

## 충돌제트계에서 사다리형 로드 배열에 의한 열전달 및 유동특성

김 성 민<sup>†</sup>

한라대학교 기계공학부

### Heat Transfer and Flow Characteristics by Trapezoid Rod Array in Impinging Jet System

Sung-Min Kum<sup>†</sup>

Department of Mechanical Engineering, Halla University, Wonju 220-712, Korea

(Received June 21, 2001; revision received August 17, 2001)

**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  $W=4, 8$  mm and oblique angle were  $80^\circ$ . The space from rods to the heating surface was  $C=1, 2, 4$  mm, the pitch between each rods was  $P=30, 40, 50$  mm, and the distance from nozzle exit to flat plate was  $H=100, 500$  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  $W=8$  mm,  $C=1$  mm,  $P=30$  mm and  $H/B=10$ . The maximum heat transfer rate is about 1.9 times larger than that without trapezoid rods.

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

#### 기 호 설 명

$A$  : 전열면적 [ $m^2$ ]

$B$  : 노즐출구폭 [mm]

$C$  : 로드와 전열면 사이의 간극 [mm]

$h$  : 열전달계수 [ $W/m^2\cdot^\circ C$ ]

$H$  : 노즐출구로부터 전열면 사이의 거리 [mm]

$I$  : 전열면에 공급되는 전류

$k$  : 열전도계수 [ $W/m\cdot^\circ C$ ]

$Nu$  : Nusselt 수,  $h \cdot B/k$

$P$  : 로드와 로드 사이의 피치 [mm]

$q$  : 열유속 [ $W/m^2$ ]

$T_w$  : 전열면의 온도 [ $^\circ C$ ]

$T_\infty$  : 공기온도 [ $^\circ C$ ]

$U$  : 노즐출구속도 [m/s]

$U_s$  : 분류중심선 평균속도 [m/s]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-33-760-1217; fax: +82-33-760-1211

E-mail address: smkum@hit.halla.ac.kr

- $\sqrt{u^2}/U$  : 노즐출구의 난류강도
- $W$  : 로드의 밀면폭 [mm]
- $X$  : 정체점에서 노즐출구폭 방향거리 [mm]

**하첨자**

- $f$  : 로드가 없는 경우
- $r$  : 로드가 있는 경우

**1. 서 론**

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

일반적으로 노즐로부터 벽면에 충돌하는 제트의 유동장은 세부분으로 구분할 수 있다. 즉 노즐에서 분사되는 제트가 벽면의 영향을 받지 않는 자유제트영역(*free jet region*), 정체점을 포함하고 벽면의 순압력구배가 존재하여 유동이 가속되는 충돌영역(*impinging region*), 충류에서 난류 벽면제트로 발달되어 가는 벽면제트영역(*wall jet region*)으로 구별된다. 그러나 이와 같은 영역이 존재하는 구간이나 경계는 노즐의 형상이나 노즐출구 속도분포, 난류강도 등에 따라 차이가 있다.

충돌제트에 대한 기초적 실험은 Gardon et al.<sup>(1)</sup> 이후 지금까지 꾸준히 연구되어 왔다. Gardon et al.<sup>(1,2)</sup>은 충돌 공기제트 실험에서 노즐출구로부터 노즐출구폭의 약 8~10배 되는 위치에 평판전열면을 설치할 때, 주위 정지유체와의 혼합작용에 의해 생성된 와류 때문에 열전달계수는 정체점에서 최대가 되며 벽면제트영역으로 진행하면서 감소한다고 발표하였다.

이와 같이 정체점의 열전달계수가 노즐출구폭의 8~10배 되는 위치에서 최대가 되는 원인을 초기에는 난류성분에 의한 것으로 추정하였으며,<sup>(1,2)</sup> Choi<sup>(3)</sup>는 2차원 충돌공기분류의 가시화 실험에서 정체점 부근의 유동형태는 불규칙적으로 발생하는 와류에 의한 것임을 확인하였고, Kim<sup>(4)</sup>과 Lee<sup>(5)</sup>도 2차원 충돌 공기분류 열전달에서 와류의 존재를 확인하였다.

따라서 일련의 연구결과들을 종합해 보면 정체점에서의 열전달증진 원인은 주로 와류가 전열면

의 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 열전달증진에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.

벽면제트영역에서 열전달성능을 향상시키기 위해 노즐과 전열면 사이에 다공판을 설치하는 방법,<sup>(6)</sup> 전열면의 형상을 곡면<sup>(7)</sup> 또는 파형면으로 제작하여 전열면적을 확대시키는 방법,<sup>(4)</sup> 노즐에 *twisted tape* 등을 삽입하여 분류를 선회시키는 방법<sup>(8)</sup> 등 많은 연구들이 발표되었다.

최근에는 전열면 전방에 난류촉진체를 설치하여 열전달성능을 향상시키는 방법이 주목을 받고 있다. Lee<sup>(9)</sup>는 전열면 앞에 원형단면의 난류촉진체를 설치하고 난류촉진체의 직경, 피치, 전열면간의 간극을 변화시켜 벽면제트영역에서 기존방식에 비해 국부적으로 약 2배의 열전달증진 효과를 얻었으며, 간극이 작을수록 열전달증진이 우수함을 실험적으로 규명하였다.

