

## 충돌공기제트시스템에서 직삼각형로드에 의한 열전달특성

금 성 민<sup>†</sup>

### Heat Transfer Characteristics by the Right Angled Triangle Rod Array in Impinging Air Jet System

Sung-Min Kum

**Key Words:** Impinging air jet(충돌공기분류), Right angled triangle rod(직삼각형 로드), Clearance(간극), Stagnation point(정체점)

#### Abstract

This experimental study was carried out to examine the heat transfer characteristics of impinging air jet on a flat plate with a set of right angled triangle rods. Each right angled triangle rod in the array was positioned normal to the flow direction and parallel to the flat plate surface. The clearances from a right angled triangle rod to flat plate surface ( $C=1, 2$  and  $4$  mm) and the distance from nozzle exit to flat plate ( $H=100$  and  $500$  mm) were changed for the pitch between each right angled triangle rods ( $P=40$  mm). As a result, heat transfer shows best performance at the clearance of  $C=1$  mm, in case clearance changed, and the average heat transfer enhancement rate increased up to 47% compared to the result of a flat plate without a right angled triangle rod.

#### 기호설명

$B$  : 노즐출구폭 [mm]  
 $C$  : 전열면과 로드사이의 간극 [mm]  
 $H$  : 노즐출구부터 전열면까지의 거리 [mm]  
 $h$  : 열전달계수 [ $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ]  
 $k$  : 열전도 계수 [ $W/m^\circ C$ ]  
 $U$  : 노즐출구속도 [m/s]  
 $P$  : 로드와 로드사이 피치 [mm]  
 $q$  : 열유속 [ $W/m^2$ ]  
 $T_w$  : 전열면의 온도 [ $^\circ C$ ]  
 $T_\infty$  : 공기온도 [ $^\circ C$ ]  
 $Nu$  : Nusselt number  
 $W$  : 로드 폭 [mm]

$X$  : 정체점에서 노즐출구폭 방향거리 [mm]

#### Subscripts

f without rod  
 r with rod

#### 1. 서 론

노즐로부터 주위 정지유체로 분출되는 자유제트는 제트와 주위유체와의 혼합에 의한 높은 난류강도를 얻을 수 있기 때문에 이 제트를 전열면에 충돌시키는 충돌제트시스템은 각종 건조 및 냉각 등에 이용되고 있다.

충돌제트에 대한 기초적 실험은 Garden and Akfirat<sup>(1)</sup> 이후 지금까지 꾸준히 연구되어 왔다. Garden and Akfirat<sup>(1, 2)</sup>은 주위 정지유체와의 혼합작용에 의해 생성

(2008년 2월 17일 접수 ~ 2008년 2월 27일 심사완료)  
<sup>†</sup>책임저자, 회원, 한라대학교 기계자동차공학부  
 E-mail : smkum@halla.ac.kr  
 TEL : (033)760-1217 FAX : (033)760-1211

된 와류 때문에 열전달계수는 정체점에서 최대가 되며 벽면제트영역으로 진행하면서 감소한다고 발표하였다.

따라서 충돌제트는 정체점 이후 벽면제트영역으로 진행할수록 속도감소와 온도경계층의 발달로 열전달특성은 정체점에 비해 상대적으로 낮아지기 때문에 벽면제트영역에서의 열전달 증진에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.

벽면제트영역에서 열전달성능을 향상시키기 위해 메쉬<sup>(3)</sup>를 설치하거나, 전열면의 형상을 곡면<sup>(4)</sup>으로 제작하여 전열면적을 확대시키는 방법 등 많은 연구들이 발표되었다.

최근에는 전열면 앞에 난류촉진체를 설치하여 열전달 성능을 향상시키는 방법이 주목을 받고 있다.

Kim<sup>(5)</sup>은 전열면 앞에 하이브리드 로드를 설치하고 로드의 폭, 피치, 전열면간의 간극을 변화시켜 벽면제트영역에서 열전달증진 효과를 얻었으며, 간극이 작을수록 열전달증진이 우수함을 실험적으로 규명하였다.

