

2차원 충돌 분류계에서 사다리형 로드 배열에 의한 열전달 촉진 효과

임태수* · 금성민† · 이창언**

(2001년 5월 31일 접수, 2001년 8월 31일 심사완료)

A Study on the Heat Transfer Enhancement by Trapezoid Rod Arrays in 2-Dimensional Impinging Jet System

Tae-Soo Lim, Sung-Min Kum and Chang-Eon Lee

Key Words: Impinging Jet(충돌 분류), Trapezoid Rod(사다리형 로드), Turbulence Promoter(난류촉진제), Heat Transfer Enhancement(열전달 촉진)

Abstract

The objective of this study was to investigate the characteristics of air flow and heat transfer caused by trapezoid rods array in impinging air jet system. Trapezoid rods have been set up on front of flat plate to act as a turbulence promoter. Local Nusselt numbers were determined as a function of three parameters : (a) the space from rods to heating surface($C=1, 2, 4\text{mm}$), (b) the pitch between each rods($P=30, 40, 50\text{mm}$), (c) the distance from nozzle exit to flat plate($H/B=2, 6, 10$). The measurements were compared with those of the experiment without trapezoid rods. As a result, when rods are installed in front of the impinging plate, the acceleration of the flow and the eddies due to the rods seem to contribute to the heat transfer enhancement. Heat transfer performance was best under the condition of $C=1\text{mm}$ and as the pitch is 30mm . The maximum rate of heat transfer augmentation is about 1.9 times greater compared to that without trapezoid rods.

기호설명

A : 전열 면적 [m^2]
 B : 노즐 출구폭 [mm]
 C : 로드와 전열면 사이의 간극 [mm]
 H : 노즐 출구로부터 전열면까지의 거리 [mm]
 I : 전열면에 공급되는 전류 [Ampere]
 L : 노즐 높이 [mm]
 Nu : Nusselt 수, $h \cdot B / k$

V : 전압 [volt]
 q : 열유속 [W/m^2]
 P : 로드와 로드사이의 피치 [mm]
 U : 노즐 출구속도 [m/s]
 W : 로드의 밑면 폭 [mm]
 X : 정체점으로부터 노즐 출구폭 방향 거리 [mm]

하첨자

f : 로드가 없는 경우
 r : 로드가 있는 경우

* 회원, 인하대학교 산업대학원

† 책임저자, 회원, 한라대학교 기계공학부

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

TEL : (033)760-1217 FAX : (033)760-1211

** 회원, 인하대학교 기계·항공자동화공학부

1. 서론

최근 지적되고 있는 에너지 자원의 유한성으로 인해 에너지의 효율적 이용과 관련된 열전달 촉진에 관한 연구는 그 중요성이 증대되고 있다.

열전달 촉진에 대표적인 방법으로 대류 열교환 기술을 대상으로 하는 충돌 공기 분류 시스템이 있는데, 이 시스템은 충돌영역에서 발생하는 대규모 와류(large scale eddy)에 의해 높은 열 및 물질 전달 계수를 얻을 수 있기 때문에^(1,2) 이 방법의 개발은 대단히 중요하다고 할 수 있다.

충돌 분류 시스템은 물체의 표면을 냉각하거나 가열에 응용될 수 있는데 공업적인 예로서 고온 물체의 급속 냉각, 직물 및 공업용 재료 등의 건조, 가스터어빈 날개의 냉각과 최근에는 전자 부품의 냉각 등에 이용^(3,4)되고 있다.

그러나 충돌 분류 시스템은 정체점 이후 벽면 분류 영역으로 진행할수록 분류의 속도 감소와 온도 경계층의 발달로 열전달 성능은 정체점에 비해 상대적으로 낮아지기 때문에 벽면 분류 영역에서의 열전달 촉진에 관한 필요성이 대두되게 되었으며 이 분야에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

벽면 분류 영역에서 열전달 성능을 향상시키기 위해서 노즐과 전열면 사이에 다공판이나 메쉬를 설치하는 방법,^(5,6) 전열면적을 확대시키는 방법,⁽⁷⁾ 노즐에 twisted tape 등을 삽입하여 분류를 선회시키는 방법⁽⁸⁾들이 발표되었다.