Kum et al.<sup>(10)</sup>은 사각로드를 전열면 앞에 설치한 후 로드와 전열면 사이의 간극을 변화시키면서 실험한 결과 벽면제트영역에서도 높은 열전달률을 확보할 수 있었으며, 로드가 없는 경우와 비교하여 평균 약 1.35배 정도의 열전달증진 효과를 얻었다. 이것은 주로 로드 직전에서의 와류 및 로드 밑에서 분류의 가속효과에 의한 것으로 보고하고 있다.

Kim<sup>(11)</sup>은 벽면제트영역에서 로드 아래부분에서의 가속효과를 유지하면서 분류의 재부착을 용이하게 하기 위해 로드 윗부분은 원형이고 아래부분은 사각형태를 갖는 하이브리드형 로드를 전열면과 간극을 두고 설치하여 실험한 결과 벽면제트영역에서 열전달증진 효과가 있었으며 분류의 재부착을 위해서는 로드의 폭과 피치가 중요한 요소라고 발표하였다.

지금까지의 연구결과들을 요약하면 충돌영역에서 정체점의 열전달성능은 와류에 의해서 지배되며, 벽면제트영역에서의 열전달성능은 노즐출구 속도, 노즐출구로부터 충돌판까지의 거리 등에 따라 다소의 차이가 있지만, 분류의 재부착 및 박리, 난류강도 등에 의해 좌우되고, 로드를 설치할

경우에는 로드 에 의한 난류발생 및 재부착, 로드 측면에서의 와류발생, 로드와 전열면 사이의 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 밑면폭( $W$ )이 각각 4, 8 mm이고 측면 경사각이  $80^\circ$ 인 2종류이다. 이들 로드를 평판 전열면 앞에 설치한 후, 로드의 피치( $P=30, 40, 50$  mm), 노즐출구와 전열면 사이의 거리( $H=100, 500$  mm) 및 로드와 전열면 사이의 간극( $C=1, 2, 4$  mm)을 변화시키면서 이때의 유동특성과 열전달특성을 실험적으로 규명하였다. 또한 로드를 설치하지 않은 평판의 경우와 비교, 분석하고 동시에 기존의 원형 로드<sup>(9)</sup> 및 사각형 로드<sup>(10)</sup>의 연구결과와 비교함으로써 충돌제트시스템에서 로드를 이용한 열전달증진 기술에 중요한 기초적 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 공기는 원심식 송풍기에서 보내지며 유량은 유량조절 댐퍼에 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 축방향 및 폭방향으로 균일한 속도분포를 얻기

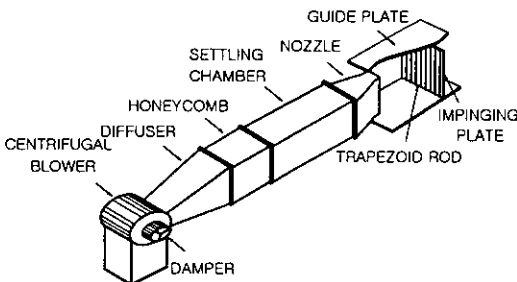


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

위해 입구폭 250 mm, 출구폭 50 mm, 높이 500 mm, 길이 300 mm인 sine 곡선형의 사각노즐로 제작하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 사다리형 로드의 형상을 나타낸다. 로드는 양쪽 측면이 경사진 사

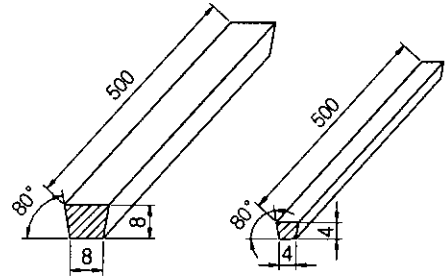


Fig. 2 Schematic of trapezoid rod (unit: mm).

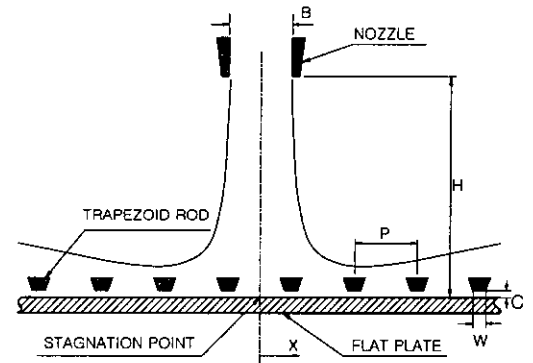


Fig. 3 Impinging flat plate-trapezoid rods array system (top view).

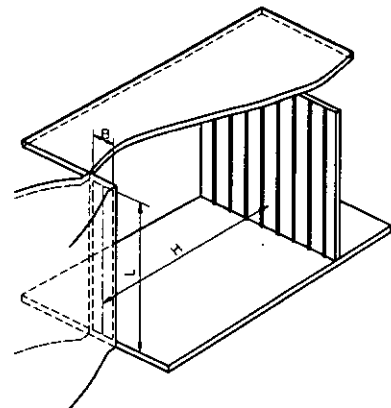


Fig. 4 Coordinate system of flat plate with rods (side view).

