

충돌제트계에서 사다리형 로드 배열에 의한 열전달촉진에 관한 연구

임태수*, 금성민**

Heat Transfer Enhancement by Trapezoid Rod Array in Impinging Jet System

Tae-Su Lim, Sung-Min Kum

Key words: Impinging jet(충돌제트), Trapezoid rod(사다리형 로드), Turbulence promoter(난류촉진체), Clearance(간극)

Abstract

The objective of this study was to investigate the characteristics of jet flow and heat transfer caused by trapezoid rods array in impinging jet system. In this study, trapezoid rods have been set up in front of flat plate to serve as a turbulence promoter. The bottom width of trapezoid rod was $W=4, 8\text{mm}$ and oblique angle were 80° . The space from rods to the heating surface was $C=1, 2, 4\text{mm}$, the pitch between each rods was $P=30, 40, 50\text{mm}$, and the distance from nozzle exit to flat plate was $H=100, 500\text{mm}$. This results were compared with the case without trapezoid rods.

As a result, when rods are installed in front of the impinging plate, the acceleration of the jet flow and the eddies due to the rods seem to contribute to the heat transfer enhancement. Among test conditions, the heat transfer performance was best for the condition of $W=8\text{mm}$, $C=1\text{mm}$, $P=30\text{mm}$ and $H/B=10$. The maximum heat transfer rate is about 1.9 times larger than that without trapezoid rods

기호설명

A	: 전열면적 [m^2]
h	: 열전달계수 [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$]
I	: 전열면에 공급되는 전류
k	: 열전도 계수 [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$]
q	: 열유속 [W/m^2]
T_w	: 전열면의 온도 [$^\circ\text{C}$]
T_∞	: 공기온도 [$^\circ\text{C}$]
U	: 노즐 출구 속도 [m/s]
U_s	: 분류중심선 평균속도 [m/s]
$\sqrt{u^2}/U$: 노즐출구의 난류강도
W	: 로드의 밑면 폭 [mm]

하첨자

f	: 로드가 없는 경우
r	: 로드가 있는 경우

1. 서론

충돌제트시스템은 동력원의 용량이 비교적 작고 유량제어를 통한 열 및 물질전달의 조정이 용이하기 때문에 건조분야나 제철 및 금속의 열처리와 전자부품의 냉각 등에 널리 이용되고 있다.

충돌제트에 대한 기초적 실험은 Garden 등⁽¹⁾이 후 지금까지 꾸준히 연구되어 왔다. Garden 등⁽¹⁾은 충돌 공기제트 실험에서 노즐출구로부터 노즐출구폭의 약 8~10배 되는 위치에 평판전열면을 설치할 때, 주위 정지유체와의 혼합작용에 의해 생성된 와류 때문에 열전달계수는 정체점에서

* 인하대학교 산업대학원

** 한라대학교 기계공학부

최대가 되며 벽면제트영역으로 진행하면서 감소한다고 발표하였다.

이와같이 정체점의 열전달계수가 노즐출구폭의 8~10배 되는 위치에서 최대가 되는 원인을 초기에는 난류성분에 의한 것으로 추정하였으며^(1), 2), Choi⁽³⁾는 2차원 충돌공기분류의 가시화 실험에서 정체점 부근의 유동형태는 불규칙적으로 발생하는 와류에 의한 것임을 확인하였고, Kim⁽⁴⁾도 2차원 충돌 공기분류 열전달에서 와류의 존재를 확인하였다.

따라서 일련의 연구 결과들을 종합해 보면 정체점에서의 열전달증진 원인은 주로 와류가 전열면의 온도경계층을 박막화시키기 때문이며, 와류의 생성은 노즐출구로부터 전열면까지의 거리에 좌우됨을 알 수 있다.

그러나 충돌제트에서는 정체점 이후 벽면제트영역으로 진행할수록 제트의 속도감소와 온도경계층의 발달로 전열특성은 정체점에 비해 상대적으로 낮아지기 때문에 벽면제트영역에서의 열전달 증진에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.

벽면제트영역에서 열전달성능을 향상시키기 위해 노즐과 전열면사이에 다공관을 설치하는 방법⁽⁵⁾, 전열면의 형상을 곡면⁽⁶⁾ 또는 파형면으로 제작하여 전열면적을 확대시키는 방법⁽⁴⁾ 등 많은 연구들이 발표되었다.

