

충돌공기분류계에서 사각 ROD 에 의한 전열증진 효과(포텐셜코어영역에서의 전열특성)

금성민, 오수철, 서정윤

인하대학교 기계공학과

Effect of Heat Transfer Augmentation by Square Rod Array in Impinging Air Jet System (Heat Transfer Characteristic of Potential Core Region)

Seong-Min Kum, Soo-Cheol Oh, Jeong-Yoon Seo

Department of Mechanical Engineering, Inha University

요 약

본 연구는 2차원 충돌분류계의 포텐셜코어영역($H/B=2$)내에서 전열증진을 목적으로 전열면 앞에 폭 6mm인 정 4각 rod군을 설치하고 rod와 전열면간의 간극($C=1, 2, 4, 6$ mm)과 rod와 rod 사이의 피치($P=30, 40, 50$ mm)를 변화시킬때의 유동특성과 전열특성을 실험적으로 규명하고 rod를 설치하지 않았을 경우와 비교·검토한 것으로 간극변화시에는 $C=1$ mm인 경우가 전열성능이 가장 우수하였으며, rod의 피치(P)를 변화시킨 경우에는 rod가 없는 평판에 비해 각각 약 1.6배의 평균전열증진율이 나타났다.

ABSTRACT

This research has been proceeded over the potential core region($H/B=2$) of two

-dimensional impinging air jet sytem, in which square rods(width of 6 mm) has been set up in front of heating surface in order to increase heat tranfer. The objective of this research was to investigate the characteristics of heat transfer and air flow, in cases of the clearance from rods to heating surface($C = 1, 2, 4, 6$ mm) and the pitch between each rods($P = 30, 40, 50$ mm) changed. And this research compared the above with the experimentation without rods. As result, heat transfer performance was best under the condition of $C = 1$ mm, in case clearance changed, and there was no serious difference in the effect of heat transfer augmentation in the case of pitch of rods changed.

NOMENCLATURE

A : Heat surface area	[m ²]
B : Nozzle exit width	[mm]
C : Clearance between the heating surface and rod	[mm]
h : Heat transfer coefficient	[W/m ² · °C]
I : Electric current	[Ampere]
H : Distance from nozzle exit to impinging flat plate	[mm]
L : Nozzle height	[mm]
P : Pitch of rods	[mm]
q : Heat flux	[W/m ²]
U : Axial velocity at nozzle exit	[m/s]
V : Voltage	[volt]
W : Width of rod	[mm]
X : Distance from stagnation point to the end of the flat plate	[mm]
$Nu = h \cdot B / \lambda$: Local Nusselt number	
$\overline{Nu} = \int_{-x}^x Nu \cdot dx / \int_{-x}^x dx$: Local average Nusselt number	
$Re = \frac{U \cdot B}{\nu}$: Reynolds number	

GREEK LETTERS

λ : Thermal conductivity	[W/m · °C]
ν : Kinematic viscosity	[m ² /°C]

SUBSCRIPTS

f : Flat plate without square rod
r : Flat plate with square rod

I. 서 론

충돌분류는 충돌영역에서 높은 열전달계수를 얻을수 있기때문에 고온물체의 냉각, 직물·종이등의 건조에 이용되고 있으며 최근에는 전자장비의 냉각에도 적용되고 있다^{1,8)}. 그러나 충돌분류는 충돌영역을 벗어나 벽면분류영역으로 진행할수록 분류의 속도감소와 확산으로 인해 전열성능은 급격한 감소하며 특히 충돌판이 포텐셜코어영역(충돌판의 위치가 노즐출구폭의 6배 이내)^{3,4)} 내에 위치하면 초기 노즐에서 나온 분류는 충돌판까지의 거리가 짧기때문에 주위 정지유체와의 혼합작용이 충분하지 않은 상태

Fig 2, 3은 평판전열면 앞에 rod군을 설치한 경우의 좌표계로서 B는 노즐폭, W는 rod의 폭, C는 rod와 전열면사이의 간극, P는 rod와 rod사이의 피치, H는 노즐출구로부터 충돌판까지의 거리, X는 노즐폭 방향의 거리를 나타내며 X와 H를 각각 X/B, H/B로 무차원화하였고 노즐 중심은 전열면중앙부에 인접한 두개 rod사이의 중심선과 일치하도록 하였다.