Kum 등<sup>(6)</sup>은 사각로드를 전열면 앞에 설치한 후 로드와 전열면사이의 간극을 변화시키면서 실험한 결과 벽면제트영역에서도 높은 열전달율을 얻을 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 노즐출구속도, 노즐출구로부터 충돌판까지의 거리<sup>(8,9)</sup> 등에 따라 다소의 차이가 있지만, 제트의 재부착 및 박리, 난류강도 등에 의해 좌우되고, 로드를 설치할 경우에는 로드에 의한 난류발생 및 재부착, 로드측면에서의 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 직삼각형 로드를 제작하였다. 직삼각형 로드는 밑면 폭(W)과 높이가 각각 4 mm, 길이가 500 mm로서 이들 로드를 평판전열면 앞에 설치한 후, 로드의 피치(P)가 40 mm일 때, 노즐출구와 전열면 사이의 거리(H=100, 500 mm) 및 로드와 전열면 사이의 간극(C=1, 2, 4 mm)을 변화시키면서 이때의 열전달특성을 실험적으로 규명하고 로드를 설치하지 않은 평판의 경우와 비교하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

Figure 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 250 mm, 출구폭 50 mm, 높이 500 mm, 길이 300 mm인 sin곡선형의 사각노즐이다.

Figure 2와 3은 평판 전열면 앞에 직삼각형 로드를 설치한 경우의 좌표계로서 로드폭을 W, 로드와 전열면사이의 간극을 C, 로드사이의 피치를 P, 노즐출구폭을 B, 노즐높이를 L, 평판의 정체점(stagnation point)으로부터 노즐출구폭 방향의 거리를 X, 노즐출구로부터 전열면까지의 거리를 H로 하여 X와 H를 각각 X/B, H/B로 무차원화 하였다.

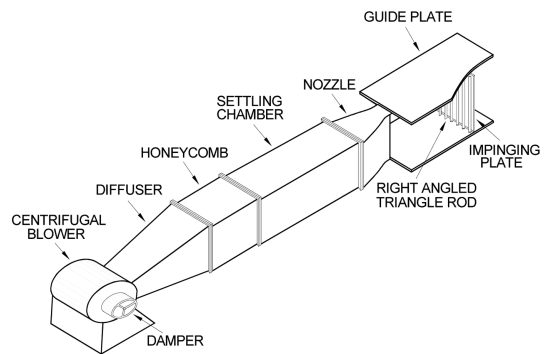


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

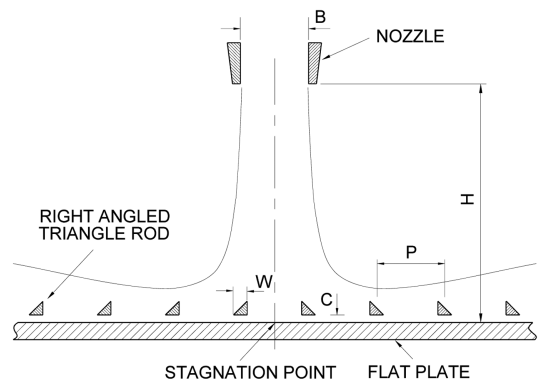


Fig. 2 Impinging flat plate-right angled triangle rods array system (top view)

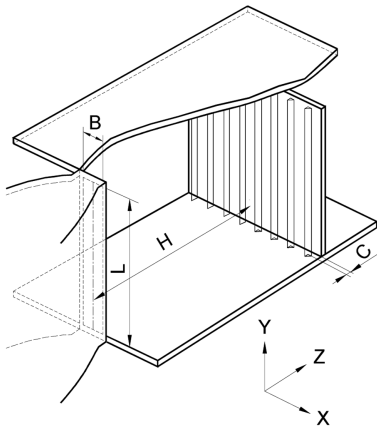


Fig. 3 Impinging flat plate-right angled triangle rods array system (side view)

노즐중심은 전열면 중앙부에 인접한 두께 로드사이의 중심선과 일치하도록 하였다. 노즐출구속도는 정온형 열선풍속계를 이용하여 노즐의 중심에서 X방향으로 5 mm 간격으로 측정하였으며, 전열면의 온도측정은 스테인레스 박판 뒷면에 지름 0.127 mm의 열전대(T-type, Omega) 39개를 정체점으로부터 5 mm 간격으로 부착하여 데이터취득장치(Fluke Co., Helios)에 연결하고, 전열면이 정상상태에 도달한 것을 확인한 후, 5초 간격으로 반복하여 평균온도를 얻었다.