최근에는 전열면전방에 난류촉진체를 설치하여 열전달성능을 향상시키는 방법이 주목을 받고 있다. Lee⁽⁷⁾는 전열면 앞에 원형단면의 난류촉진체를 설치하고 난류촉진체의 직경, 피치, 전열면간의 간극을 변화시켜 벽면제트영역에서 기존 방식에 비해 국부적으로 약 2배의 열전달증진 효과를 얻었으며, 간극이 작을수록 열전달증진이 우수함을 실험적으로 규명하였다.

Kum 등⁽⁸⁾은 사각로드를 전열면 앞에 설치한 후 로드와 전열면사이의 간극을 변화시키면서 실험한 결과 벽면제트영역에서도 높은 열전달율을 확보할 수 있었으며, 로드가 없는 경우와 비교하여 평균 약 1.35배 정도의 열전달 증진효과를 얻었다. 이것은 주로 로드직전에서의 와류 및 로드 밑에서 분류의 가속효과에 의한 것으로 보고하고 있다.

지금까지의 연구결과들을 요약하면 충돌영역에서 정체점의 열전달성능은 와류에 의해서 지배되며, 벽면제트 영역에서의 열전달성능은 노즐출구

속도, 노즐출구로부터 충돌판까지의 거리 등에 따라 다소의 차이가 있지만, 분류의 재부착 및 박리, 난류강도 등에 의해 좌우되고, 로드를 설치할 경우에는 로드에 의한 난류발생 및 재부착, 로드 측면에서의 와류발생, 로드와 전열면사이의 간극에 의한 유체의 가속 등에 의해 벽면제트영역의 열전달성능이 향상되기 때문에 로드의 형상 및 설치조건이 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 지금까지의 로드 형태와는 다른 사다리형 로드를 고안하였는데, 이 사다리형 로드는 밑면 폭(W)과 높이가 각각 4, 8mm, 길이 500mm, 측면경사각이 80°인 2종류이다. 이들 로드를 평판전열면 앞에 설치한 후, 로드의 피치(P=30, 40, 50mm), 노즐출구와 전열면 사이의 거리(H=100, 500mm) 및 로드와 전열면 사이의 간극(C=1, 2, 4mm)을 변화시키면서 이때의 유동특성과 열전달특성을 실험적으로 규명하고 로드를 설치하지 않은 평판의 경우와 비교하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 공기는 원심식 송풍기에서 보내지며 유량은 유량조절 밸브에 의해 조절되고 와이어 메쉬와 디퓨저를 지나 하니컴과 세틀링 챔버에 의해 균일화되면서 노즐을 통해 분출된다. 또한 제트가 2차원이 되도록 유로 상하면에는 평행판을 설치하였으며 충돌판은 전후 이동이 가능하도록 하였다. 노즐의 형상은 입구폭 250mm, 출구폭 50mm, 높이 500mm, 길이 300mm인 sine곡선형의 사각노즐이다.

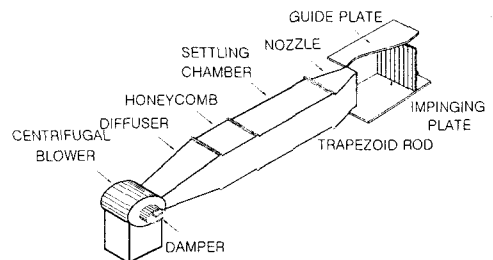


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2는 평판 전열면 앞에 사다리형 로드 배열한 경우의 좌표계로서 로드폭을 W, 로드와 전열면사이의 간극을 C, 로드사이의 피치를 P, 노즐출구폭을 B, 노즐높이를 L, 평판의 정체점(stagnation point)으로 부터 노즐출구폭 방향의 거리를 X, 노즐출구로 부터 전열면까지의 거리를 H로 하여 X와 H를 각각 X/B, H/B의 무차원화 하였으며, 노즐중심은 전열면 중앙부에 인접한 두개 로드사이의 중심선과 일치하도록 하였다.