Fig 4는 전열면의 형상을 나타낸 것으로 bakelite 판(500×500×20 mm)위에 스테인레스박판(두께 30 μm, 폭 10 mm, 길이 500 mm) 3매를 접착제로 접착하고 단면 B-B에 표시된 바와 같이 양끝을 동판으로 연결 한 다음 전선으로 연결하여 통전가열하였다. 이때의 열유속은 식 (1)과 같이 회로내 전류계의 전류와 스테인레스박판 양끝 전위차의 곱으로 구하였으며, 열유속은 $q=1020[W/m^2]$ 의 등열유속 조건이 유지되도록 자동전압조정기를 사용하여 출력전압을 일정하게 유지시켰다. 또한 상온에서 각 점의 온도를 측정 한 결과 각 점에서의 온도차는 $\pm 0.1^{\circ}C$ 였기 때문에 전열면은 일정한 열유속조건을 유지한것을 확인할수 있었다.

$$q=I \times V/A \quad (1)$$

전열면의 온도측정은 직경 70 μm의 C-C thermocouple(T-type)을 정체점에서 부터 노즐폭 방향으로 5 mm 간격씩 45개를 스테인레스박판 뒷면에 부착하고 data logger(Fluke, helios I)에 연결한 다음 3분 간격으로 10회 측정하여 평균온도차가 0.1°C 이하인 경우의 온도를 정상온도로 정했으며 bakelite 판(열전도율 0.042 kcal/m·°C)에서의 방출열량은 전체가열량의 0.125% 이내의 범위였기 때문에 bakelite 판을 통한 열손실은 무시하였다. 그리고 본 연구에서 구한 Re수의 불확실성은 ± 2 .