최근에는 전열면 앞에 난류 촉진체를 설치하여 열전달 성능을 향상시키는 방법이 주목을 받고 있는데, 이⁽⁹⁾는 전열면 앞에 원형 로드를 설치하고 난류 촉진체의 직경, 피치, 로드와 전열면간의 간극을 변화시킨 경우 벽면 분류 영역에서 로드가 없는 경우에 비해 국부적으로 약 2배의 열전달 촉진 효과가 있었으며, 간극이 작을수록 열전달 촉진이 우수함을 실험적으로 규명하였다.

Kum⁽¹⁰⁾은 사각로드를 전열면 앞에 설치한 후 로드와 전열면 사이의 간극을 변화시키면서 실험한 결과 벽면 분류 영역에서도 높은 열전달율을 확보할 수 있었으며, 로드가 없는 경우와 비교한다면 평균 약 1.35배 정도의 열전달 촉진 효과가 나타났는데 이것은 주로 로드 측면에서 발생하는 와류 및 로드 밑에서 분류의 가속효과에 의한 것으로 보고하고 있다.

지금까지의 연구 결과들을 요약하면 충돌 영역에서 정체점의 열전달 성능은 와류에 의해서 지배되며, 벽면 분류 영역에서의 열전달 성능은 노즐 출구 속도, 노즐 출구로부터 충돌판까지의 거리 등에 따라 다소의 차이가 있지만, 분류의 재

부착 및 박리, 난류 강도 등에 의해 좌우되고, 로드를 설치할 경우에는 로드와 전열면 사이의 간극에 의한 유체의 가속 등으로 벽면 분류 영역의 열전달 성능이 향상되기 때문에 로드의 형상 및 설치 조건이 매우 중요하다.

특히 로드를 이용한 연구 결과들 중 벽면 분류 영역의 열전달 성능에 지배적인 인자는 로드 측면에서의 와류 발생 및 로드 밑부분에서의 유체 가속 효과이기 때문에 이와 같은 효과를 기대할 수 있는 로드의 형상을 고안하였다.

로드의 형상은 양쪽 측면이 경사진 사다리형으로서 로드 밑부분의 폭과 높이가 4mm이며 측면 경사각은 80°이다. 이 로드를 평판 전열면 앞에 설치한 후, 로드의 피치, 노즐 출구와 전열면 사이의 거리 및 로드와 전열면 사이의 간극을 변화시키면서 이때의 유동 특성과 열전달 특성을 실험적으로 규명하였다. 또한 로드를 설치하지 않은 평판의 경우와 비교, 분석하고 동시에 기존의 원형 로드⁽⁹⁾ 및 사각 로드⁽¹¹⁾의 연구 결과와 비교

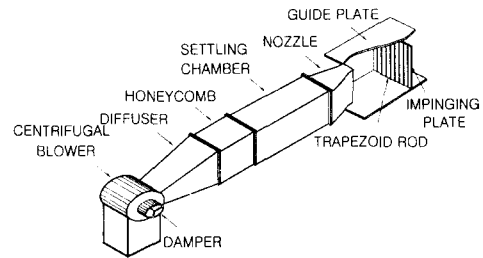


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

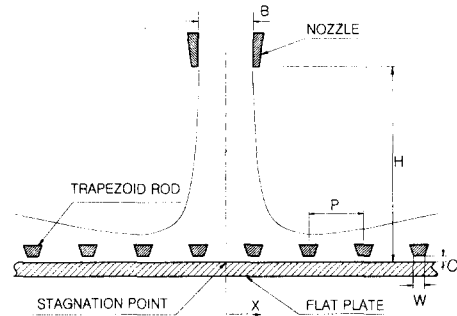


Fig. 2 Impinging flat plate-trapezoid rods array system(top view)

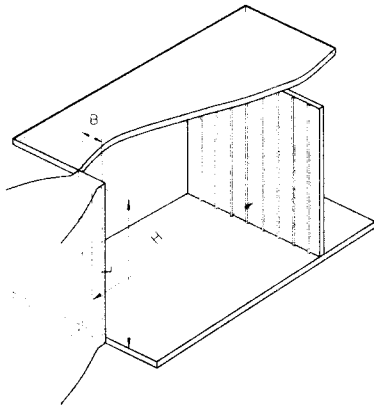


Fig. 3 Geometrical parameters of the system of flat plate with rods(side view)

