므로서 높은 열전달계수를 얻

을 수 있다.

(2) 유동의 가시화로부터 난류축진체 직전 및 직후에서 흐름의 박리가, 그리고 두 난류축진체사이에서 흐름의 재부착 및 난류축진체 후미의 와류에 의한 경계층의 교란효과를 확인할 수 있다.

(3) 전열면상에서 국부평균 열전달계수가 최대로 되는 위치는 $X/W=2\sim3$ 이다.

(4) 최대 열전달효과는 $H/W=2$, $C=2\text{mm}$ 에서 나타나며, 이때의 열전달증진율은 난류축진체군을 설치하지 않은 $H/W=2$ 인 경우와 비교하여 42.2% 증진한다.

(5) 열전달계수의 분포는 Reynolds수의 변화에 관계없이 동일한 분포형상을 갖는다.

(6) 포텐셜 코어 영역내($H/W=2$)에 난류축진체를 설치한 경우에는, 난류축진체를 설치하지 않은 경우 열전달효과가 최대로 되는 $H/W=10$ 인 경우와 비교하여도 12% 높은 열전달효과를 얻을 수 있기 때문에 난류축진체의 설치에 의한 충돌분류계의 소형화를 꾀할 수 있다.

후 기

본 연구는 유한학술연구비 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. F.F., Cadek and R.D., Zerkle, 1974, "Local heat transfer characteristics of two-dimensional impinging air jets- theory and experiment," Proc. of 5th Int. Heat Transfer Conference, Fc 1.4, pp. 15~19.
2. K., Kataoka, 1990, "Impingement heat transfer augmentation due to large scale eddies," Proc. 9th Int. Heat Transfer Conference, Vol. 1, KN-15, pp. 255~273.
3. H., Martin, 1977, Advanced in Heat Transfer, Vol. 13, pp. 1~60, Academic Press, New York.
4. M. M. Ali Khan, 1980, "Heat transfer augmentation in impinging jet system," Ph. D. Thesis, University of Tokyo.
5. Richard C. Chu, 1986, "Heat transfer in electronic system" Proc. 8th Int. Heat Transfer Conference, Vol. 1, pp. 293~305.
6. R. Gardon and J.C., Akfirat, 1966, "Heat transfer characteristics of impinging two-dimensional air jets," J. of the ASME, Vol. 88, pp. 101~108.
7. A.E., Bergles, 1978, "Enhancement of heat transfer," Proc. 6th Int. Heat Transfer Conference, Vol. 6, pp. 89~108.
8. R.L., Webb, E.R.G., Eckert and R.J., Goldstein, 1971, "Heat transfer and friction in tubes with repeated-rib roughness," Int. Heat Mass Transfer, Vol. 14, pp. 601~617.
9. D.L., Gee and R.L., Webb, 1980, "Forced convection heat transfer in helically rib-roughened tubes," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 23, pp. 1127~1136.
10. 藤田秀臣, 高兵平七郎, 山下亮一, 1976, "壁面近方におかれた二次元圓柱が平板強制對流熱傳達におよぼす影響," 日本機械學會 論文集(第2部), 42卷 361號, pp. 2828~2836.
11. 藤田秀臣, 高兵平七郎, 浴壽美, 1981, "壁面近方におかれ二次元圓柱が平板強制對流熱傳達におよぼす影響," 日本機械學會 論文集(B編), 47卷, 414號, pp. 317~325.
12. 相場眞也, 土田一, 東海林博美, 佐木了, 1985, "壁近方におかれた圓管まわりの熱傳達," 日本機械學會 論文集(B編), 51卷, 463號, pp. 866~873.
13. 李龍和, 金相弼, 徐正閔, 1991, "平板傳熱面に衝突하는 2次元 噴流系の 熱傳達特性에 關한 研究," 空氣調和 冷凍工學 論文集, 第 3卷 第 1號, pp. 61~68.
14. M., Gad-el-Hak, 1988, "Visualization techniques for unsteady flows: an overview," J. of Fluids Engineering, Trans. ASME, Vol. 110, pp. 231~243.