다리형으로서 로드 밑부분의 폭과 높이가 각각 4, 8 mm, 길이는 500 mm이며 측면 경사각은 80°이다.

Fig. 3, 4는 평판 전열면 앞에 사다리형 로드를 설치한 경우의 좌표계로서 로드폭을  $W$ , 로드와 전열면 사이의 간극을  $C$ , 로드 사이의 피치를  $P$ , 노즐출구폭을  $B$ , 노즐높이를  $L$ , 평판의 정체점(stagnation point)으로부터 노즐출구폭 방향의 거리를  $X$ , 노즐출구로부터 전열면까지의 거리를  $H$ 로 하여  $X$ 와  $H$ 를 각각  $X/B$ ,  $H/B$ 의 무차원화하였으며, 노즐 중심은 전열면 중앙부에 인접한 두 개 로드 사이의 중심선과 일치하도록 하였다.

전열면의 온도측정은 스테인레스 박판 뒷면에 직경 0.127 mm의 열전대(T-type, Omega) 40개를 정체점으로부터 5 mm 간격으로 부착하여 데이터 취득장치(Fluke Co., Helios I)에 연결하고, 전열면이 정상상태에 도달한 것을 확인한 후, 5 초 간격으로 반복하여 평균 온도를 얻었다. 온도측정은 자유제트의 유속측정으로부터 좌우 대칭성을 확인했기 때문에 정체점으로부터 한 방향으로만 측정하였는데, 공기의 온도범위는  $19 \pm 1^\circ\text{C}$ 였으며 사용된 물성치는 참고문헌<sup>(12)</sup>을 이용하였다.

Fig. 5는 전열면의 형상을 나타낸 것으로 베클라이트판(500×500×20 mm)에 스테인레스 박판(길이 500 mm, 폭 10 mm, 두께 0.03 mm) 3매를 접

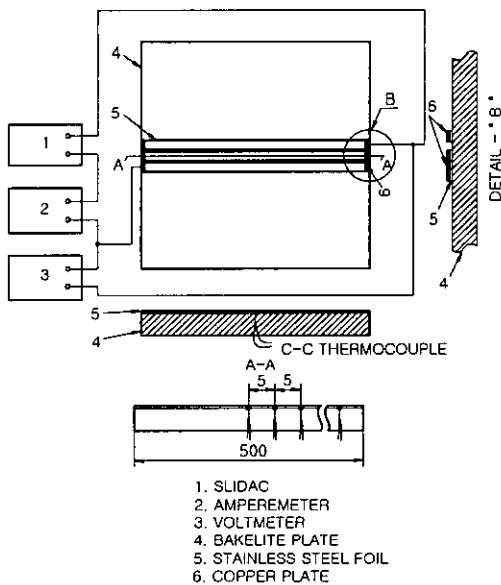


Fig. 5 Detail diagram of heating apparatus.

착제로 부착하고 단면 B-B와 같이 동판으로 연결하였다. 전열면 가열은  $q=1,020 \text{ W/m}^2$ 의 등열 유속 조건으로 통전 가열하였으며, 이때 열유속은 식(1)과 같이 회로내 전류계의 전류와 스테인레스 박판 양단 전위차의 곱으로 구하였다.

그리고 국부열전달계수( $h$ ), 국부 Nusselt 수( $Nu$ ), 국부 평균 Nusselt 수( $\overline{Nu}$ )는 다음과 같이 계산하였다.

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

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

$$Nu = h \cdot \frac{B}{k} \quad (3)$$

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

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 자유제트의 속도와 난류강도

Fig. 6은 노즐출구속도( $U$ )가 18 m/s일 때 제트 중심축 상에서의 속도와 노즐출구속도와의 비( $U_s/U$ ) 및 난류강도와 노즐출구속도와의 비( $\sqrt{u^2}/U$ )를 나타낸 것이다. 제트중심속도  $U_s$ 가  $U$ 의 98%에 해당되는 지점까지의 거리를 포텐

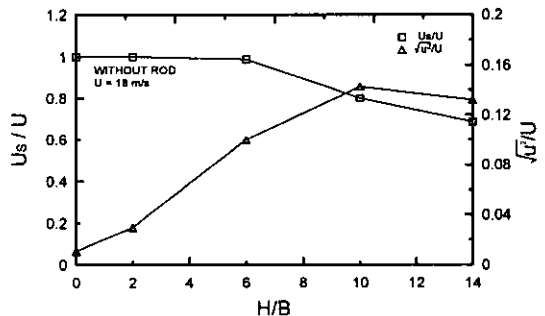


Fig. 6 Mean velocity and turbulent intensity profiles along the free jet centerline at  $U=18 \text{ m/s}$ .

셸코어영역이라고 정의할 때<sup>(13,14)</sup> 본 실험범위에서의 포텐셜코어영역은 노즐출구폭의 6배 ( $H/B=6$ ) 되는 위치까지로 판단되며, 포텐셜코어영역을 벗어난 영역인  $H/B=10, 14$ 에서  $U_s$ 는 점차 감소하기 시작한다. 그리고 난류 강도는 포텐셜코어영역에서부터 증가하기 시작하여  $H/B=10$ 에서 최대가 된 후 다시 감소하는데 이것은  $H/B=10$ 에서 주위 유체와의 혼합작용이 가장 활발하기 때문이다.