하므로써 층돌 분류시스템에서 로드를 이용한 열전달 촉진 기술에 중요한 기초적 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 실험 장치의 개략도이다. 공기는 원심식 송풍기에서 보내지며 유량은 유량조절 탭에 의해 조절되고 와이어 매쉬와 디퓨저를 지나 하니컴과 세틀링 챔버에 의해 균일화 되면서 노즐을 통해 분출된다. 또한 2차원 분류가 되도록 분출 후의 유로 상하면에는 평행판을 설치하였으며 층돌판은 전후 이동이 가능하도록 하였다. 노즐의 형상은 축방향 및 폭방향으로 균일한 속도 분포를 위해 입구폭 250mm, 출구폭 50mm, 높이 500mm, 길이 300mm인 sine곡선형 사각 노즐이다.

Fig. 2, 3은 평판 전열면 앞에 사다리형 로드를 설치한 경우의 좌표계로서 로드폭을 W, 로드와 전열면간의 간극을 C, 로드 사이의 피치를 P, 노즐 출구폭을 B, 노즐 높이를 L, 평판의 정체점(stagnation point)으로부터 노즐 출구폭 방향의 거리를 X, 노즐 출구로부터 전열면까지의 거리를 H로 하여 X와 H를 각각 X/B, H/B의 무차원화 하였으며, 노즐 중심은 전열면 중앙부에 인접한 두 개 로드 사이의 중심선과 일치하도록 하였다.

전열면의 온도 측정은 스테인리스 박판 뒷면에 직경 0.127mm의 열전대(T-type, Omega) 40개를

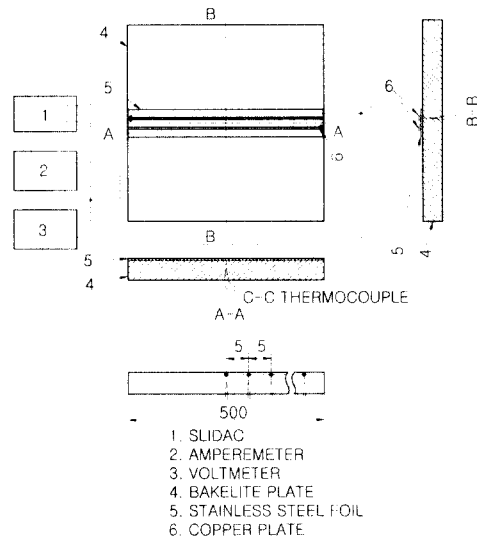


Fig. 4 Detail diagram of heating apparatus

정체점으로부터 5mm 간격으로 부착하여 Data Logger(Fluke Co, Helios I)에 연결하고, 전열면이 정상 상태에 도달한 것을 확인한 후 5초 간격으로 반복 측정하여 평균 온도를 읽었다. 온도 측정은 자유 분류의 유속 측정으로부터 좌우 대칭성을 확인했기 때문에 정체점으로부터 한 방향으로만 측정하였고 이때 분류의 온도 범위는 $19 \pm 1^\circ\text{C}$ 였으며 사용된 물성치는 참고 문헌⁽¹²⁾을 이용하였다. Fig. 4는 전열면의 형상을 나타낸 것으로 Bakelite판(500×500×20mm)에 스테인리스 박판(길이 500mm, 폭 10mm, 두께 0.03mm) 3매를 접착제로 부착하고 단면 B-B에 표시된 바와 같이 동판으로 연결하였다.

전열면의 가열은 $q=1020\text{W/m}^2$ 의 등열유속 조건으로 하여 통전 가열하였으며, 이때 열유속은 다음 식과 같이 회로내의 전류계의 전류와 스테인리스 박판 양단 전위차의 곱으로 구하였다.

$$q = I \cdot \frac{V}{A}$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 로드를 설치하지 않은 경우의 열전달 특성

Fig. 5는 로드를 설치하지 않은 평판 전열면에

분류가 충돌할 때 노즐 출구 속도(U) 변화에 따른 정체점에서의 열전달 특성을 나타낸 것으로 정체점에서의 Nu_r 는 H/B가 증가함에 따라 서서히 증가하기 시작하여 H/B=10에서 최대가 된 후 다시 감소한다.