온도측정은 자유제트의 유속측정으로 부터 좌우 대칭성을 확인했기 때문에 정체점에서 부터 한방향으로만

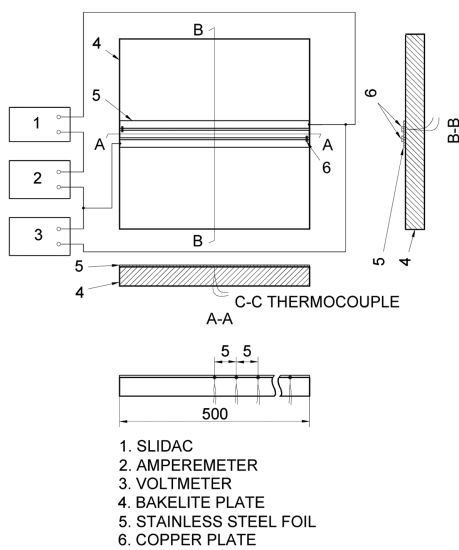


Fig. 4 Detail diagram of heating apparatus

측정하였다.

Figure 4는 전열면의 형상을 나타낸 것으로 베클라이트판(500×500×20 mm)에 스테인레스 박판(길이 500 mm, 폭 10 mm, 두께 0.03 mm) 3매를 접착제로 부착하고 단면 B-B와 같이 동판으로 연결하였다.

전열면 가열은  $Q=1020 \text{ W/m}^2$ 의 등열유속 조건으로 통전 가열하였으며, 이때 열유속은 회로내 전류계의 전류와 스테인레스박판 양단 전위차의 곱으로 구하였다.

그리고 국소열전달계수( $h$ ), 국소Nusselt수( $Nu$ ), 국소평균 Nusselt수( $\overline{Nu}$ )는 다음과 같이 계산하였다.

$$h = \left( \frac{q}{T_w - T_\infty} \right) \quad (1)$$

$$Nu = h \cdot B/k \quad (2)$$

$$\overline{Nu} = \int_{-x}^x Nu \cdot dx / \int_{-x}^x dx \quad (3)$$

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 자유제트의 속도와 난류강도

Figure 5는 노즐출구속도( $U$ )가 18 m/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 95%에 해당되는 지점까지의 거리를 포텐셜코어 영역이라고 정의할 때<sup>(7)</sup> 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  $H/B=10$ 에서 최대가 된후 다시 감소하

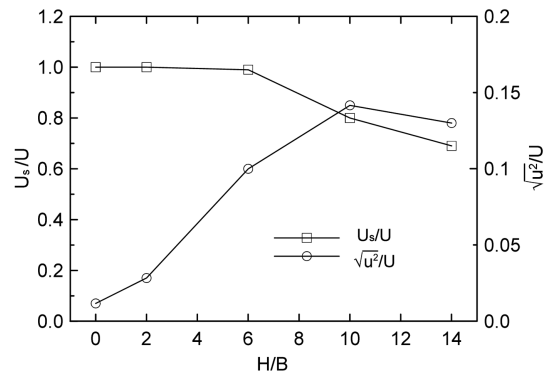


Fig. 5 Mean velocity and turbulent intensity profiles along the free jet centerline at  $U=18 \text{ m/s}$

는데 이것은 H/B=10에서 주위유체와의 혼합작용이 가장 활발하기 때문으로 판단된다. 따라서 본 실험범위내에서 난류강도가 최소가 되는 위치는 H/B=2이며 최대가 되는 위치는 H/B=10으로 본 연구의 열전달실험은 H/B=2와 10에서 수행하였다.

