

충돌분류계에서 사다리형 로드를 이용한 열전달증진에 관한 연구

임태수* · 김성민** · 이창언***

A Study on the Heat Transfer Enhancement by Trapezoid Rod in Impinging Jet System

T. S. Lim, S. M. Kum and C. E. Lee

Key Words: Impinging Jet(충돌분류), Trapezoid Rod(사다리형 로드), Turbulence Promoter(난류촉진체), Heat Transfer Augmentation(열전달 증진)

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. In this study, 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, 4mm), (b) the pitch between each rods(P=30, 40, 50mm), (c) the distance from nozzle exit to flat plate(H/B=2, 6, 10).

And this research compared the above with the experiment without trapezoid rods. As a result, heat transfer performance was best under the condition of C=1mm and as the pitch is 30mm. In this case, maximum rate of heat transfer augmentation is about 1.9 times greater compared to that without trapezoid rods

1. 서 론

최근 지적되고 있는 에너지자원의 유한성으로 인해 에너지의 효율적 이용과 관련된 열전달증진에 관한 연구는 그 중요성이 증대되고 있다.

열전달증진의 대표적인 방법으로 대류 열교환기를 대상으로 하는 충돌공기분류 시스템이 있는데, 이 시스템은 충돌영역에서 발생하는 대규모 와류(large scale eddy)에 의해 높은 열 및 물질 전달계수를 얻을 수 있기 때문에^(1, 2) 이 방법의 개발은 대단히 중요하다고 할 수 있다.

충돌분류시스템은 물체의 표면을 냉각하거나 가열에 응용될수 있는데 공업적인 예로서 고온물체의 급속냉각, 직물 및 공업용재료 등의 건조, 가스터어빈 날개의 냉각과 최근에는 전자부품의 냉각 등에 이용^(3, 4)되고 있다.

그러나 충돌분류시스템은 정체점 이후 벽면분류영역으로 진행할수록 분류의 속도감소와 온도경계층의 발달로 열전달성능은 정체점에 비해 상대적으로 낮아지기 때문에 벽면분류영역에서의 열전달증진에 관한 필요성이 대두되게 되었으며 이 분야에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

벽면분류영역에서 열전달성능을 향상시키기 위해서 노즐과 전열면사이에 다공판이나 메쉬를 설치하는 방법^(5, 6), 전열면적을 확대시키는 방법⁽⁷⁾, 노즐에 twisted tape 등을 삽입하여 분류를 선회시키는 방법⁽⁸⁾들이 발표되었다.

최근에는 전열면앞에 난류촉진체를 설치하여 열

* 인하대학교 산업대학원

** 한라대학교 기계공학부

*** 인하대학교 기계·항공자동차공학부

전달성을 향상시키는 방법이 주목을 받고 있는데, 이⁽¹⁰⁾는 전열면 앞에 원형로드를 설치하고 난류촉진체의 직경, 피치, 로드와 전열면간의 간극을 변화시킨 경우 벽면분류영역에서 평판전열면에 비해 국부적으로 약 2배의 열전달증진 효과가 있었으며, 간극이 작을수록 열전달증진이 우수함을 실험적으로 규명하였다.

Kum⁽⁹⁾은 사각로드를 전열면 앞에 설치한후 로드와 전열면사이의 간극을 변화시키면서 실험한 결과 벽면분류영역에서도 높은 열전달율을 확보할수 있었으며, 로드가 없는 경우와 비교한다면 평균 약 1.35배 정도의 열전달증진효과가 나타났는데 이것은 주로 로드밑에서 분류의 가속효과에 의한 것으로 보고하고 있다.

지금까지의 연구결과들을 요약하면 충돌영역에서 정체점의 열전달성은 와류에 의해서 지배되며, 벽면분류 영역에서의 열전달성은 노즐 출구속도, 노즐 출구로부터 충돌판까지의 거리 등에 따라 다소의 차이가 있지만, 분류의 재부착 및 박리, 난류강도 등에 의해 좌우되고, 로드를