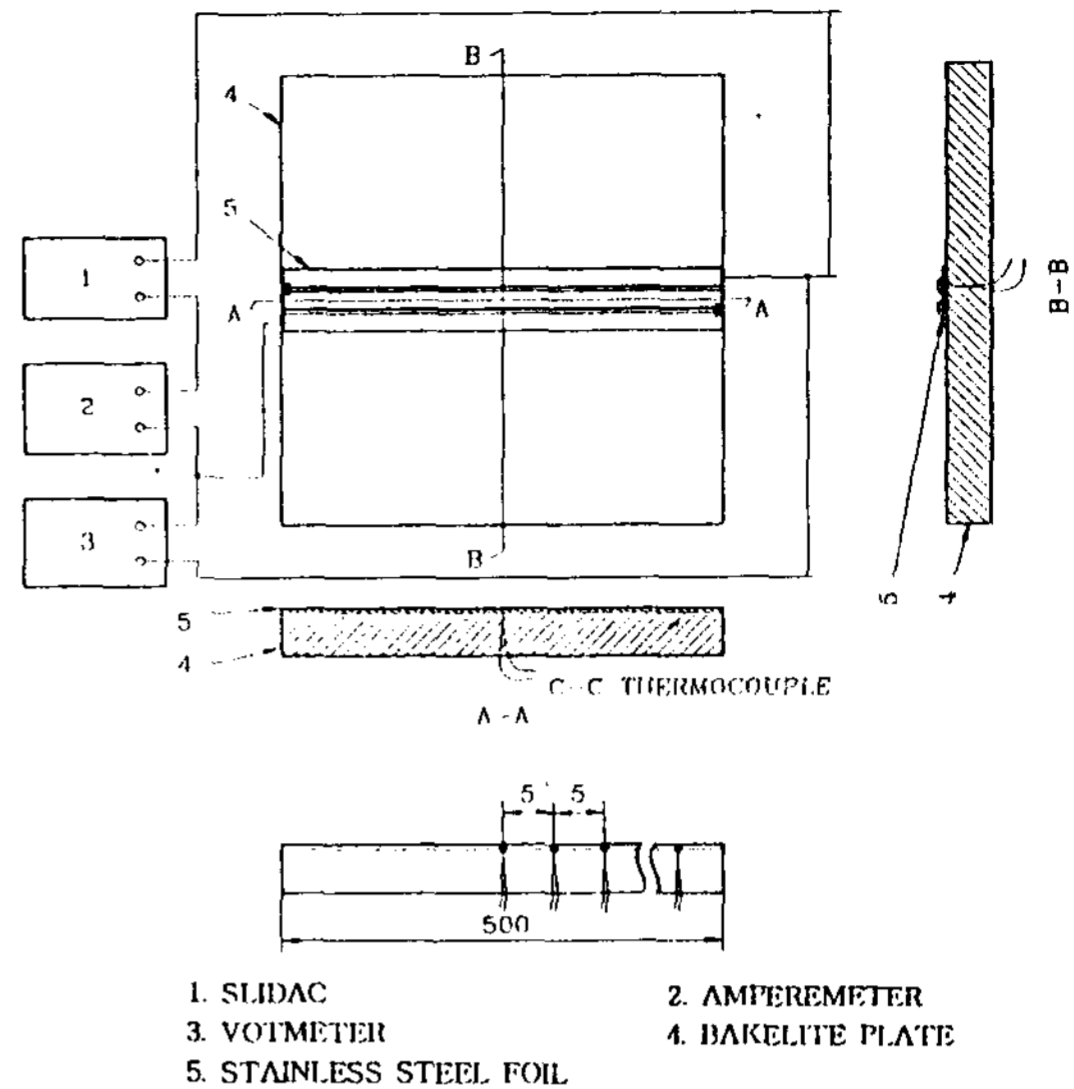


Fig. 4. The detail diagram of heating apparatus.

1%이고 Nu수의 불확실성은 $\pm 5.7\%$ 이다.

2. 실험조건

본 실험에 적용된 실험조건은 다음과 같다.

1. Reynolds number : $Re = 6.4 \times 10^3, 2.5 \times 10^4, 4.4 \times 10^4, 5.7 \times 10^4$
2. 노즐출구와 충돌판간의 거리 : $H=100$ [mm]
3. 전열면의 열유속 : $1020 [W/m^2]$
4. Rod(난류촉진체)의 형상 : 폭 6 mm 길이 500 mm인 정 4각 rod
5. Rod와 rod사이의 피치 : 30, 40, 50 [mm]
6. Rod와 전열면간 간극(clearance) : $C=1, 2, 4, 6$ [mm]
7. 분류의 형상 : 2차원 수평분류

III. 실험결과 및 고찰

1. Rod를 설치하지 않은 평판에서의 열전달특성

Fig 5는 포텐셜코어 영역에서 Re수가 변하

는 경우 정체점으로 부터 X 방향으로의 Nu_f 분포를 나타낸 것으로 Nu_f 는 정체점 이후 감소하다가 $X/B=2.5$ 부근에서 다시 상승하고 있다. 이러한 현상에 대해 C.Gau⁹⁾는 충돌판이 포텐셜코어 영역내에 위치했을 때 나타나는 특징적인 현상으로, 이것은 $X/B=2.5$ 부근에서 분류가 층류에서 난류로 전이하기 때문이라고 보고하고 있으며, 최¹⁰⁾는 노즐양끝에서 생성된 와류가 성장하여 $X/B=2.5$ 부근에서 전열면상의 온도경 계층을 박막화시키기 때문이라고 가시화 실험에 의해 밝히고 있다. 즉 평판에서의 전열성능은 정체점 이후 계속적으로 감소하며 $X/B=2.5$ 부근에서 Nu_f 의 재상승은 있지만 정체점에서의 Nu_f 보다는 낮기 때문에 전체적인 전열성능을 향상시키기 위해서는 벽면분류영역에서의 열전달을 향상시키는 방법이 모색되어야 한다고 생각한다.

따라서 본 연구는 포텐셜코어 영역인 $H/B=2$ 인 위치에 충돌판을 설치할 경우, rod의 설치조건 변화(간극 및 rod 피치 변화)에 따른 유동특성과 전열성능을 검토하고 벽면분류영역($X/B>2$)에서 rod가 설치되지 않은 평판의 전열성능과 비교하고자 한다.