전열면의 온도측정은 스테인레스 박판 뒷면에

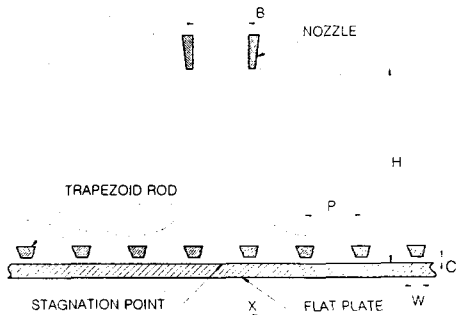


Fig. 2 Impinging flat plate-trapezoid rods array system (top view)

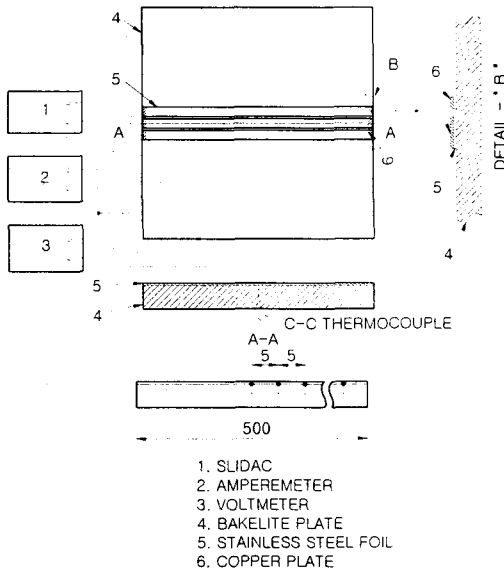


Fig. 3 Detail diagram of heating apparatus

직경 0.127mm의 열전대(T-type, Omega) 40개를 정체점으로부터 5mm 간격으로 부착하여 데이터 취득장치(Fluke Co., Helios I)에 연결하고, 전열면이 정상상태에 도달한 것을 확인한 후, 5초 간격으로 반복하여 평균온도를 얻었다. 온도측정은 자유제트의 유속측정으로 부터 좌우 대칭성을 확인했기 때문에 정체점으로 부터 한방향으로만 측정하였다.

Fig. 3은 전열면의 형상을 나타낸 것으로 베클라이트판(500×500×20mm)에 스테인레스 박판(길이 500mm, 폭 10mm, 두께 0.03mm) 3매를 접착제로 부착하고 단면 B-B와 같이 동판으로 연결하였다. 전열면 가열은 $Q=1020W/m^2$ 의 등열유속 조건으로 통전 가열하였으며, 이때 열유속은 식(1)과 같이 회로내 전류계의 전류와 스테인레스박판 양단 전위차의 곱으로 구하였다.

그리고 국부열전달계수 (h), 국부Nusselt수 (Nu), 국부평균Nusselt수 (\bar{Nu})는 다음과 같이 계산하였다.

$$q = I \cdot \frac{V}{A} \quad (1)$$

$$h = \left(\frac{q}{T_w - T_\infty} \right) \quad (2)$$

$$Nu = h \cdot B / k \quad (3)$$

$$\bar{Nu} = \int_{-x}^x Nu \cdot dx / \int_{-x}^x dx \quad (4)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 자유제트의 속도와 난류강도

Fig. 4는 노즐출구속도(U)가 18m/s일 때 제트중심축상에서의 속도와 노즐출구 속도와의 비(U_s/U) 및 난류강도와 노즐출구 속도와의 비($\sqrt{u^2}/U$)를 나타낸 것이다. 제트 중심속도 U_s 가 U 의 98%에 해당되는 지점까지의 거리를 포텐셜코어 영역이라고 정의할 때⁽⁹⁾ 본 실험범위에서의 포텐셜코어 영역은 노즐출구폭의 6배($H/B=6$)되는 위치까지로 판단되며, 포텐셜코어 영역을 벗어난 영역인 $H/B=10, 14$ 에서 U_s 는 점차 감소하기 시작한다. 그리고 난류강도는 포텐셜코어 영역에서부터 증가하기 시작하여

H/B=10에서 최대가 된후 다시 감소하는데 이것은 H/B=10에서 주위유체와의 혼합작용이 가장 활발하기 때문이다.