3.2 로드를 설치하지 않은 경우의 열전달특성

Figure 6은 로드를 설치하지 않은 평판 전열면에 제트가 충돌할 때, 속도변화에 따른 정체점에서의 열전달특성을 나타낸 것으로 U=18 m/s 일 때 정체점에서의 Nu<sub>r</sub>는 H/B가 증가함에 따라 서서히 증가하기 시작하여 H/B=10에서 최대가 된 후 다시 감소하는데 이것은 제트가 전열면에 충돌하기 전에 주위유체와의 혼합작용이 충분히 이루어져 난류강도가 증가되었기 때문이며<sup>(3-6)</sup> 노즐형상변화에 따라 차이는 있지만 최대 열전달계수를 얻

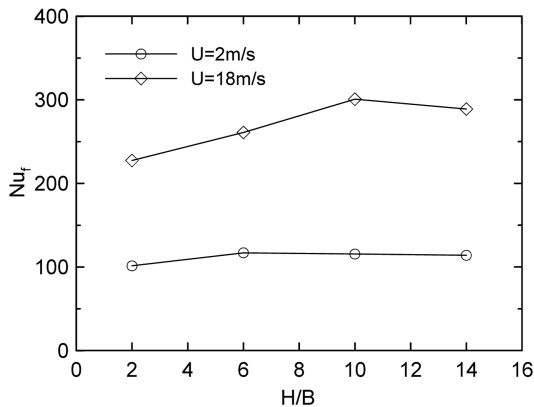


Fig. 6 Stagnation Nusselt Number of flat plate at various axial distance from nozzle exit

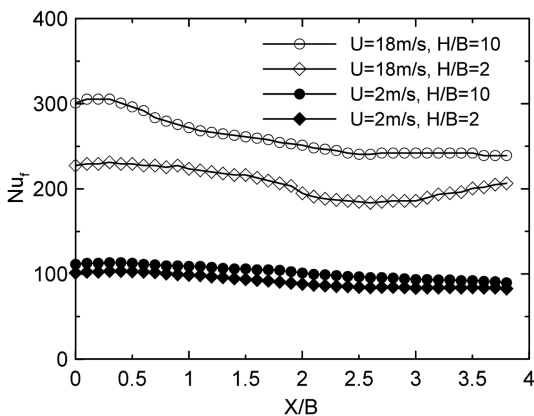


Fig. 7 Distribution of local Nu on the flat plate as a function of X/B for various velocities and H/B

을 수 있는 위치는 천이영역(노즐출 구폭의 약 6~12배 위치)이라는 것이 많은 연구<sup>(3-7)</sup>에서 밝혀진 바 있다. 그리고 U=2 m/s에서 H/B가 증가함에 따라 Nu<sub>r</sub>도 증가하지만 뚜렷한 경향은 나타나지 않는다.

Figure 7은 U=2, 18 m/s일 때 H/B=2와 10인 조건에서 정체점으로 부터 X방향의 Nu<sub>r</sub>를 나타낸 것이다.

전체적으로 Nu<sub>r</sub>는 정체점 이후 X방향으로 진행할수록 감소하고 있는데, 이것은 경계층이 성장하고 제트가 벽면제트영역으로 진행하면서 유속이 감소하며 분류가 확산하기 때문이다.

각각의 속도에 대해 H/B변화에 대한 Nu<sub>r</sub>의 특성을 살펴보면 포텐셜코어 영역인 H/B=2에서 Nu<sub>r</sub>가 낮게 나타나는데 이것은 H/B=2에서는 제트가 충돌판에 충돌하기 전에 주위 정지유체와의 혼합작용이 충분하지 않기 때문이다. 또한 U=18m/s, H/B=2 조건에서 제트가 벽면을 따라 진행하면서 Nu<sub>r</sub>는 정체점 이후 감소하다가 X/B=2.5에서 다시 증가하기 시작한다. 이것은 노즐 양끝에서 생성된 와류가 성장하여 X/B=2.5에서 전열면상의 경계층을 교란시키기 때문이라는 것이 기존 연구에 의해 밝혀진 바 있다<sup>(3-6)</sup>.

그리고 U=18 m/s 일 때 포텐셜코어 영역인 H/B=2와 천이영역인 H/B=10에서의 열전달성능은 큰 차이가 있는 반면, U=2 m/s에서는 H/B=2와 10에서의 차이는 매우 작다. 따라서 속도가 작을 경우 천이영역이라 할지라도 포텐셜코어 영역보다 높은 열전달성능을 기대할 수 없다.

이상과 같이 로드를 설치하지 않은 평판 전열면에서의 열전달특성에 대하여 고찰한 결과, 제트가 평판에 충돌할 경우 Nu<sub>r</sub>는 정체점 이후 X방향으로 감소하며, 포텐셜코어 영역내에 충돌판이 설치된다라도 X/B=2.5 부근에서의 재상승 경향은 있지만 전체적으로 낮게 나타난다.