2. Rod를 설치한 평판에서의 열전달특성

2.1 간극변화에 따른 특성

Fig 6은 Re수가 5.7×10^4 , rod사이의 피치(이하 P라 함)가 30 mm일 때 rod와 전열면 사이의 간극(이하 C라 함)변화에 대한 X 방향의 Nu_f 의 분포를 나타낸 것으로, 여기서 Nu_f 은 정체점 부근을 제외한 X/B 전영역에서 C의 변화에 관계없이 정체점보다 매우 높게 나타나며 rod를 설치하지 않은 평판(◆표시한 선)과 비교해 보면 정체점 부근을 제외한 전영역에서 높게 분포되어 있다.

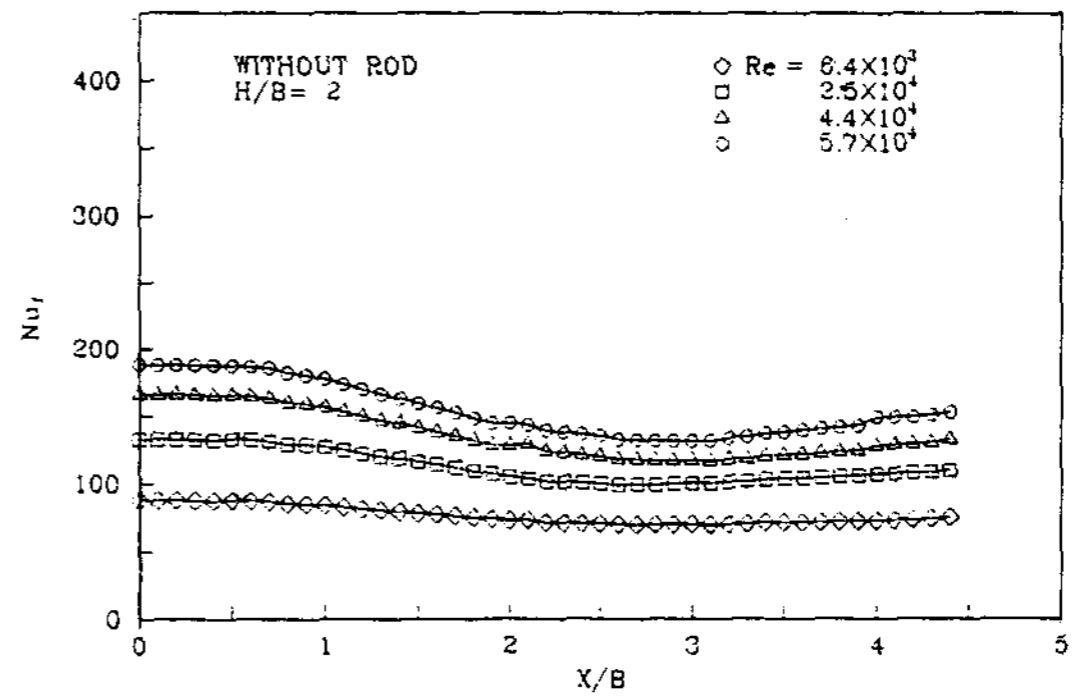


Fig. 5. The distribution of local Nusselt number on the flat plate as the Reynolds number change.