Nu_r 가 노즐 출구 속도 변화에 관계없이 H/B=10에서 최대가 되는 것은 분류가 전열면에 충돌하기 전에 주위 유체와의 혼합 작용이 충분히 이루어져 난류 강도가 증가되었기 때문이며^(13,14) 노즐형상 변화에 따라 약간의 차이는 있지만 최대 열전달 계수를 얻을 수 있는 위치는 천이 영역(노즐 출구폭의 약 8~12배 위치)이라는 것이 많은 연구결과에서 밝혀진바 있다.

Fig. 6은 정체점으로부터 X방향의 Nu_r 를 각각의 속도와 H/B에 대하여 나타낸 것이다.

전체적으로 Nu_r 는 정체점 이후 X방향으로 진행할수록 감소하고 있는데 이것은 분류가 벽면

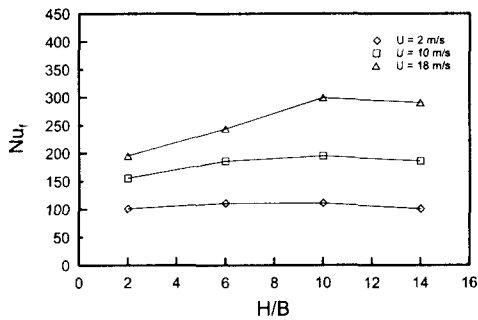


Fig. 5 Variation of stagnation point Nu as a function of H/B for various velocities

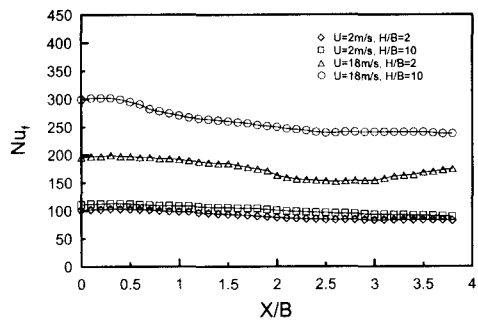


Fig. 6 Distribution of local Nu on flat plate as a function of X/B for various velocities and H/B

분류 영역으로 진행하면서 유속이 감소되고 확신이 일어나기 때문이다.

각각의 속도에 대해 H/B별 Nu_r 의 특성을 살펴보면 포텐셜 코어 영역인 H/B=2에서 가장 낮게 나타나는데 이것은 H/B=2에서는 분류가 충돌판에 충돌하기 전에 주위 정지 유체와의 혼합 작용이 충분하지 않기 때문^(9,11)이다.

그리고 U=18m/s, H/B=2일 때 분류가 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 가시화 실험에 의해 규명되었다.⁽¹⁵⁾

이상과 같이 2차원 충돌 분류 시스템에서 분류가 로드를 설치하지 않은 평판 전열면에 충돌할 때의 유동 특성 및 열전달 특성에 대하여 고찰한 결과, 분류가 평판에 충돌할 경우 Nu_r 는 정체점 이후 X방향으로 계속 감소하며, 포텐셜 코어 영역내에 충돌판이 설치되더라도 X/B=2.5 부근에서의 재상승 경향은 있지만 Nu_r 는 정체점보다 상대적으로 낮다.

따라서 충돌 분류계의 열전달 촉진을 위해서는 벽면 분류 영역내의 열전달 촉진 방안이 모색되어야 한다고 생각한다.