설치할 경우에는 로드에 의한 난류발생 및 재부착, 로드직전에서의 와류발생, 로드와 전열면사이의 간극에 의한 유체의 가속 등으로 벽면분류영역의 열전달성능이 향상되기 때문에 로드의 형상 및 설치조건이 매우 중요하다. 특히 로드를 이용한 연구결과들중 벽면분류영역의 열전달성능에 지배적인 인자는 로드밑부분에서 일어나는 유체의 가속효과이기 때문에 가속을 용이하게 할수 있는 로드의 형상에 대한 고찰이 무엇보다 중요하다고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 충돌분류시스템에서 벽면분류영역의 열전달증진을 목적으로 로드밑부분에서 분류의 가속을 용이하게 할수 있는 로드 형상을 고안하였다. 로드의 형상은 양쪽 측면이 경사진 사다리형으로서 로드 밑부분의 폭과 높이가 4mm이며 측면 경사각은 70°이다. 이 로드를 평판전열면 앞에 설치한 후, 로드의 피치, 노즐출구와 전열면 사이의 거리 및 로드와 전열면 사이의 간극을 변화시키면서 이때의 유동특성과 열전달특성을 실험적으로 규명하고 또한 로드를 설치하지 않은 평판의 경우와 비교, 분석하고 동시에 기존의 원형로드⁽¹⁰⁾ 및 사각로드⁽¹¹⁾의 연구결과와 비교하므로써 충돌분류시스템에서 로드를 이용한 열전달증진기술에 중요한 기초적 자료를 제시하고자 한다.

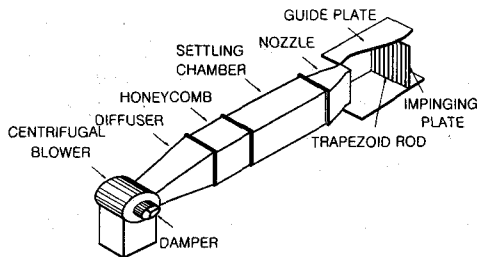


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 공기는 원심식

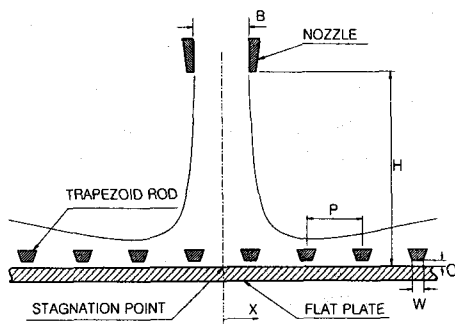


Fig. 2 Impinging flat plate-trapezoid rods array system(top view)

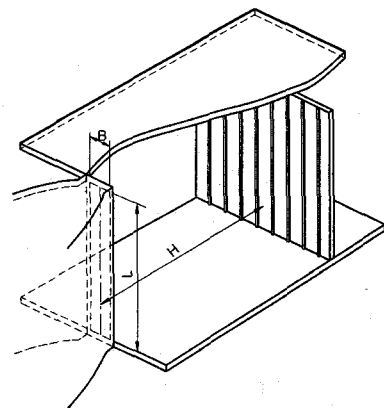


Fig. 3 Coordinate system of flat plate with rods(side view)

송풍기에서 보내지며 유량은 유량조절 댐퍼에 의해 조절되고 와이어 메쉬와 디퓨저를 지나 하니컴과 세틀링챔버에 의해 균일화 되면서 노즐을 통해 분출된다. 또한 2차원 분류가 되도록 분출 후의 유로상하면에는 평행판을 설치하였으며 충돌판은 전후 이동이 가능하도록 하였다.

노즐의 형상은 축방향 및 폭방향으로 균일한 속도분포를 위해 입구폭 250mm, 출구폭 50mm, 높이 500mm, 길이 300mm인 sine곡선형 사각노즐이다.

Fig. 2, 3은 평판전열면 앞에 사다리형로드를 설치한 경우의 좌표계로서 로드폭을 W, 로드와 전열면간의 간격을 C, 로드사이의 피치를 P, 노즐출구폭을 B, 노즐높이를 L, 평판의 정체점(Stagnation point)으로 부터 노즐 출구폭 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.

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

전열면의 가열은 $q=1020W/m^2$ 의 등열유속 조건으로 하여 통전가열하였으며, 전열면의 온도측정은 스테인레스 박판 뒷면에 직경 0.127mm의 열전대(T-type, Omega) 40개를 정체점으로 부터 5mm 간격으로 부착하여 Data Logger(Fluke Co, Helios I)에 연결하고, 전열면이 정상상태에 도달한 것을 확인한 후 5초 간격으로 반복측정하여 평균온도를 읽었다.