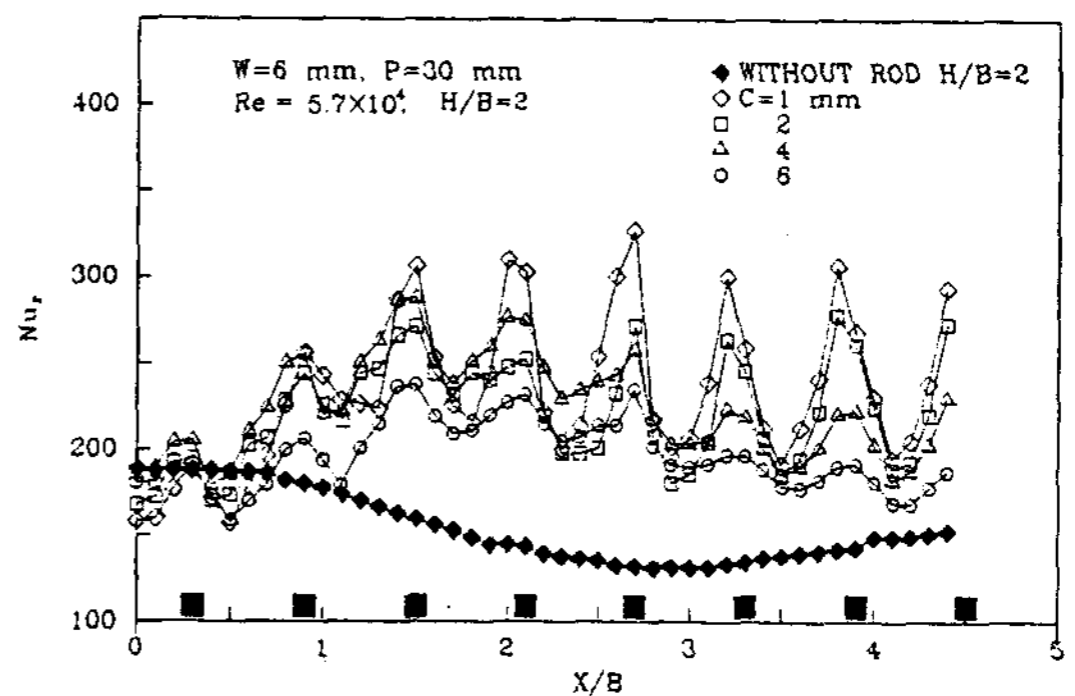


Fig. 6. The distribution of local Nusselt number on the flat and the rods change.

Rod를 설치한 경우, 정체점 부근에서의 Nu_f 이 rod를 설치하지 않았을 때보다 낮게 나타나는 것은 분류가 rod의 저항을 받기 때문에 벽면분류로의 진행이 원활하지 않아 약간의 정체현상이 일어나기 때문이며^{10,11)}, C의 변화와 관계없이 rod 바로 밑에서 Nu_f 이 최대값을 나타내는 것은 rod 바로 밑에서 일어나는 유체의 가속효과^{10,11)}때문이다. 즉 C의 변화에 의한 가속효과의 영향을 살펴보면 $C=1$

mm인 경우, $C=2, 4, 6$ mm에 비해 벽면분류영역에서 rod 바로 밑의 Nu_r 은 상대적으로 높는데 이것은 간극이 작을수록 유체의 가속효과가 크게 작용하기 때문이라고 생각한다. 그리고 C 의 변화와 관계없이 rod 직후에서 Nu_r 이 급격하게 낮아지는데 이것은 분류가 rod 바로 밑을 지나면서 전열면에서 이탈하는 박리현상 때문이며 X/B 가 커질수록 박리점에서 Nu_r 은 계속 낮아지고 있다. 즉 X/B 가 커질수록 유체는 rod의 측면저항으로 인한 운동량 감소와 확산으로 rod 바로 밑의 가속효과는 점차 줄어서 박리의 영향도 크게 받는다. 특히 5번째 rod까지는 rod 바로 밑에서 Nu_r 이 높게 나타나지만, 5번째 rod 이후($X/B > 3$)에서는 rod 직전의 Nu_r 이 rod 바로 밑의 Nu_r 보다 높게 나타난다. 이것은 rod 측면에 충돌하는 분류가 와류를 일으켜 이 부근의 온도경계층을 박막화시키기 때문이며, 이 효과는 rod 바로 밑에서의 가속효과에 의한 전열향상보다 크게 작용하므로 rod 바로 밑의 Nu_r 보다 높다. 따라서 $X/B=3$ (정체점으로 부터 150 mm) 이후의 영역이 되면 C 의 변화에 의한 rod 바로 밑의 가속 효과보다는 rod 직전에서의 와류에 의한 영향이 더 크게 작용하고 있음을 알 수 있으며, 이와같은 현상은 $C=2$ mm에서도 나타난다. 또한 C 의 변화에 대한 Nu_r 의 분포는 C 가 클수록 전체적으로 낮아지는 현상이 나타난다.