따라서 본 실험범위 내에서 난류 강도가 최소가 되는 위치는  $H/B=2$ 이며 최대가 되는 위치는  $H/B=10$ 으로 본 연구의 열전달실험은  $H/B=2$ 와 10에서 수행하였고, 실험데이터의 신뢰성을 검증하기 위해 로드를 설치하지 않은 평판에서  $U=18\text{ m/s}$ ,  $H/B=10$ 인 조건에서의 평균  $Nu_f$ 를 Lee<sup>(9)</sup>와 비교한 결과 약 4% 정도의 차이를 보였다.

3.2 로드를 설치하지 않은 경우의 열전달특성

Fig. 7은 로드를 설치하지 않은 평판 전열면에 제트가 충돌할 때, 속도  $U$  변화에 따른 정체점에서의 열전달특성을 나타낸 것으로 정체점에서의  $Nu_f$ 는  $H/B$ 가 증가함에 따라 서서히 증가하기 시작하여  $H/B=10$ 에서 최대가 된 후 다시 감소한다.  $Nu_f$ 가 노즐출구속도 변화에 관계없이  $H/B=10$ 에서 최대가 되는 것은 제트가 전열면에 충돌하기 전에 주위 유체와의 혼합작용이 충분히

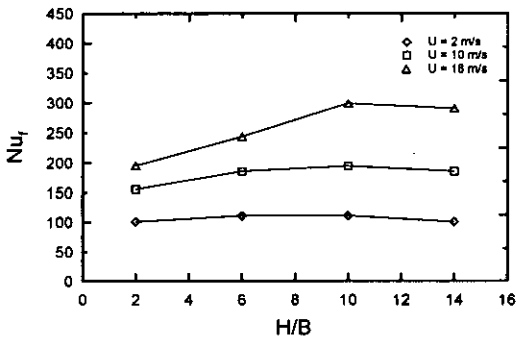


Fig. 7 Variation of stagnation point  $Nu$  as a function of  $H/B$  for various velocities.

이루어져 난류 강도가 증가되었기 때문이며<sup>(9-11)</sup> 노즐형상변화에 따라 약간의 차이는 있지만 최대 열전달계수를 얻을 수 있는 위치는 천이영역(노즐출구폭의 약 6~12배 위치)이라는 것이 많은 연구결과<sup>(4-6, 9-11)</sup>에서 밝혀진 바 있다.

Fig. 8은  $U=2, 18\text{ m/s}$ 일 때  $H/B=2$ 와 10 조건에서 정체점으로부터  $X$  방향의  $Nu_f$ 를 나타낸 것이다. 전체적으로  $Nu_f$ 는 정체점 이후  $X$  방향으로 진행할수록 감소하고 있는데, 이것은 경계층이 성장하고 제트가 벽면제트영역으로 진행하면서 유속이 감소하며 분류가 확산하기 때문이다.

각각의 속도에 대해  $H/B$ 별  $Nu_f$ 의 특성을 살펴보면 포텐셜코어영역인  $H/B=2$ 에서 가장 낮은  $Nu_f$ 값을 갖는다. 이것은  $H/B=2$ 에서는 제트가 충돌판에 충돌하기 전에 주위 정지유체와의 혼합작용이 충분하지 않기 때문이다. 그리고,  $U=18\text{ m/s}$ ,  $H/B=2$  조건에서 제트가 벽면을 따라 진행하면서  $Nu_f$ 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.<sup>(3,9)</sup>

이상과 같이 로드를 설치하지 않은 평판 전열면에서 2차원 제트의 유동특성 및 열전달특성에 대하여 고찰한 결과, 제트가 평판에 충돌할 경우  $Nu_f$ 는 정체점 이후  $X$  방향으로 계속 감소하며, 포텐셜코어영역 내에 충돌판이 설치되더라도  $X/B$

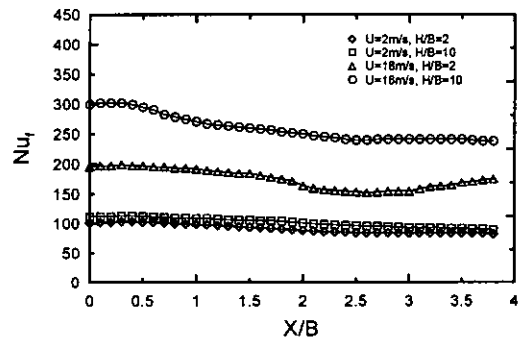


Fig. 8 Distribution of local  $Nu$  on the flat plate as a function of  $X/B$  for various velocities and  $H/B$ .

=2.5 부근에서의 재상승 경향은 있지만  $Nu_f$ 는 정체점보다 상대적으로 낮다.

따라서 충돌제트계의 열전달 증진의 한 방법으로 벽면제트영역 내의 열전달을 증진시키는 방안이 모색되어져야 한다고 생각한다.