3.2 로드를 설치한 경우의 열전달 특성

Fig. 7은 U=18m/s, 로드와 로드 사이의 피치(P)가 30mm이고 충돌판의 위치가 노즐 출구폭의 2배(H/B=2)인 포텐셜 코어 영역에서, 로드와 전열면 사이의 간극(C) 변화에 대한 Nu_r 분포를 나

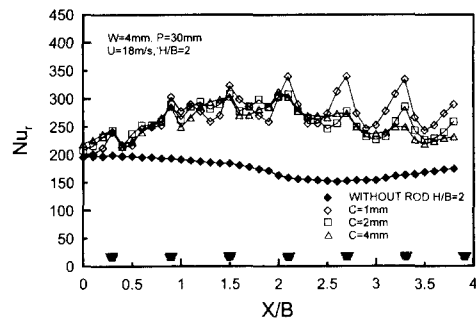


Fig. 7 Distribution of local Nu as a function of X/B for various clearances(P=30mm, H/B=2)

타낸 것으로 로드가 없는 평판과 비교하면 X/B 전영역에서 C변화와 관계없이 높게 분포되어 있다.

C변화와 관계없이 Nu_r 은 X방향으로 진행하면서 공통적으로 로드와 로드 사이에서 감소하다 점차 증가하며, 로드 밑에서 피크를 나타낸 후 다시 감소와 증가를 반복하는 현상을 나타낸다. 로드와 로드 사이에서 Nu_r 이 점차 증가하는 현상은 로드 위쪽에서 오는 분류가 로드 밑을 빠져나오는 분류를 누르면서 다시 전열면을 흐르도록 유도하기 때문이며, 로드 밑에서 Nu_r 이 피크를 이루는 것은 로드 밑에서 발생하는 유체의 가속^(9,11) 때문이다. 특히 C가 작을수록 이와 같은 현상은 두드러지게 나타난다.

C변화와 관계없이 로드 직후에서 Nu_r 이 급격하게 낮아지는 것은 분류가 로드 바로 밑을 지나면서 전열면에서 이탈하는 박리 현상^(9,11) 때문이다.

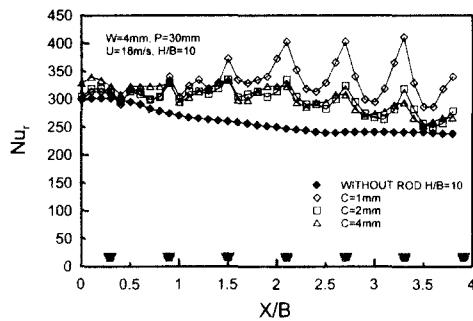


Fig. 8 Distribution of local Nu as a function of X/B for various clearances(P=30mm, H/B=10)

또한 X방향으로 진행할수록 열전달 성능이 점차적으로 낮아지는데 이것은 분류의 확산과 로드에 의한 저항으로 운동량이 감소하기 때문인 것으로 생각한다.

C변화에 대한 영향을 살펴보면 C가 작을수록 열전달 성능은 우수한데 특히 충돌 영역에서는 C변화에 대한 차이가 거의 없으나 벽면 분류 영역으로 진행할수록 그 차이는 뚜렷하게 나타난다.

Fig. 8은 천이 영역인 H/B=10인 위치에 충돌판을 설치한 경우로서 Fig. 7의 H/B=2와 비교할 때 전체적인 경향은 유사하지만 Nu_r 은 높게 나타난다. 열전달 촉진율면에서 보면 로드가 없는 경우와 비교할 때 H/B=2에서의 열전달 촉진율 보다는 낮다.

이것은 H/B=10인 경우에는 분류의 난류 강도가 충분히 성장하여 충돌하므로써 로드에 의한 영향은 크지 않다.

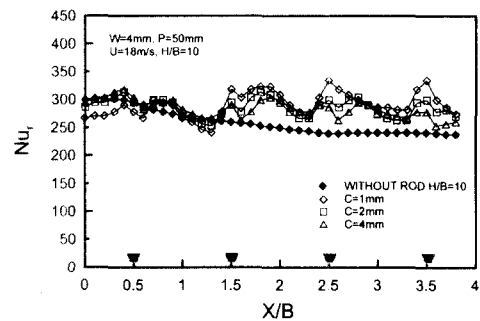


Fig. 10 Distribution of local Nu as a function of X/B for various clearances(P=50mm, H/B=10)