따라서 본 실험범위내에서 난류강도가 최소가 되는 위치는 H/B=2이며 최대가 되는 위치는 H/B=10으로 본 연구의 열전달실험은 H/B=2와 10에서 수행하였고, 실험 데이터의 신뢰성을 검증하기 위해 로드를 설치하지 않은 평판에서 $U=18\text{m/s}$, H/B=10인 조건에서의 평균 Nu_r 을 Lee⁽⁵⁾와 비교한 결과 약 4% 정도의 차이를 보였다.

3.2 로드를 설치하지 않은 경우의 열전달특성

Fig. 5는 로드를 설치하지 않은 평판 전열면에 제트가 충돌할 때, 속도 U 변화에 따른 정체점에서의 열전달특성을 나타낸 것으로 정체점에서의

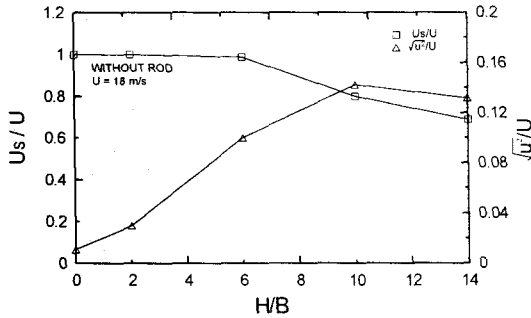


Fig. 4 Mean velocity and turbulent intensity profiles along the free jet centerline at $U=18\text{m/s}$

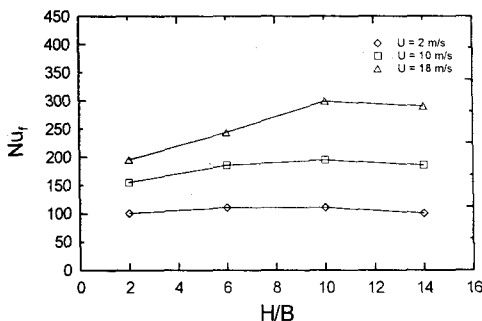


Fig. 5 Variation of stagnation point Nu as a function of H/B for various velocities

Nu_r 는 H/B가 증가함에 따라 서서히 증가하기 시작하여 H/B=10에서 최대가 된후 다시 감소한다. Nu_r 가 노즐출구속도 변화에 관계없이 H/B=10에서 최대가 되는 것은 제트가 전열면에 충돌하기 전에 주위유체와의 혼합작용이 충분히 이루어져 난류강도가 증가되었기 때문이다^(7, 8) 노즐형상변화에 따라 약간의 차이는 있지만 최대 열전달계수를 얻을 수 있는 위치는 천이영역(노즐출구폭의 약 6~12배 위치)이라는 것이 많은 연구결과^(4, 7, 8)에서 밝혀진 바 있다.

Fig. 6은 $U=2, 18\text{m/s}$ 일 때 H/B=2와 10 조건에서 정체점으로 부터 X방향의 Nu_r 를 나타낸 것이다. 전체적으로 Nu_r 는 정체점 이후 X방향으로 진행할수록 감소하고 있는데, 이것은 경계층이 성장하고 제트가 벽면제트영역으로 진행하면서 유속이 감소하며 분류가 확산하기 때문이다.

각각의 속도에 대해 H/B별 Nu_r 의 특성을 살펴보면 포텐셜코어 영역인 H/B=2에서 가장 낮은 Nu_r 값을 갖는다. 이것은 H/B=2에서는 제트가 충돌판에 충돌하기 전에 주위 정지유체와의 혼합작용이 충분하지 않기 때문이다. 그리고, $U=18\text{m/s}$, H/B=2 조건에서 제트가 벽면을 따라 진행하면서 Nu_r 는 정체점 이후 감소하다가 $X/B=2.5$ 부근에서 다시 증가하기 시작한다. 이것은 노즐 양끝에서 생성된 와류가 성장하여 $X/B=2.5$ 부근에서 전열면상의 경계층을 교란시키기 때문이라는 것이 기존 연구에 의해 밝혀진 바 있다.^(3, 7)