Fig 7은 $P=40$ mm인 경우로서 $C=1, 2$ mm일 때 $X/B < 2$ 영역의 rod와 rod 사이에서 Nu_r 이 높게 나타나는데 이것은 rod 위를 타고 넘어온 분류가 전열면에 재부착하기 때문이며 재부착에 의한 영향은 C 가 4, 6 mm인 경우에는 나타나지 않는다. 즉 C 가 작으면 전열면으로부터 전체적인 rod 높이가 낮아지고 따라서 상대적으로 rod 위를 타고 넘는 유체의 양도

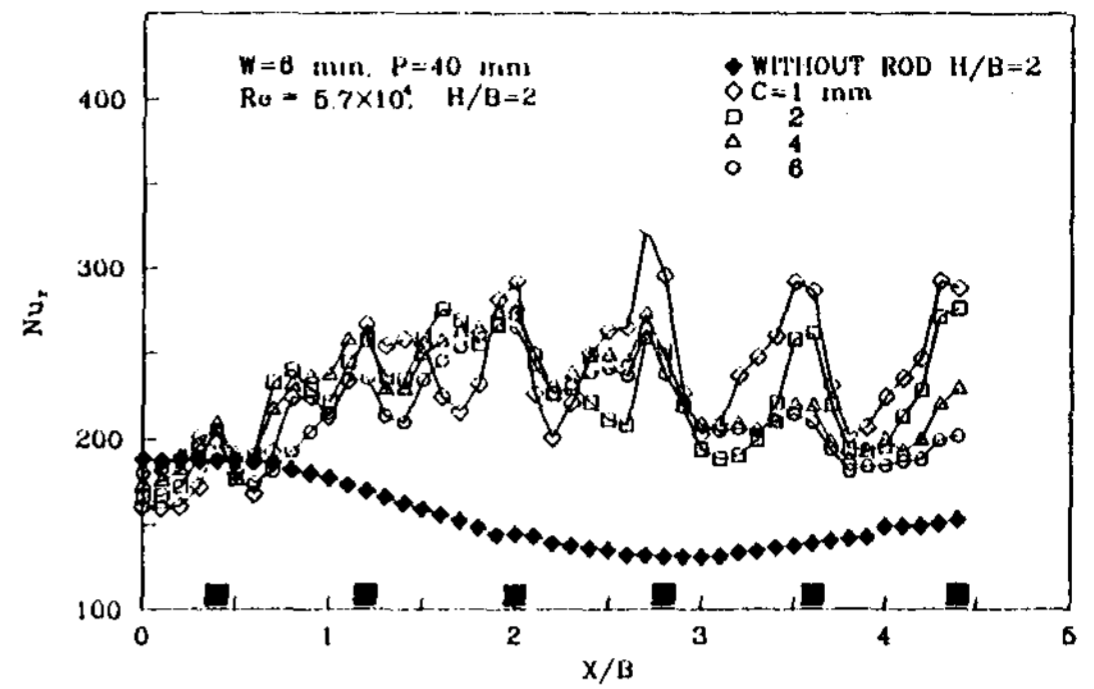


Fig. 7. The distribution of local Nusselt number as clearances between the flate plate and the rods.