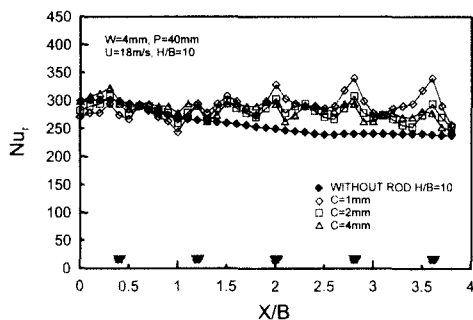


Fig. 9 Distribution of local Nu as a function of X/B for various clearances(P=40mm, H/B=10)

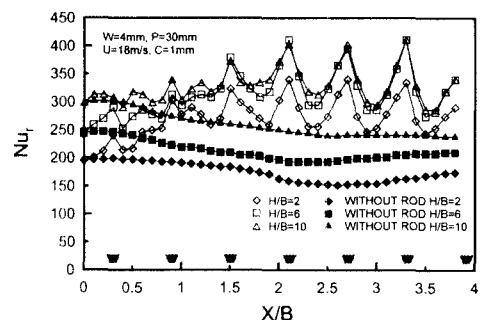


Fig. 11 Distribution of local Nu as a function of X/B for various H/B (P=30mm, C=1mm)

그러나 H/B=2에서는 난류 강도가 충분히 발달하지 않은 상태에서 충돌하지만 벽면 분류 영역으로 진행하면서 로드와 관련한 영향을 받기 때문에 로드를 설치하지 않은 평판에 비해 열전달 촉진율은 크게 향상된다.

C변화에 대한 영향을 살펴 보면 C=1mm일 때 4, 5, 6번째 로드 밑에서 Nu_r 이 약 410정도로 본 실험 조건 범위내에서 최대값을 나타내며 벽

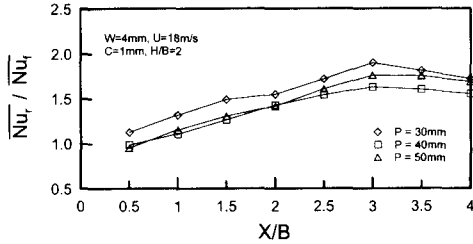


Fig. 12 Comparison of average local Nu on flat plate with and without rods for various pitches(C=1mm, H/B=2)

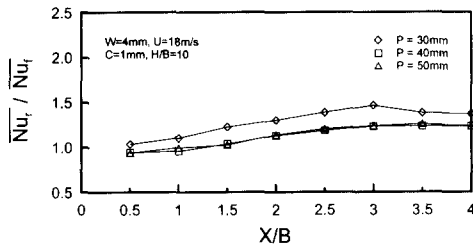


Fig. 13 Comparison of average local Nu on flat plate with and without rods for various pitches(C=1mm, H/B=10)

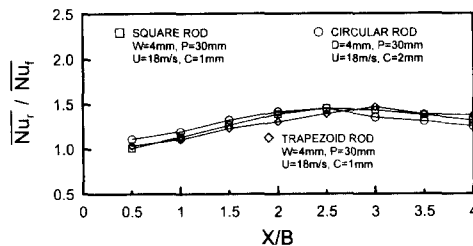


Fig. 14 Comparison of heat transfer enhancement rate on square, circular and trapezoid rod (H/B=10)

면 분류 영역으로 진행할수록 C변화에 대한 영향이 크게 나타난다.

Fig. 9와 10은 P가 각각 40, 50mm, H/B=10인 경우로서 P=30mm일 때와 마찬가지로 C가 작을수록 Nu_r 은 높게 나타나며 C변화와 관계없이 Nu_r 은 로드 밑에서 높게 나타나고 로드와 로드 사이에서는 증가와 감소를 반복한다.

지금까지 C변화에 대한 영향을 살펴보면 충돌판의 위치에 관계 없이 C가 작을수록 벽면 분류영역에서 열전달 성능은 향상된다.