이상과 같이 로드를 설치하지 않은 평판 전열면에서 2차원 제트의 유동특성 및 열전달특성에 대하여 고찰한 결과, 제트가 평판에 충돌할 경우

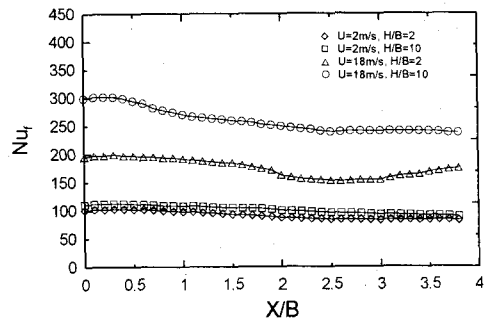


Fig. 6 Distribution of local Nu on the flat plate as a function of X/B for various velocities and H/B

Nu_r 는 정체점 이후 X방향으로 계속 감소하며, 포텐셜코어 영역내에 충돌판이 설치되더라도 $X/B=2.5$ 부근에서의 재상승 경향은 있지만 Nu_r 는 정체점보다 상대적으로 낮다. 따라서 충돌제트계의 열전달 증진의 한 방법으로 벽면제트영역내의 열전달을 증진시키는 방안이 모색되어져야 한다고 생각한다.

3.3 로드를 설치한 경우의 열전달특성

3.3.1 로드와 전열면사이의 간극변화에 따른 열전달 특성

Fig. 7은 로드폭(W)이 4mm이고, 노즐출구 속도(U)가 18m/s, 로드와 로드사이의 피치(P)가 30mm이고 충돌판의 위치가 노즐출구폭의 10배($H/B=10$)인 조건에서 로드와 전열면 사이의 간

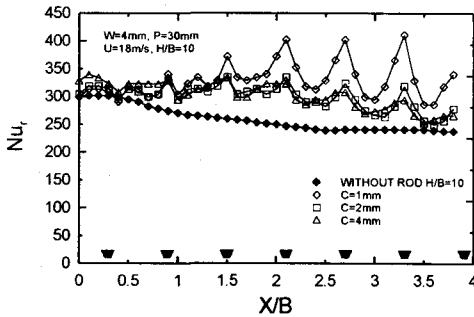


Fig. 7 Distribution of local Nu_r as a function of X/B for various clearances ($W=4\text{mm}$, $P=30\text{mm}$)

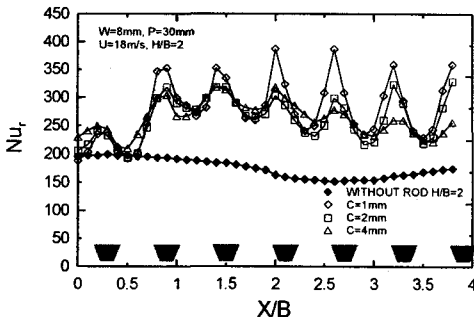


Fig. 8 Distribution of local Nu_r as a function of X/B for various clearances ($W=8\text{mm}$, $P=30\text{mm}$)

극(C) 변화에 따른 Nu_r 분포를 나타낸 것으로 로드가 없는 평판과 비교하여 정체점부근을 제외한 전영역에서 C변화와 관계없이 높은 값을 가지고 있다. C변화와 관계없이 Nu_r 은 X방향으로 진행하면서 공통적으로 로드와 로드사이에서 감소하다 점차 증가하여 로드 밑에서 피크를 나타낸 후 다시 감소와 증가를 반복하는 현상을 나타낸다.

Webb 등⁽⁹⁾에 의하면 P/D (리브의 피치/리브의 직경 혹은 높이)=6인 경우에는 리브를 타고 넘은 자유유동이 바닥면에 재부착하며, $P/D>10$ 인 조건에서는 리브를 타고 넘은 자유유동이 바닥면에 재부착한 후 경계층을 형성한다고 하였다. 또한 리브의 정상에서는 박리현상이 생기고 재부착점은 리브의 형상에 따라 박리점으로부터 리브 높이의 약 6~8배 정도의 위치에 생기며 재부착점에서부터 경계층이 성장하기 시작한다고 발표하였다.