3.3 로드를 설치한 경우의 열전달특성

Figure 8은 U=18 m/s, 로드와 로드사이의 피치(P) 40 mm, 충돌판의 위치가 노즐출구폭의 2배(H/B=2)인 조건에서 로드와 전열면 사이의 간극(C) 변화에 따른 Nu<sub>r</sub> 분포를 나타낸 것으로 로드가 없는 평판과 비교하여 전 영역에서 C변화와 관계없이 Nu<sub>r</sub>은 높게 나타난다. C변화와 관계없이 첫 번째 로드와 두 번째 로드사이 및 두 번째로드와 세 번째 로드사이에서 Nu<sub>r</sub>이 높게 나타나는 것은 로드에 의한 제트의 박리와 제트가 벽면에 재부착하기 때문으로 생각되며 Webb 등<sup>(7)</sup>에 의한 결과와도 일

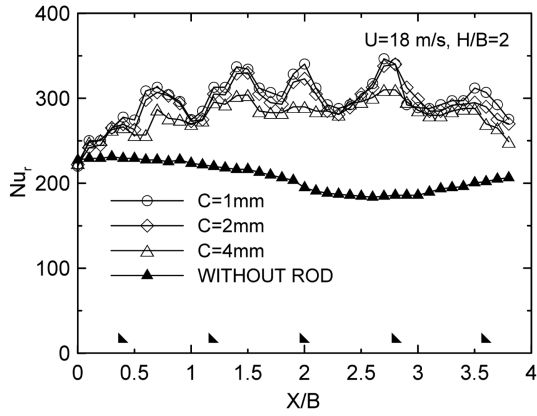


Fig. 8 Distribution of local  $Nu_r$  as a function of  $X/B$  for various clearances ( $H/B=2$ )

치한다.

X방향으로 진행하면서 공통적으로 로드 밑에서  $Nu_r$ 이 높게 나타나는데 이것은 로드 밑에서 제트의 가속에 의한 영향이며, C가 작을수록 이와같은 현상은 두드러지게 나타난다. 특히 로드 밑을 통과한 제트는 전열면에서 박리하기 때문에  $Nu_r$ 은 감소하지만 로드 위를 타고 넘어오는 제트가 로드와 로드사이에서 재부착하면서  $Nu_r$ 은 다시 상승한다. 특히 네번째 로드와 다섯번째 로드 직전에서  $Nu_r$ 은 로드 밑보다 높게 나타나는데 이것은 로드 직전에서 발생하는 와류에 의한 영향<sup>(5, 6)</sup>으로 보인다.

Figure 9는 충돌판의 위치가 노즐출구폭의 10배( $H/B=10$ )인 조건으로 전체적인 경향은  $H/B=2$ 와 유사하다. 그러나 로드가 없는 평판과 비교하면  $H/B=2$ 에서의 열

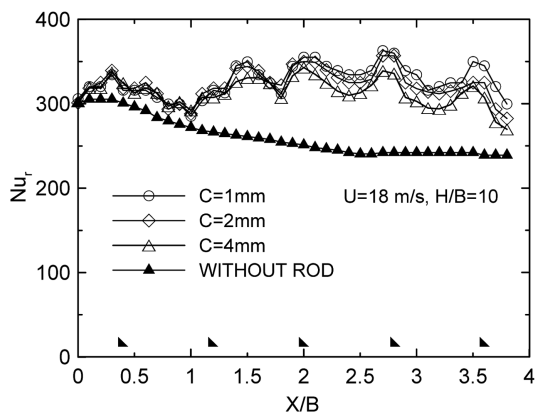


Fig. 9 Distribution of local  $Nu_r$  as a function of  $X/B$  for various clearances ( $H/B=10$ )