온도측정은 자유분류의 유속측정으로 부터 좌우 대칭성을 확인했기 때문에 정체점으로 부터 한방향으로만 측정하였고 이때 분류의 온도범위는 $19 \pm 1^\circ C$ 였으며 사용된 물성치는 참고문헌⁽¹³⁾을 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 로드를 설치하지 않은 경우의 열전달특성

Fig. 5는 로드를 설치하지 않은 평판 전열면에 분류가 충돌할 때 노즐 출구속도(U) 변화에 따른 정체점에서의 열전달특성을 나타낸 것으로 정체

점에서의 Nu_r 는 H/B가 증가함에 따라 서서히 증가하기 시작하여 본 실험범위내에서는 H/B=10에서 최대가 된다. Nu_r 가 노즐 출구속도 변화에 관계없이 H/B=10에서 최대가 되는 것은 분류가 전열면에 충돌하기 전에 주위유체와의 혼합작용이 충분히 이루어져 난류강도가 증가되었기 때문이며^(12, 14) 노즐형상변화에 따라 약간의 차이는 있지만 최대 열전달계수를 얻을수 있는 위치는 천이영역(노즐출구폭의 약 8~12배 위치)이라는 것이 많은 연구결과에서 밝혀진바 있다.

Fig. 6은 정체점으로 부터 X방향의 Nu_r 를 각각의 속도와 H/B에 대하여 나타낸 것이다. 전체적으로 Nu_r 는 정체점 이후 X방향으로 진행할수록

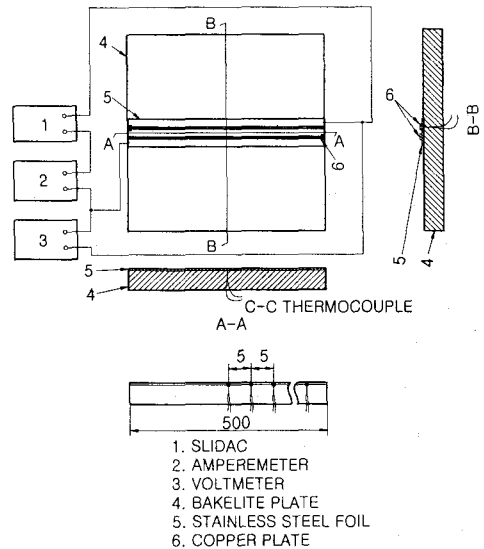


Fig. 4 Detail diagram of heating apparatus

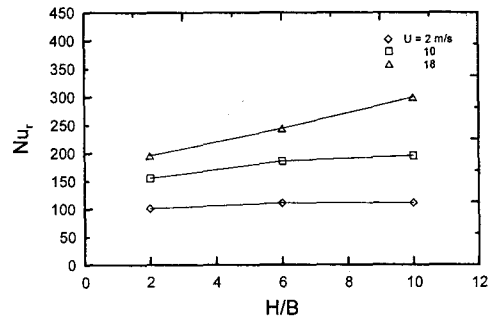


Fig. 5 Variation of stagnation point Nu as a function of H/B for various velocities

감소하고 있는데 이것은 분류가 벽면분류영역으로 진행하면서 유속이 감소되고 확산이 일어나기 때문이다.

각각의 속도에 대해 H/B별 Nu_r 의 특성을 살펴보면 포텐셜코어영역인 H/B=2에서 가장 낮게 나타난다. 이것은 H/B=2에서는 분류가 충돌판에 충돌하기 전에 주위 정지유체와의 혼합작용이 충분하지 않기 때문에 일어나는 현상^(10, 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 가시화실험에 의해 규명되었다⁽¹⁵⁾.

이상과 같이 2차원 충돌분류시스템에서 로드를 설치하지 않은 평판 전열면에 충돌할 때의 유동 특성 및 열전달특성에 대하여 고찰한 결과, 분류

가 평판에 충돌할 경우 Nu_r 는 정체점 이후 X방향으로 계속 감소하며, 포텐셜코어영역내에 충돌판이 설치되더라도 X/B=2.5 부근에서의 재상승 경향은 있지만 Nu_r 는 정체점보다 상대적으로 낮다.

따라서 충돌분류계의 열전달증진을 위해서는 벽면분류영역내의 열전달증진방안이 모색되어야 한다고 생각한다.

3.2 로드를 설치한 경우의 열전달특성

Fig. 7은 U=18m/s, 로드와 로드사이의 피치(P)가 30mm이고 충돌판의 위치가 노즐출구폭의 2배(H/B=2)인 위치에서, 로드와 전열면 사이의 간극(C) 변화에 대한 Nu_r 의 분포를 나타낸 것으로, 여기서 Nu_r 은 정체점 부근을 제외한 X/B 전열영역에서 C변화에 관계없이 정체점보다 매우 높게 나타나며 로드가 없는 평판과 비교해 보면 전열영역에서 높게 분포되어 있다.