Fig. 7에서 로드와 로드사이에서 Nu_r 이 감소하다 다시 증가하는 분포가 연속적으로 일어나는데, 특히 감소 후 다시 증가하는 현상은 로드를 타고 넘어오는 제트가 로드와 로드사이에서 재부착하면서 로드 밑을 빠져나오는 제트를 다시 전열면으로 흐르도록 유도하기 때문으로 생각된다. 간격 C변화와 관계없이 로드직후에서 Nu_r 이 급격하게 낮아지는 것은 제트가 로드 바로 밑을 지나면서 전열면에서 이탈하는 박리현상^(7, 8) 때문이다. 특히 각각의 C에 대해 로드 밑에서 Nu_r 이 피크를 이루는데, 이것은 로드 밑에서 가속에 의한 영향으로 생각되며 C가 작을수록 이와같은 현상은 두드러지게 나타난다.

또한 X방향으로 진행할수록 열전달성능이 점차적으로 낮아지는데, 이것은 경계층이 성장하고, 제트의 확산과 로드와 로드사이에서 저항으로 운동량이 감소하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 8은 $W=8\text{mm}$, $U=18\text{m/s}$, $P=30\text{mm}$, $H/B=2$ 일 때, C변화에 대한 Nu_r 분포를 나타낸 것으로 전체적인 경향은 Fig. 7과 유사하다.

그러나 벽면제트영역에서 Nu_r 이 피크를 나타내는 위치를 살펴보면 $W=4\text{mm}$ 일때는 로드 밑에서 나타났으나 $W=8\text{mm}$ 일때는 로드 밑보다는 로드 직전에서 보다 높게 나타난다. 이것은 로드 직전에서 발생하는 와류⁽⁸⁾에 의한 영향으로 보인다.

지금까지 간격 C변화에 대한 영향을 살펴보면

로드의 밑폭 W변화와 관계없이 C=1mm일 때 열전달 성능이 가장 좋다.

3.3.2 로드 폭과 피치변화에 따른 열전달특성

Fig. 9는 $U=18\text{m/s}$, $P=30\text{mm}$, $C=1\text{mm}$, $H/B=2$ 인 조건에서 $W=4, 8\text{mm}$ 에 대한 X방향의 Nu_r 분포를 나타낸 것이다. $W=8\text{mm}$ 일 때 전 영역에서 $W=4\text{mm}$ 인 조건보다 열전달성능이 높게 나타나고 있다. 특히 $W=4\text{mm}$ 인 경우에는 로드 밑부분에서 Nu_r 이 높게 나타나는 반면 $W=8\text{mm}$ 에서는 로드 밑부분보다 로드직전 위치에서 더 높게 나타나는데 이것은 로드직전에서 발생하는 와류 영향때문이며, 이 와류발생은 로드의 높이와 관계가 있는 것으로 판단된다. 그리고 $W=4\text{mm}$ 인 경우 두번째 로드와 세번째 로드사이($X/B=1$ 부근)에서 Nu_r 이 감소와 증가를 반복하고 있다.

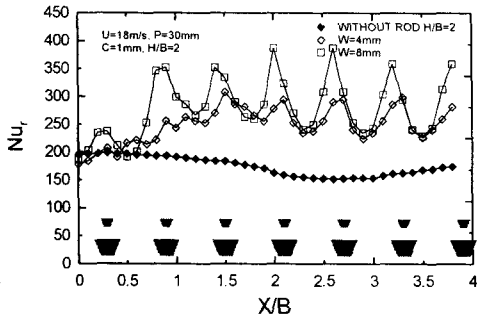


Fig. 9 Distribution of local Nu_r as a function of X/B for various width ($P=30\text{mm}$, $H/B=2$)

이것은 제트가 전열면에 완전히 재부착한 결과라고 생각되며 $W=8\text{mm}$ 에서는 이러한 현상은 나타나지 않는다.

Fig. 10은 $H/B=10$ 인 조건으로 전체적인 경향은 $H/B=2$ 와 유사하나 열전달 증진율면에서 보면 로드가 없는 경우와 비교할 때 $H/B=2$ 에서의 열전달 증진을 보다는 낮다

이것은 $H/B=10$ 인 경우에는 제트의 난류강도가 감소하는 단계에서 충돌하므로써 로드 에 의한 영향이 크지않은 반면, $H/B=2$ 에서는 난류강도가 충분히 발달하지 않은 상태에서 충돌하지만 벽면 제트영역으로 진행하면서 로드 에 의한 영향을 받아 난류강도가 증가하기 때문에 로드를 설치하지 않은 평판에 비해 열전달 증진율은 크게 향상된다.