### 3.3 로드를 설치한 경우의 열전달특성

#### 3.3.1 로드와 전열면 사이의 간극변화에 따른 열전달특성

Fig. 9는 로드폭( $W$ )이 4mm이고, 노즐출구속도( $U$ )가 18m/s, 로드와 로드 사이의 피치( $P$ )가 30mm이고 충돌판의 위치가 노즐출구폭의 10배( $H/B=10$ )인 조건에서 로드와 전열면 사이의 간극( $C$ ) 변화에 따른  $Nu_f$  분포를 나타낸 것으로 로드가 없는 평판과 비교하여 정체점 부근을 제외한 전영역에서  $C$ 변화와 관계없이 높은 값을 가지고 있다.

$C$ 변화와 관계없이  $Nu_f$ 은  $X$  방향으로 진행하면서 공통적으로 로드와 로드 사이에서 감소하다 점차 증가하여 로드 밑에서 피크를 나타낸 후 다시 감소와 증가를 반복하는 현상을 나타낸다.

Webb et al.<sup>(16)</sup>에 의하면  $P/D$ (리브의 피치/리브의 직경 혹은 높이)=6인 경우에는 리브를 타고 넘는 자유유동이 바닥면에 재부착하며,  $P/D > 10$ 인 조건에서는 리브를 타고 넘는 자유유동이 바닥면에 재부착한 후 경계층을 형성한다고 하였다. 또한 리브의 정상에서는 박리현상이 생기고 재부착점은 리브의 형상에 따라 박리점으로부터 리브 높

이의 약 6~8배 정도의 위치에 생기며 재부착점에서부터 경계층이 성장하기 시작한다고 발표하였다.

Fig. 9에서 로드와 로드 사이에서  $Nu_f$ 이 감소하다 다시 증가하는 분포가 연속적으로 일어나는데, 특히 감소 후 다시 증가하는 현상은 로드를 타고 넘어오는 제트가 로드와 로드 사이에서 재부착하면서 로드 밑을 빠져나오는 제트를 다시 전열면으로 흐르도록 유도하기 때문으로 생각된다. 간격  $C$ 변화와 관계없이 로드 직후에서  $Nu_f$ 이 급격하게 낮아지는 것은 제트가 로드 바로 밑을 지나면서 전열면에서 이탈하는 박리현상<sup>(9-11)</sup> 때문이다. 특히 각각의  $C$ 에 대해 로드 밑에서  $Nu_f$ 이 피크를 이루는데, 이것은 로드 밑에서 가속에 의한 영향으로 생각되며  $C$ 가 작을수록 이와 같은 현상은 두드러지게 나타난다.

또한  $X$  방향으로 진행할수록 열전달성능이 점차적으로 낮아지는데, 이것은 경계층이 성장하고, 제트의 확산과 로드에 의한 저항으로 운동량이 감소하기 때문인 것으로 생각한다.

Fig. 10은  $W=8$ mm,  $U=18$  m/s,  $P=30$ mm,  $H/B=2$ 일 때,  $C$ 변화에 대한  $Nu_f$  분포를 나타낸 것으로 전체적인 경향은 Fig. 9와 유사하다.

그러나 벽면제트영역에서  $Nu_f$ 이 피크를 나타내는 위치를 살펴보면  $W=4$ mm일 때는 로드 밑에서 나타났으나  $W=8$ mm일 때는 로드 밑보다는 로드 직전에서 보다 높게 나타난다. 이것은 로드 직전에서 발생하는 와류<sup>(10,11)</sup>에 의한 영향으로 보인다.

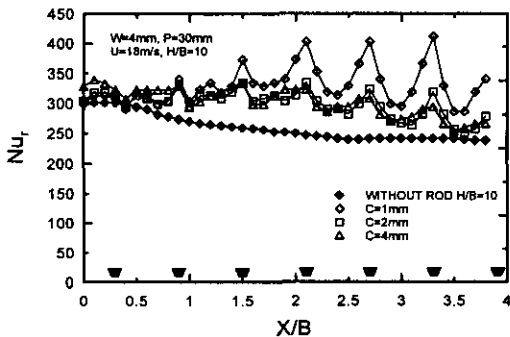


Fig. 9 Distribution of local  $Nu$  as a function of  $X/B$  for various clearances ( $W=4$ mm,  $P=30$ mm).

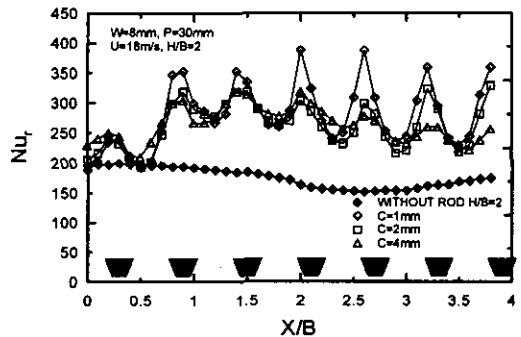


Fig. 10 Distribution of local  $Nu$  as a function of  $X/B$  for various clearances ( $W=8$ mm,  $P=30$ mm).