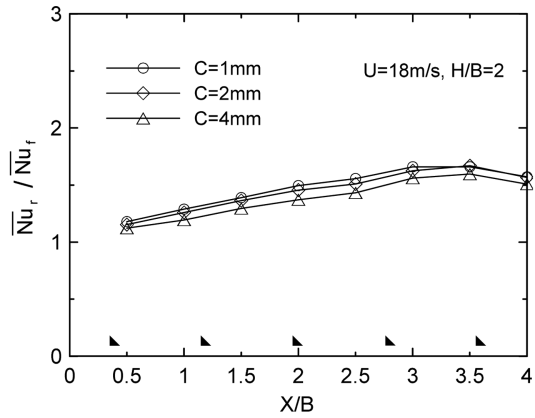


Fig. 10 Comparison of average local  $Nu_r$  on the flat plate with and without rods for various clearances( $H/B=2$ )

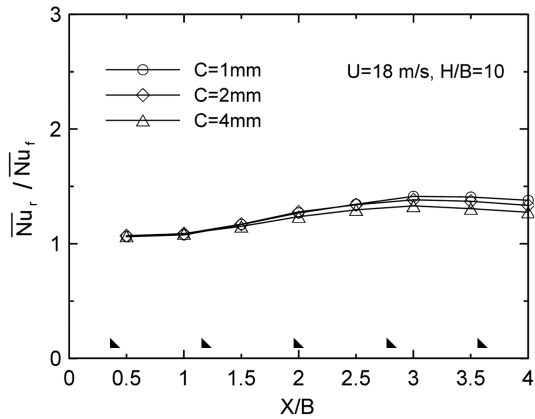


Fig. 11 Comparison of average local  $Nu_r$  on the flat plate with and without rods for various clearances ( $H/B=10$ )

전달증진율보다는 작다.

이것은  $H/B=10$ 인 경우에는 난류강도가 큰 상태에서 충돌하기 때문에 로드에 의한 열전달증진효과는 크지 않은 반면,  $H/B=2$ 에서는 난류강도가 충분히 발달하지 않은 상태에서 충돌판에 충돌하지만 제트가 벽면분류영역으로 진행하면서 로드에 의한 난류효과가 커지기 때문이다. 간극변화에 대한 영향을 살펴보면  $U$ 나  $H/B$ 와 관계없이  $C=1$  mm 일 때 열전달증진율이 가장 높다.

Figure 10 및 11은  $U=18$  m/s 일 때  $H/B=2$ 와  $H/B=10$ 인 경우 C변화에 대한 국소평균 열전달증진율을 나타낸 것으로  $H/B=2$ ,  $C=1$  mm일 때 로드를 설치하지 않은 평판에 비해 평균 47%,  $H/B=10$ ,  $C=1$  mm일때는 평균 26%의 열전달증진효과가 있었다.

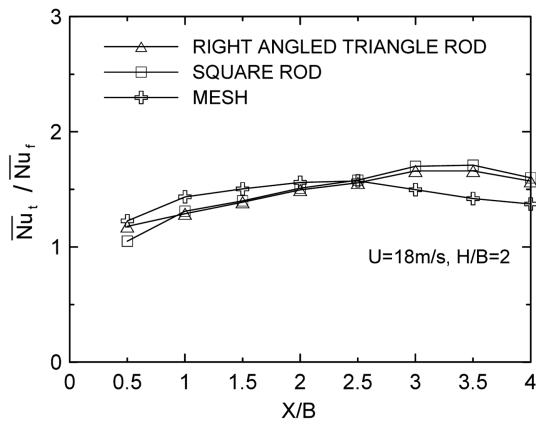


Fig. 12 Comparison of heat transfer enhancement rate on mesh, square rod and right angled triangle rod

### 3.4 메쉬 및 사각로드를 설치한 경우의 열전달 특성 비교

충돌공기제트시스템의 열전달특성에 관한 연구가운데 지금까지 보고된 연구결과들을 검토하면 난류축진체 설치에 의한 난류축진방법이 주목을 받고 있기 때문에 이 분야에 대한 연구 결과들의 검토도 매우 중요하다고 생각된다. 따라서 본 절에서는 전열면과 간극을 두고 정사각형 로드 및 메쉬를 설치한 실험결과<sup>(3, 6)</sup>들을 본 실험결과와 비교 검토하고자 한다.