그리고 $W=4\text{mm}$ 인 경우 제트가 완전히 재부

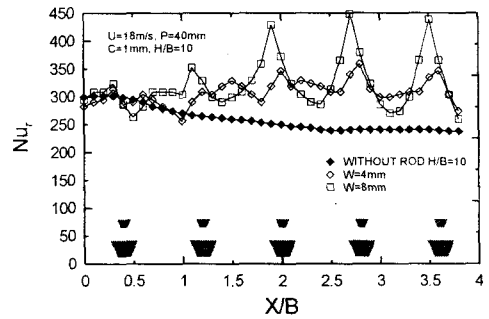


Fig. 11 Distribution of local Nu_r as a function of X/B for various width ($P=40\text{mm}$, $H/B=10$)

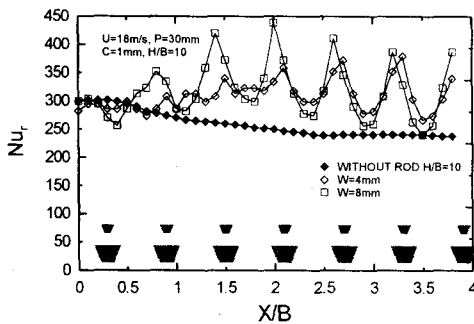


Fig. 10 Distribution of local Nu_r as a function of X/B for various width ($P=30\text{mm}$, $H/B=10$)

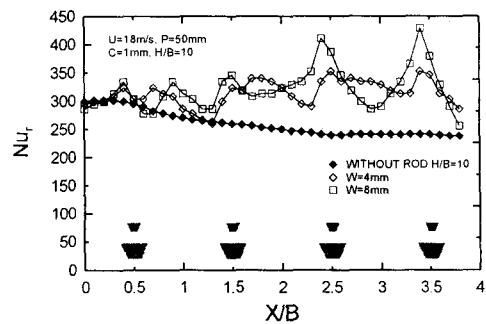


Fig. 12 Distribution of local Nu_r as a function of X/B for various width ($P=50\text{mm}$, $H/B=10$)

착하는 지점은 세번째와 네번째 로드사이 ($X/B=1.5\sim 2$ 부근)에서도 나타난다.

Fig. 11은 $U=18\text{m/s}$, $P=40\text{mm}$, $C=1\text{mm}$, $H/B=10$ 인 조건으로 $P=30\text{mm}$ 일 때와 마찬가지로 로드와 로드사이에서 Nu_r 은 감소와 증가를 반복한다. 제트가 완전히 재부착하는 지점을 비교해보면 $W=4\text{mm}$ 인 경우, 세번째와 네번째 로드사이 ($X/B=2.5$ 부근)에서도 나타나며 특히 $W=8\text{mm}$ 인 경우 첫 번째 로드와 두 번째 로드사이에서 이 현상을 볼 수 있다.

그리고, $W=4\text{mm}$ 인 경우 제트가 완전히 재부착하는 지점에서의 열전달성능은 $W=8\text{mm}$ 일 때보다 오히려 높게 나타난다.

Fig. 12는 $U=18\text{m/s}$, $P=50\text{mm}$, $C=1\text{mm}$, $H/B=10$ 인 경우로 $W=8\text{mm}$ 일 때 Nu_r 이 피크를 나타내는 지점은 로드 직전이며 이와 같은 경향은 $P=30, 40\text{mm}$ 인 결과와 동일하다.

지금까지 로드의 W 와 P 변화가 열전달성능에 미치는 영향을 살펴본 결과 본 실험범위내에서는 W 가 크고 P 가 작을수록 열전달성능은 우수하다.

이것은 $P=30\text{mm}$ 일 때가 $P=40, 50\text{mm}$ 일 때보다 로드의 개수가 상대적으로 많기 때문이며 W 가 클수록 와류 발생이 용이하고 가속되는 길이가 길어지므로 판단된다.