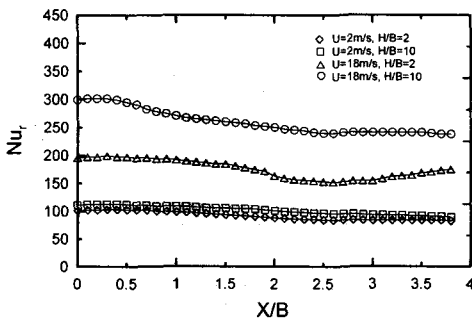


Fig. 6 Distribution of local Nu on the flat plate as a function of X/B for various velocities and H/B

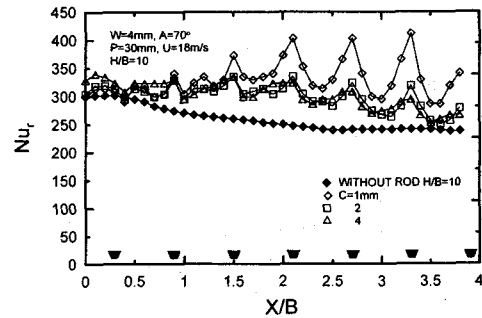


Fig. 8 Distribution of local Nu as a function of X/B for various clearances (P=30mm, H/B=10)

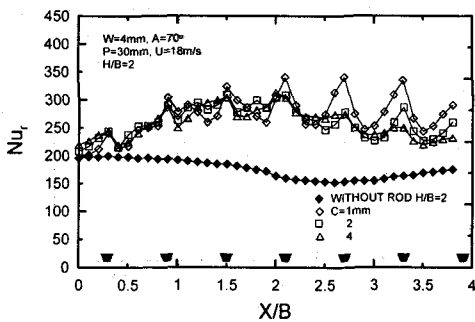


Fig. 7 Distribution of local Nu as a function of X/B for various clearances (P=30mm, H/B=2)

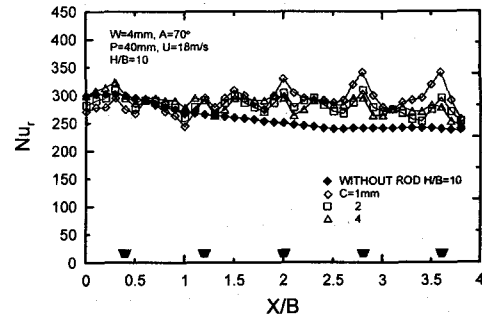


Fig. 9 Distribution of local Nu as a function of X/B for various clearances (P=40mm, H/B=10)

C변화와 관계없이 로드 바로 밑에서 Nu_r 이 높게 나타나는 것은 로드 바로 밑에서 일어나는 유체의 가속효과 때문이며 C변화에 의한 가속효과의 영향을 살펴보면 C=1mm인 경우가 2, 4mm에 비해 높게 나타난다. 그리고 C변화와 관계없이 로드 직후에서 Nu_r 이 급격하게 낮아지는데 이것은 분류가 로드 밑을 지나면서 전열면에서 이탈하는 박리현상^(11, 15) 때문이며 X방향으로 진행할수록 박리점에서 Nu_r 은 계속 낮아지고 있다. 또한 X방향으로 진행할수록 유체는 로드의 측면지향으로 인한 운동량 감소와 확산으로 Nu_r 은 점차적으로 감소한다.

Fig. 8은 천이영역인 H/B=10인 위치에 충돌판을 설치한 경우로써 Nu_r 분포 경향은 Fig. 7의 H/B=2와 유사하나 로드를 설치하지 않은 평판과 비교해볼때 H/B=2에서의 열전달증진율 보다는 낮다. 이것은 H/B=10인 경우에는 주위유체와의 혼합이 충분히 이루어져 난류강도가 성장하여 충돌하기 때문에 로드와 인한 증진효과는 작은 반면, H/B=2에서는 난류강도가 충분히 발달하지 않은 상태에서 충돌하지만 벽면분류 영역으로 진행하면서 로드와 의해 난류효과가 크게 작용하기 때문이다.

Fig. 9와 10은 P가 각각 40, 50mm인 경우로서 C변화에 대한 Nu_r 분포 경향은 P=30mm일때와 마찬가지로 C가 작을수록 높게 나타난다.