Fig. 11은 U=18m/s, P=30mm, C=1mm일 때 H/B변화에 따른 Nu_r 분포와 로드를 설치하지 않은 경우의 Nu 분포를 나타낸 것으로, 충돌영역을 제외한 전 영역에서 로드를 설치한 H/B=2의 열전달 성능이 로드가 설치되지 않은 H/B=10의 열전달 성능 보다 매우 높다. 즉 자유 분류영역 내에서 주위 유체와의 혼합 작용이 충분치 않은 포텐셜 코어 영역이라도 로드를 설치하게 되면 로드가 설치되지 않은 천이 영역인 H/B=10에서의 열전달 성능보다 높아진다. 따라서 이와 같은 결과는 열교환 장치의 소형화에 중요한 자료가 될 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 12는 U=18m/s, H/B=2, C=1mm인 조건에서 P가 각각 30, 40, 50mm로 변화될 때 로드를 설치하지 않은 경우의 평균 Nu_f 와 로드를 설치한 경우의 평균 Nu_r 의 비를 나타낸 것으로 P=30mm인 경우가 열전달 촉진율이 가장 높게 나타난다. 이것은 P=30mm일 때가 P=40, 50mm일 때보다 로드의 개수가 상대적으로 많기 때문에 와류 및 가속에 의한 영향을 더 많이 받기 때문이며 국부적으로는 X/B=3 부근에서 로드가 없는 평판에 비해 약 1.9배정도의 열전달 촉진율을 보이고 있다.

Fig. 13은 U=18m/s, H/B=10, C=1mm인 경우로서 P=30mm일 때 X/B=3 부근에서 약 1.47배의 열전달 촉진율이 나타났으며 P=40mm와 50mm의 경우에는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

3.3 사각 및 원형 로드와의 열전달 특성 비교

충돌 공기 분류계의 열전달 특성에 관한 연구 가운데 지금까지 보고된 연구 결과들을 검토하면 로드와 관련한 난류 촉진 방법이 큰 효과를 거두고 있다. 따라서 이 분야에 대한 연구 결과들과의 비교도 매우 중요하다고 생각되기 때문에 로드

형상이 원형인 조건과 사각인 조건에서의 실험 결과들을 본 연구 결과와 정량적으로 비교 검토하였다.

Fig. 14는 원형 로드, 사각 로드 및 본 실험 결과 중 $H/B=10$ 에서 평균 열전달 촉진율을 비교한 것으로 원형 로드 직경은 4mm(조건 : $U=18\text{m/s}$, $C=2\text{mm}$, $P=40\text{mm}$)⁽⁹⁾ 사각 로드의 폭은 $W=4\text{mm}$ (조건 : $U=18\text{m/s}$, $C=1\text{mm}$, $P=30\text{mm}$)⁽¹¹⁾이다.

$X/B < 2$ 영역에서 원형 로드의 열전달 촉진율은 다른 두 형태의 결과보다 다소 높게 나타나는데, 이것은 이 영역이 충돌 영역이기 때문에 분류가 직접 로드위에 충돌하고 따라서 원형 로드가 사각이나 사다리형 로드보다는 저항을 작게 주고 또한 로드 주변의 분류가 쉽게 전열면에 충돌될 수 있기 때문으로 생각한다.

그러나 $X/B > 2$ 영역에서 원형 로드의 열전달 촉진율은 감소하는 반면 사각 로드와 사다리형 로드의 열전달 촉진율은 원형 로드보다 높게 나타나는데 이것은 이 영역이 벽면 분류 영역이기 때문에 사각이나 사다리형 로드는 로드 측면에서 발생하는 와류와 로드 밑 부분에서의 가속 효과^(9), 11)가 작용하기 때문이다. 반면 원형 로드인 경우에는 로드 밑의 단면적이 사각이나 사다리형 로드보다 작기 때문에 가속에 의한 영향은 크지 않다.

이상과 같은 비교를 통해서 볼 때 원형 로드인 경우에는 와류와 가속 효과는 작지만 분류의 재부착이 용이하고 로드와 로드 사이의 유동 저항이 다른 두 형태의 로드와 비교 작다는 장점이 있으며, 사각이나 사다리형 로드는 로드 측면에서 발생하는 와류와 로드 밑 부분에서의 가속 효과가 크게 작용한다는 장점이 있다.

즉 세가지 형태의 로드와 비교한 실험 결과를 비교한 결과 원형 로드일때는 충돌 영역에서, 사각 및 사다리형 로드인 경우에는 벽면 분류 영역에서 상대적으로 열전달 촉진율이 높게 나타났다.