Fig. 13은 $U=18\text{m/s}$, $P=30\text{mm}$, $C=1\text{mm}$, $H/B=2$ 이고, W 가 4, 8mm로 변화될 때 로드를 설치하지 않은 경우의 평균 Nu_r 와 로드를 설치한 경우의 평균 Nu_r 의 비를 나타낸 것이다.

$W=8\text{mm}$ 일 때 $X/B=3$ 부근에서 로드가 없는 평판에 비해 약 1.9배정도의 열전달 증진율을 보이고 있다.

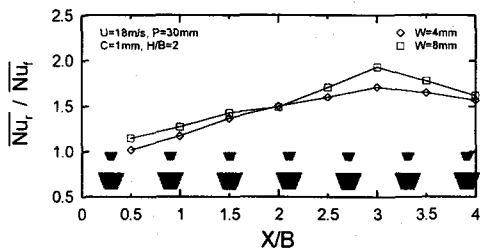


Fig. 13 Comparison of average local Nu on the flat plate with and without rods for various width ($P=30\text{mm}$, $H/B=2$)

4. 결론

본 연구는 2차원 충돌공기제트계에서 열전달증진을 목적으로 전열면 전방에 로드의 폭(W)이 각각 4, 8mm인 사다리형 로드를 설치하고 로드와 전열면사이의 간극($C=1, 2, 4\text{mm}$), 로드와 로드사이의 피치($P=30, 40, 50\text{mm}$), 노즐출구와 전열면사이의 거리($H/B=2, 10$)를 변화시키면서 열전달 특성을 실험적으로 규명하고, 로드를 설치하지 않은 평판의 경우와 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 로드를 설치하지 않은 경우에는 정체점 이후 Nu_r 가 계속적으로 감소하지만, 로드를 설치할 경우에는 로드측면에서의 와류발생, 유체의 가속 및 재부착 등에 의해서 정체점보다 높은 Nu_r 을 얻을 수 있으며 국부적으로는 로드를 설치하지 않은 평판보다 최대 약 1.9배의 국부 열전달 증진율이 나타났다.

(2) 로드와 전열면사이의 간극은 작을수록 열전달 성능은 좋아진다.

(3) 로드의 폭과 피치를 변화시킨 경우 폭은 8mm, 피치는 30mm일 때 열전달 성능이 가장 좋게 나타났다.

참고문헌

- (1) Gardon, R. and Akfirat, J. C., 1965, "The role of turbulence in determining the heat-transfer characteristics of impinging jets," *Int. J. Heat and Mass Transfer*. Vol. 8, pp. 1261-1272.
- (2) Gardon, R. and Akfirat, J. C., 1966, "Heat Transfer Characteristics of Impinging Two-Dimensional Air Jets," *ASME J. Heat Transfer*. Vol. 88, pp. 101-108.
- (3) Choi, D. S., 1992, "Heat transfer augmentation in two-dimensional impinging jet system by turbulence promoter," MS. thesis, Inha University, Incheon, Korea.
- (4) Kim, S. P., 1982, "An experimental study on the augmentation of heat transfer by impinging air jets," Ph.D. thesis, Inha University, Incheon, Korea.
- (5) Kum, S. M., Jung, D. S., and Kim, J. B.,

- 1998, "Study on the heat transfer enhancement by mesh," *Transaction of KSME*, Vol. 22, No. 5, pp. 716-724.
- (6) Choi, M. S., Yoo, H. S., Yang, G. Y., Lee, J. S. and Sohn, D. K., 2000, "Measurements of impinging jet flow and heat transfer on a semi-circular concave surface," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 1811-1822.
- (7) Lee, Y. H., 1989, "Heat transfer augmentation in 2-dimensional impinging air jet system," Ph.D. thesis, Inha University, Incheon, Korea.
- (8) Kum, S. M., Gawaguchi, Y. and Seo, J. Y., 1995, "A study on heat transfer enhancement by a square-rod array in an impinging jet system," *Heat Transfer Japanese Research*, Vol. 24, No. 2, pp. 193-207.
- (9) Webb, R. L., Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J., 1971, "Heat transfer and friction in tubes with repeated-rib roughness," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 14, pp. 601-617.