지금까지 C변화에 대한 영향을 살펴보면 충돌판의 위치에 관계없이 C가 작을수록 벽면분류영역에서 열전달성능은 향상된다.

Fig. 11은 U=18m/s, H/B=2, C=1mm인 조건에서 P가 각각 30, 40, 50mm로 변화될 때 로드를

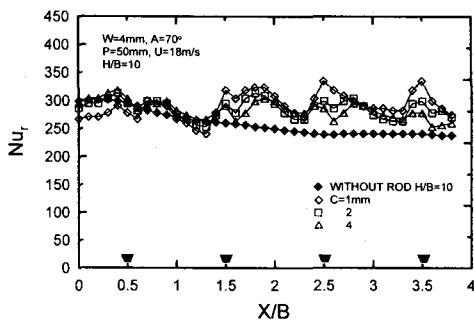


Fig. 10 Distribution of local Nu as a function of X/B for various clearances ($P=50\text{mm}$, $H/B=10$)

설치하지 않은 경우의 평균 Nu_r 와 로드를 설치한 경우의 평균 Nu_r 의 비를 나타낸 것으로 $P=30\text{mm}$ 인 경우가 열전달증진율이 가장 높게 나타난다. 이것은 $P=30\text{mm}$ 일때가 $P=40, 50\text{mm}$ 일때보다 로드의 개수가 상대적으로 많기 때문에 가속에 의한 영향을 더 많이 받기 때문이며 국부적으로는 $X/B=3$ 부근에서 로드가 없는 평판에 비해 약 1.9 배 정도의 열전달증진율을 보이고 있다.

Fig. 12는 U=18m/s, C=1mm, H/B=10인 경우로서 P=30mm일 때 $X/B=3$ 부근에서 약 1.47배의 열

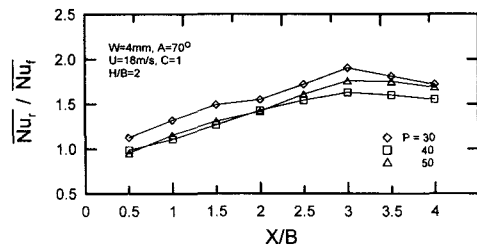


Fig. 11 Distribution of local average Nu as a function of X/B for various pitches ($C=1\text{mm}$, $H/B=2$)

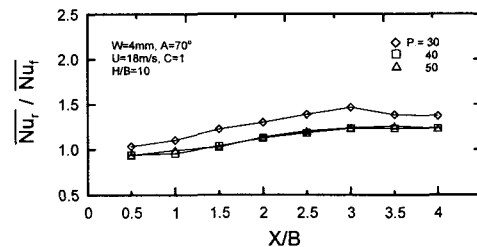


Fig. 12 Distribution of local average Nu as a function of X/B for various pitches ($C=1\text{mm}$, $H/B=10$)

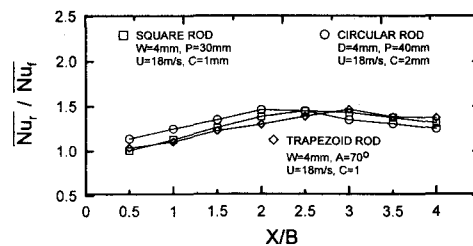


Fig. 13 Comparison of heat transfer augmentation rate on the square and circular rod ($H/B=10$)

전달증진율이 나타났으며 P=40mm와 50mm의 경우에는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

3.3 사각로드와 원형로드와의 열전달특성 비교

충돌공기분류계의 열전달특성에 관한 연구 가운데 지금까지 보고된 연구결과들을 검토하면 로드 에 의한 난류촉진방법이 큰 효과를 거두고 있다. 따라서 이 분야에 대한 연구 결과들과의 비교도 매우 중요하다고 생각되기 때문에 로드의 형상이 원형인 조건과 사각인 조건에서의 실험결과들을 본 연구결과와 정량적으로 비교 검토하였다.

Fig. 13은 원형로드, 사각로드 및 본 실험결과중 H/B=10에서 평균 열전달증진율을 비교한 것으로 원형로드 직경은 4mm(조건 : U=18m/s, C=2mm, P=40mm)⁽¹⁰⁾, 사각로드의 폭은 W=4mm(조건 : U=18m/s, C=1mm, P=30mm)⁽¹¹⁾이다.