4. 결론

본 연구는 2차원 충돌 공기 분류계에서 열전달 촉진율 목적으로 전열면 앞에 사다리형 로드를 설치하고 로드와 전열면 사이의 간극($C=1, 2, 4\text{mm}$), 로드와 로드사이의 피치($P=30, 40,$

50mm), 노즐 출구와 충돌판까지의 거리($H/B=2, 10$)를 변화시킬 때의 열전달 특성을 실험적으로 규명하고, 로드를 설치하지 않은 평판의 경우와 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 로드를 설치하지 않은 평판의 경우에는 정체점 이후 Nu_f 가 계속적으로 감소하지만, 로드를 설치할 경우에는 로드 측면에서의 와류 발생, 유체의 가속 등에 의해서 정체점보다 높은 Nu_f 를 얻을 수 있으며 국부적으로는 로드를 설치하지 않은 평판보다 약 1.9배의 최대 국부 열전달 촉진율이 나타났다.

(2) 로드와 전열면사이의 간극을 변화시킬 경우, 간극이 작을수록 와류 및 가속 효과가 커져서 열전달 성능은 좋아진다.

(3) 로드의 피치를 변화시킨 경우, 피치가 30mm일 때 열전달 성능이 가장 우수하다.

(4) 원형, 사각 및 사다리형 로드의 열전달 촉진율을 비교하면, 원형 로드일때는 충돌 영역에서, 사각 및 사다리형 로드인 경우에는 벽면 분류 영역에서 상대적으로 열전달 촉진율이 높게 나타났다.

후 기

본 연구를 수행하는데 있어 실험 장치 제작 및 실험 과정에 참여한 한라대학교 기계공학부 김명진, 정석현, 조승환군에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Carlo, C., 1999, "An Experimental Investigation on Air Impinging Jets Using Visualization Method," *In. J. Thermal Science*, Vol. 38, pp. 808~818.
- (2) Lee, J. H. and Lee, S. J., 2000, "The Effect of Nozzle Aspect Ratio on Stagnation Region Heat Transfer Characteristics of Elliptic Impinging Jet," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 555~575.
- (3) Gau, C. and Lee, I. C., 2000, "Flow and Impingement Cooling Heat Transfer along Triangular Rib-Roughened Walls," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 4405~4418.
- (4) Popiel, C. O. and Boguslawski, L., 1986, "Heat

- Transfer from a Rotating Disk in an Impinging Round Jet," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 108, pp. 357~364.
- (5) Khan, M. M., 笠木伸英, 平田賢, 1980, "衝突噴流熱傳達の増進技術に關する研究(第2報)," 第18回日本傳熱シンポジウム講演論文集, pp. 37~39.
- (6) 금성민, 정동수, 김종보, 1998, "MESH에 의한 열전달 증진에 관한 연구," 대한기계학회논문집 B권 제22권 제5호, pp. 716~724.
- (7) 김상필, 1987, "衝突空氣噴流의 熱傳達增進에 關한 實驗的 研究," 인하대학교 박사학위논문.
- (8) 박성수, 1993, "旋回衝突噴流의 熱傳達 增進에 關한 研究," 인하대학교 박사학위논문.
- (9) 이용화, 1989, "2次元 衝突噴流系에서의 熱傳達 增進技術에 關한 研究," 인하대학교 박사학위논문.
- (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 Res.* 24(2), pp. 193~207.
- (11) 琴聲民, 1994, "衝突空氣噴流 熱傳達の 增進 技術에 關한 研究," 인하대학교 박사학위논문.
- (12) Incropera, F. P., 2000, *Introduction to Heat Transfer*, John Wiley & Sons.
- (13) Goldstein, R. J. and Timmers, J. F., 1982, "Visualization of Heat Transfer from Arrays of Impinging Jet," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 25, pp. 1857~1868.
- (14) Gau, C. and Chung, C. M., 1991, "Surface Curvature Effect on Slot-Air-Jet Impingement Cooling Flow and Heat Transfer Process," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 858~864.
- (15) 최두섭, 1992, "2次元 衝突噴流系에서의 亂流促進體에 의한 傳熱增進에 關한 研究," 인하대학교 석사학위논문.