Figure 12는  $U=18$  m/s,  $H/B=2$ 일 때 메쉬(한변의 길이가 10 mm인 정사각형 홀 배열)와, 정사각형 로드(한변의 길이가 4 mm)를 전열면앞에 설치했을 경우에 국소 평균 열전달율(로드 및 메쉬를 설치했을 때 평균 열전달율/로드가 없을 때 평균열전달율 :  $\overline{Nu_t}/\overline{Nu_{t0}}$ )을 본 실험결과와 비교한 것으로  $X/B < 2$ 까지의 열전달증진율은 메쉬를 설치한 경우가 높게 나타나는데 이것은 충돌영역에서 제트가 메쉬를 통과하면서 소분류로 분할되어 충돌하기 때문이며 이 효과는 로드와 비교하여 크게 작용하기 때문으로 생각된다.

그러나 벽면분류영역으로 진행하면서 로드를 설치했을 경우 로드 밑의 가속, 재부착 및 로드측면에서 발생하는 와류의 영향이 크게 작용해 열전달증진효과는 메쉬보다 높게 나타난다.

## 4. 결 론

본 연구는 2차원 충돌공기제트시스템에서 열전달증

진을 목적으로 전열면앞에 폭과 높이가 4 mm인 직삼각형 로드를 40 mm 간격으로 설치하고 로드와 전열면사이의 간극( $C=1, 2, 4$  mm), 노즐출구와 전열면사이의 거리( $H=100, 500$  mm)를 변화시키면서 열전달특성을 실험적으로 규명하고, 로드를 설치하지 않은 평판의 경우와 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 로드를 설치하지 않은 경우에는 정체점 이후  $Nu_t$ 가 계속적으로 감소하지만, 로드를 설치 할 경우에는 로드측면에서의 와류발생, 유체의 가속 및 재부착 등에 의해서 정체점보다 높은  $Nu_t$ 이 나타났다.

2) 로드와 전열면사이의 간극이 1 mm일 때 열전달능이 가장 우수하였으며 로드가 없는 경우와 비교하면  $H/B=2$ 일 때 평균 47%의 열전달증진효과가 있었다.

3) 메쉬와 정사각형 로드 및 직삼각형 로드와 의한 열전달증진효과를 비교한 결과 메쉬를 설치한 경우에는  $X/B < 2$ 영역에서, 정사각형 및 직삼각형 로드를 설치한 경우에는  $X/B > 2$ 영역에서 열전달증진효과가 높게 나타났다.

## 참고문헌

- (1) Gardon, R. and Akfirat, J. C., "The Role of Turbulence in Determining the Heat-Transfer Characteristics of Impinging Jets," Int. J. Heat and Mass Transfer. Vol. 8, 1965, pp.1261~1272.
- (2) Gardon, R. and Akfirat, J. C., "Heat Transfer Characteristics of Impinging Two-Dimensional Air Jets," ASME J. Heat Transfer. Vol. 88, 1966, pp.101~108.
- (3) Kum, S. M., Jung, D. S., and Kim, J. B., "Study on the Heat Transfer Enhancement by Mesh," Transaction of KSME, Vol. 22, No. 5, 1998, pp.716~724.
- (4) 이대희, 정영식, 김대성, 임경민, "블록한 반구면에 충돌하는 원형제트의 열전달 및 유동특성", 대한기계학회 논문집(B), 제 21권, 제4호, 1997, pp.579~588.
- (5) 김동춘, "공기충돌분류계에서의 하이브리드 로드와 의한 열전달증진에 관한 연구", 인하대학교 박사학위논문, 2000.
- (6) Kum, S. M., Gawaguchi, Y. and Seo, J. Y., "A Study on Heat Transfer Enhancement by a Square-Rod Array in an Impinging Jet System," Heat Transfer Japanese Research. Vol. 24, No. 2, 1995, pp.193~207.
- (7) Webb, R. L., Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J., "Heat Transfer and Friction in Tubes with Repeated-Rib Roughness," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.

14, 1971, pp.601~617.

- (8) 김명일, 전원표, 이동현, “충돌제트기류에서 유동 및 전열특성 모델링”, 대한설비공학회 2005 하계학술대회논문집, pp.748-753.

- (9) 김상길, 김동건, 김문경, 윤순현, “이차원 이중 충돌제트의 유동 및 열전달 특성”, 대한기계학회 2007 추계 학술대회논문집, pp.126~131.