충돌영역에서 원형로드의 열전달증진율이 다른 두결과에 비해 다소 높게 나타나는데 이것은 충돌영역에서는 분류가 직접 로드위에 충돌하기 때문에 원형로드가 사각이나 사다리형로드보다는 저항을 작게 주고 또한 로드 주변의 분류가 쉽게 전열면에 충돌될수 있는 원형의 형상이기 때문으로 생각한다.

X/B>2.5영역에서는 사각 및 사다리형로드의 열전달증진율이 높게 나타나는데, 이것은 사각이나 사다리형로드인 경우 로드 바로밑의 가속효과는 주로 벽면분류영역인 X/B>2.5 부근에서 큰 영향이 나타나기 때문이다. 즉 원형로드인 경우에는 로드 바로밑의 단면적이 사각이나 사다리형로드의 단면적보다 작기 때문에 가속에 의한 영향은 상대적으로 줄어든다.

세가지 형태의 로드 에 의한 실험결과 원형로드 일때는 충돌영역에서, 사각 및 사다리형로드인 경우에는 벽면분류영역에서 열전달증진율이 향상되는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 2차원 충돌공기분류계에서 열전달증진율 목적으로 전열면 앞에 사다리형로드를 설치하고 로드와 전열면사이의 간극(C=1, 2, 4mm), 로드와 로드사이의 피치(P=30, 40, 50mm), 노즐출구와 충돌판까지의 거리(H/B=2, 10)를 변화시킬 때의 열전달특성을 실험적으로 규명하고, 로

드를 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 설치 할 경우에는 로드 에 의한 난류생성, 유체의 가속 등에 의해서 정체점보다 높은 Nu_f 를 얻을 수 있으며 국부적으로는 로드를 설치하지 않은 평판보다 약 1.9배의 최대 국부열전달증진율이 나타났다.
- (2) 로드와 전열면사이의 간극을 변화시킬 경우, 간극이 작을수록 로드 바로 밑에서의 가속효과가 커져서 열전달성능은 좋아진다.
- (3) 로드의 피치를 변화시킨 경우, 피치가 30mm 일 때 열전달성능이 가장 우수하다.
- (4) 원형, 사각 및 사다리형로드의 열전달증진율을 비교하면, 원형로드일때는 충돌영역에서, 사각 및 사다리형로드인 경우에는 벽면분류영역에서 열전달증진율이 향상되는 것으로 나타났다.

후기

본 연구를 수행하는데 있어 실험장치제작 및 실험과정에 참여한 한라대학교 기계공학부 김명진, 정석현, 조승환군에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) C. Carlo, 1999, "An experimental investigation on air impinging jets using visualization method", In. J. Thermal Science, Vol. 38, pp. 808-818.
- (2) Lee JH, Lee SJ, 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, Lee I. C, 2000, "Flow and impingement cooling heat transfer along triangular rin-roughened walls", Int. J. Heat and Mass Transfer. Vol. 43, pp. 4405-4418.
- (4) C. O. Popiel, L. Boguslawski, 1986, "Heat Transfer from a Rotating Disk in an Impinging Round Jet", ASME J. Heat Transfer. Vol. 108, pp. 357-364.
- (5) M. M. Ali Khan, 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 열전달증진에 관한 연구", 대한기계학회논문집 B권 제22권 제5호, pp. 716-724.
- (7) 김상필, 1987, "衝突空氣噴流의 熱傳達増進에 關한 實驗的 研究", 인하대학교 박사학위논문.
- (8) 박성수, 1993, "旋回衝突噴流의 熱傳達 増進에 關한 研究", 인하대학교 박사학위논문.
- (9) S. M. Kum, Y. Gawaguchi, J. Y. Seo, 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.
- (10) 이용화, 1989, "2次元 衝突噴流系에서의 熱傳達増進技術에 關한 研究", 인하대학교 박사학위논문.
- (11) 금성민, 1994, "衝突空氣噴流 熱傳達の 増進技術에 關한 研究", 인하대학교 박사학위논문.
- (12) R. J. Goldstein, J. F. Timmers, 1982, "Visualization of Heat Transfer from Arrays of Impinging Jet", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 25, pp. 1857-1868.
- (13) F. P. Incropera, 2000, "Introduction to Heat Transfer", John Wiley & Sons.
- (14) C. Gau, C. M. Chung, 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, 금성민, 이용화, 서정윤, 1993, "충돌 공기분류계에서의 전열촉진기술에 관한 연구", 태양에너지학회논문집, 제13권 제1호, pp. 11-21.