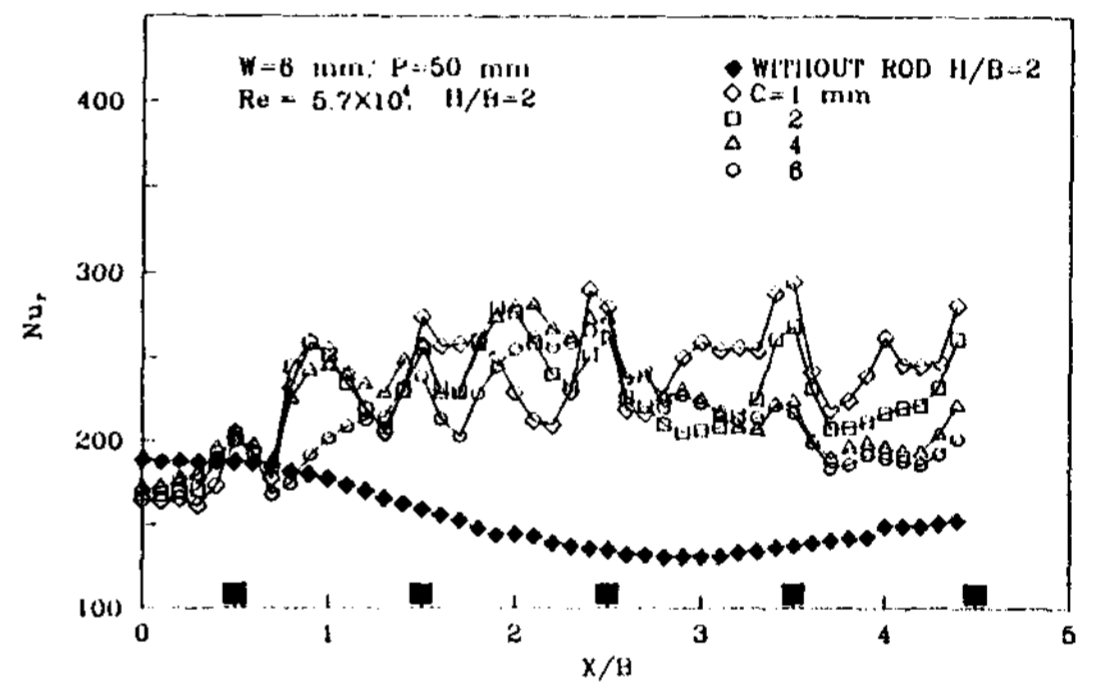


Fig. 8. The distribution of local Nusselt number as clearances between the flate place and the rods.

많아지기 때문에 재부착이 용이해진다. 또한 P 가 변해도 rod 바로 밑의 가속 효과는 지속적으로 일어나며 4번째 rod 직전에서 와류에 의한 영향이 나타나고 있다.

Fig 8은 $P=50$ mm인 경우로 $P=30, 40$ mm일 때와 동일하게 피치증가에 관계없이 C 가 작을수록 Nu_r 은 높게 나타나며 rod 바로 밑에서의 가속효과도 지속적으로 일어난다. 그러나 $P=30, 40$ mm와는 달리 rod 직전의 와류영향은 일어나지 않으며 재부착이 일어나는

구간을 살펴보면 $C=1\text{mm}$ 인 경우 $P=40\text{mm}$ 일 때는 $X/B < 2.5$ 영역에서만 일어났지만 $P=50\text{mm}$ 일 때는 X/B 전영역에서 일어나고 있다. 따라서 분류의 재부착은 rod 사이의 P 에 의해 지배됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 본 실험범위내에서 전열증진율이 가장 우수한 $P=50\text{mm}$ 인 경우에 C 의 변화에 대한 국부전열증진 효과를 나타낸 것으로 $C=1\text{mm}$ 일 때 4번째 rod 바로 밑에서 rod를 설치하지 않았을 때보다 약 2.1배의 전열증진율을 보이고 있으며, 특히, rod가 설치되지 않은 평판에서 정려성능이 낮게 나타나는 벽면분류영역에서 전체적으로 높은 전열효과가 나타나고 있다.

Fig. 10은 rod를 설치하지 않은 경우의 평균 Nu_r 와 rod를 설치한 경우의 평균 Nu_r 의 비를 나타낸 것으로 $C=1\text{mm}$ 일 때는 평균 1.61배, $C=2\text{mm}$ 일 때는 평균 1.53배, $C=4\text{mm}$ 일 때는 평균 1.5배, $C=6\text{mm}$ 일 때는 평균 1.42배의 전열증진율을 나타내고 있으며 최대 전열증진율이 나타나는 영역은 $X/B > 2.5$ 임을 알 수 있다.

지금까지 고찰한 C 의 변화에 대한 영향을 종합해보면 C 가 작을수록 rod 바로 밑의 가속 효과를 증진시키며, 박리 및 재부착에 의한 영향이 크게 나타난다.

2.2 Rod의 피치 변화가 열전달에 미치는 영향

2.1절에서 C 의 변화에 따른 열전달특성은 $C=1\text{mm}$ 인 경우가 가장 우수하였으므로 C 는 1mm 로 고정하고, P 가 30, 40, 50mm로 변할때의 전열특성을 rod가 없는 평판의 경우와 비교, 검토하고자 한다.