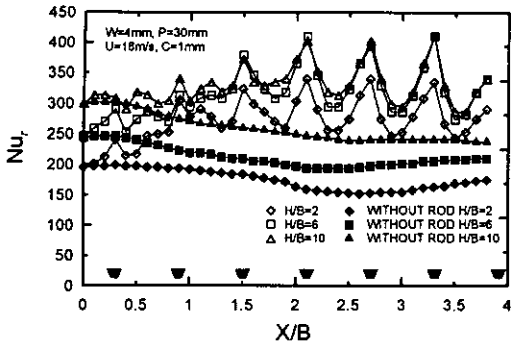


Fig. 11 Distribution of local  $Nu_r$  as a function of  $X/B$  for various  $H/B$  ( $P=30$  mm,  $C=1$  mm).

Fig. 11은  $W=4$  mm,  $U=18$  m/s,  $P=30$  mm,  $C=1$  mm일 때,  $H/B$  변화에 따른  $Nu_r$  분포와 로드가 설치되지 않은 경우의  $Nu$  분포를 비교한 것으로,  $X/B < 1$  부근을 제외한 전영역에서 로드를 설치한  $H/B=2$ 의 경우 열전달성능이 로드가 설치되지 않은  $H/B=10$ 의 열전달성능보다 매우 높다. 즉 자유제트영역 내에서 주위 유체와의 혼합작용이 충분치 않은 포텐셜코어영역이라도 로드를 설치하게 되면 로드에 의한 영향으로 로드가 설치되지 않은 천이영역인  $H/B=10$ 에서의 열전달성능보다 높아진다. 따라서 이와 같은 결과를 응용할 경우 열교환장치의 소형화에 중요한 자료가 될 수 있을 것으로 생각된다.

지금까지 간격  $C$  변화에 대한 영향을 살펴보면 로드의 밑폭  $W$  변화와 관계없이  $C=1$  mm일 때

열전달성능이 가장 좋다.

### 3.3.2 로드의 폭과 피치변화에 따른 열전달특성

Fig. 12는  $U=18$  m/s,  $P=30$  mm,  $C=1$  mm,  $H/B=2$ 인 조건에서  $W=4, 8$  mm에 대한  $X$  방향의  $Nu_r$  분포를 나타낸 것이다.  $W=8$  mm일 때 전영역에서  $W=4$  mm인 조건보다 열전달성능이 높게 나타나고 있다. 특히  $W=4$  mm인 경우에는 로드 밑부분에서  $Nu_r$ 이 높게 나타나는 반면  $W=8$  mm에서는 로드 밑부분보다 로드 직전 위치에서 더 높게 나타나는 데 이것은 로드 직전에서 발생하는 와류 영향 때문이며, 이 와류발생은 로드의 높이와 관계가 있는 것으로 판단된다. 그리고  $W=4$  mm인 경우 두번째 로드와 세번째 로드 사이 ( $X/B=1$  부근)에서  $Nu_r$ 이 감소와 증가를 반복하고 있다. 이것은 제트가 전열면에 완전히 재부착한 결과라고 생각되며  $W=8$  mm에서는 이러한 현상은 나타나지 않는다.

Fig. 13은  $H/B=10$ 인 조건으로 전체적인 경향은  $H/B=2$ 와 유사하나 열전달 증진율면에서 보면 로드가 없는 경우와 비교할 때  $H/B=2$ 에서의 열전달 증진율보다는 낮다.

이것은  $H/B=10$ 인 경우에는 제트의 난류강도가 감소하는 단계에서 충돌함으로써 로드에 의한 영향이 크지 않은 반면,  $H/B=2$ 에서는 난류강도가 충분히 발달하지 않은 상태에서 충돌하지만 벽면제트영역으로 진행하면서 로드에 의한 영향을 받아 난류강도가 증가하기 때문에 로드를 설

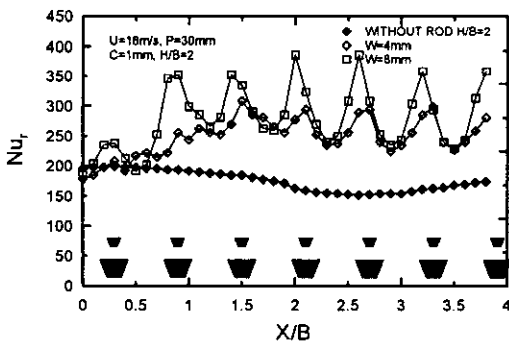


Fig. 12 Distribution of local  $Nu_r$  as a function of  $X/B$  for various width ( $P=30$  mm,  $H/B=2$  mm).

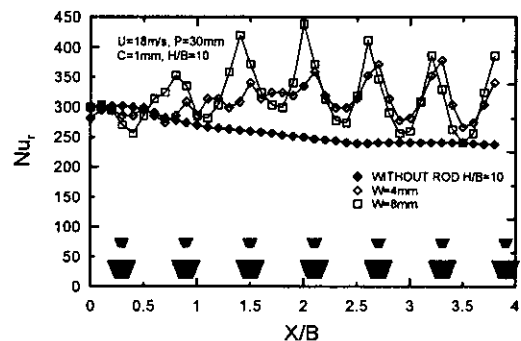


Fig. 13 Distribution of local  $Nu_r$  as a function of  $X/B$  for various width ( $P=30$  mm,  $H/B=10$ ).

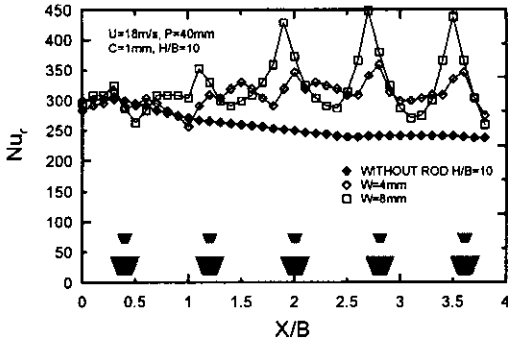


Fig. 14 Distribution of local  $Nu$  as a function of  $X/B$  for various width ( $P=40$  mm,  $H/B=10$ ).

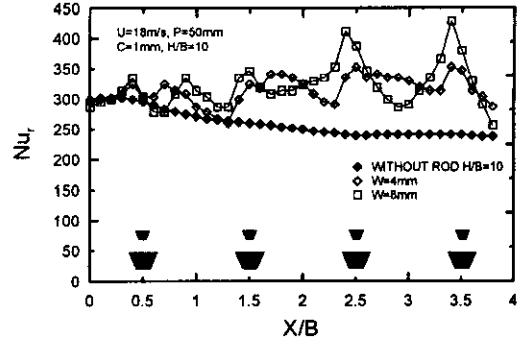


Fig. 15 Distribution of local  $Nu$  as a function of  $X/B$  for various width ( $P=50$  mm,  $H/B=10$ ).

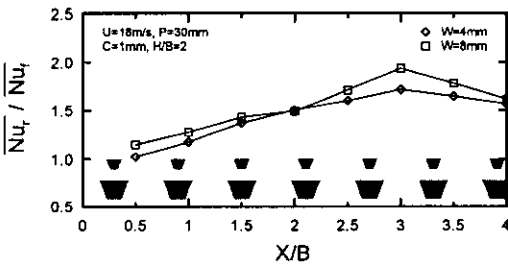


Fig. 16 Comparison of average local  $Nu$  on the flat plate with and without rods for various width ( $P=30$  mm,  $H/B=2$ ).

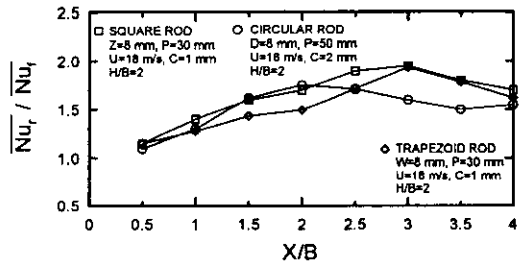


Fig. 17 Comparison of heat transfer enhancement rate on the square and circular rod ( $H/B=10$ ).

치하지 않은 평판에 비해 열전달 증진율은 크게 향상된다.

그리고  $W=4$  mm인 경우 제트가 완전히 재부착하는 지점은 세번째와 네번째 로드 사이( $X/B=1.5\sim 2$  부근)에서도 나타난다.

Fig. 14는  $U=18$  m/s,  $P=40$  mm,  $C=1$  mm,  $H/B=10$ 인 조건으로  $P=30$  mm일 때와 마찬가지로 로드와 로드 사이에서  $Nu_r$ 은 감소와 증가를 반복한다. 제트가 완전히 재부착하는 지점을 비교해 보면  $W=4$  mm인 경우, 세번째와 네번째 로드 사이( $X/B=2.5$  부근)에서도 나타나며 특히  $W=8$  mm인 경우 첫번째 로드와 두번째 로드 사이에서 이 현상을 볼 수 있다.

그리고,  $W=4$  mm인 경우 제트가 완전히 재부착하는 지점에서의 열전달성능은  $W=8$  mm일 때보다 오히려 높게 나타난다.

Fig. 15는  $U=18$  m/s,  $P=50$  mm,  $C=1$  mm,  $H/B=10$ 인 경우로  $W=8$  mm일 때  $Nu_r$ 이 피크를 나타내는 지점은 로드 직전이며 이와 같은 경향은  $P=30, 40$  mm인 결과와 동일하다.

지금까지 로드와  $W$ 와  $P$ 변화가 열전달성능에 미치는 영향을 살펴본 결과, 본 실험범위 내에서는  $W$ 가 크고  $P$ 가 작을수록 열전달성능은 우수하다.

이것은  $P=30$  mm일 때가  $P=40, 50$  mm일 때보다 로드의 개수가 상대적으로 많기 때문이며  $W$ 가 클수록 와류발생이 용이하고 가속되는 길이가 길어지므로 판단된다.

Fig. 16은  $U=18$  m/s,  $P=30$  mm,  $C=1$  mm,  $H/B=2$ 이고,  $W$ 가 4, 8 mm로 변화될 때 로드를 설치하지 않은 경우의 평균  $Nu_r$ 과 로드를 설치한 경우의 평균  $Nu_r$ 의 비를 나타낸 것으로  $W=$



8 mm일 때  $X/B=3$  부근에서 로드가 없는 평판에 비해 약 1.9배 정도의 열전달 증진율을 보이고 있다.

### 3.4 사각로드와 원형로드와의 열전달특성 비교

충돌공기제트계의 열전달특성에 관한 연구 가운데 지금까지 보고된 연구결과들을 검토하면 로드에 의한 난류촉진방법이 큰 효과를 거두고 있다고 할 수 있다. 따라서 이 분야에 대한 기존 연구결과들과의 비교도 매우 중요하다고 생각되기 때문에 로드의 형상이 원형인 조건과 사각형인 조건에서의 실험결과들을 본 연구결과와 정량적으로 비교 검토하였다.

Fig. 17은 원형 로드, 사각형 로드 및 본 실험 결과 중 실험변수가 유사한 조건들의 결과를 비교한 것으로 원형 로드 직경은 8 mm ( $U=18$  m/s,  $C=2$  mm,  $P=50$  mm,  $H/B=2$ ),<sup>(9)</sup> 사각형 로드<sup>(10)</sup> 및 사다리형 로드의 폭은  $W=8$  mm ( $U=18$  m/s,  $C=1$  mm,  $P=30$  mm,  $H/B=2$ )이다.  $X/B < 1$  영역에서는 세 가지 형태의 로드에 의한 결과에 큰 차이가 없다. 그러나  $1 < X/B < 2.5$  영역에서는 원형 로드가 사다리형 로드의 열전달성능보다 높게 나타났다. 이것은 원형 로드의 경우, 그 형태상 재부착이 용이하며 따라서 재부착에 의한 열전달효과가 크게 작용하기 때문이다. 그리고  $X/B > 2.5$  영역에서 원형 로드의 열전달 증진율은 사각형 로드와 사다리형 로드의 열전달 증진율보다 낮게 나타난다. 즉 벽면제트영역에서 사각형이나 사다리형 로드는 로드 측면에서 발생하는 와류와 로드 밑부분에서의 가속효과<sup>(10,11)</sup>가 크게 작용하는 반면, 원형 로드인 경우에는 로드 바로 밑의 단면적이 사각형이나 사다리형 로드보다 작기 때문에 가속에 의한 영향은 상대적으로 작다.

## 4. 결 론

본 연구는 2차원 충돌공기제트계에서 열전달증진을 목적으로 전열면 전방에 로드의 폭( $W$ )이 각각 4, 8 mm인 사다리형 로드를 설치하고 로드와 전열면 사이의 간극( $C=1, 2, 4$  mm), 로드와 로드 사이의 피치( $P=30, 40, 50$  mm), 노즐출구

와 전열면 사이의 거리( $H/B=2, 10$ )를 변화시키면서 열전달특성을 실험적으로 규명하고, 로드를 설치하지 않은 평판의 경우와 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

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

(2) 로드와 전열면 사이의 간극은 작을수록 열전달성능은 좋아진다.

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

(4) 원형, 사각형 및 사다리형 로드의 열전달 증진율을 비교하면 사각형 및 사다리형 로드인 경우에는 벽면제트영역에서 원형 로드에 비해 상대적으로 열전달 증진율이 높게 나타났다.

## 참고문헌

- 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.
- 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.
- Choi, D. S., 1992, Heat transfer augmentation in two-dimensional impinging jet system by turbulence promoter, MS. thesis, Inha University, Incheon, Korea.
- Kim, S. P., 1982, An experimental study on the augmentation of heat transfer by impinging air jets, Ph.D. thesis, Inha University, Incheon, Korea.
- Lee, Y. H., 1998, Study on the flow characteristics and heat transfer enhancement on flat plate in potential core region of 2-dimensional air jet, *Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 10, pp. 1-10.

- tioning and Refrigeration Engineering, Vol. 10, No. 2, pp. 193-201.
6. 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.
  7. 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.
  8. Park, S. S., 1993, A study on the heat transfer augmentation by impinging air jets by swirl, Ph.D. thesis, Inha University, Incheon, Korea.
  9. Lee, Y. H., 1989, Heat transfer augmentation in 2-dimensional impinging air jet system, Ph.D. thesis, Inha University, Incheon, Korea.
  10. 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.
  11. Kim, D. C., 2000, A study on heat transfer augmentation by hybrid rod in impinging air jet, Ph.D. thesis, Inha University, Incheon, Korea.
  12. Incropera, F. P., 2000, Introduction to Heat Transfer, 3rd ed., John Wiley, p. 757.
  13. Chung, Y. S., Lee, D. H. and Lee, J. S., 1998, Heat transfer coefficient measurement by a jet impinging on a rib-roughened convex surface, Transaction of KSME, Vol. 22, No. 3, pp. 373-385.
  14. Giralt, F., Cjina, C. and Trass, O., 1977, Characterization of the impingement region in and axisymmetric turbulent jet, Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, Vol. 16, pp. 21-28.
  15. Kataoka, K., Sahara, R., Ase, H. and Harada, T., 1987, Role of large scale coherent structures in impinging heat transfer, Journal of Chemical Engineering-Japan, Vol. 20, pp. 71-76.
  16. 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.