Fig. 11은 Re 수가 5.7×10^4 , $C=1\text{mm}$ 인 경우 P 변화에 의한 Nu_r 의 관계를 나타낸 것

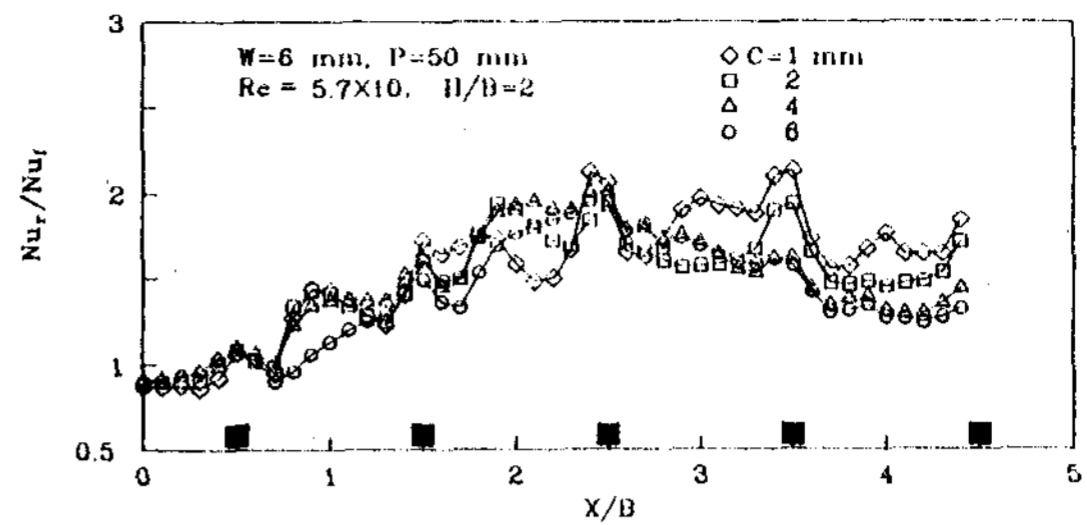


Fig. 9. The comparison of local Nusselt number on the flat plate with and without rods in case clearances change.

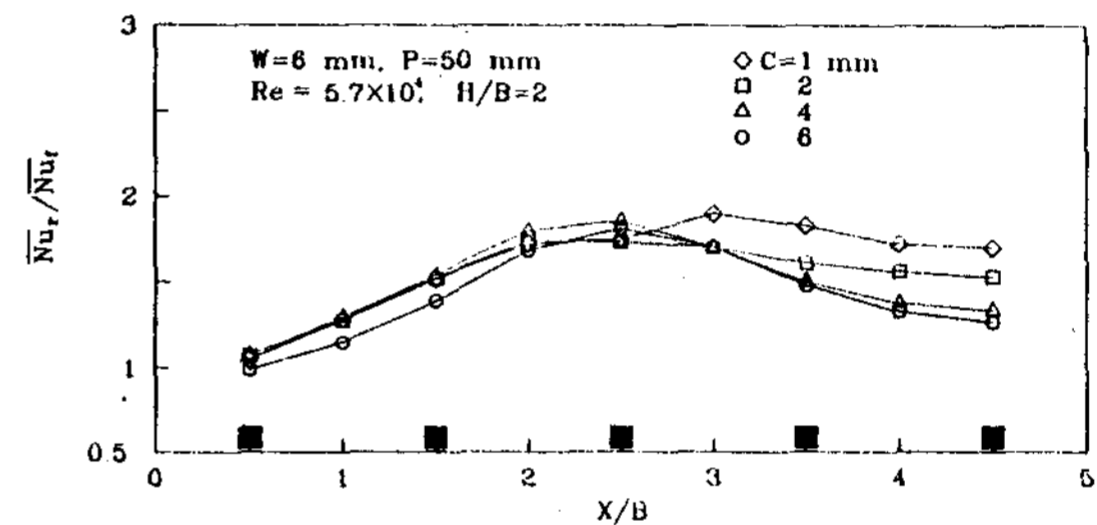


Fig. 10. The comparison of local average Nusselt number on the flat plate with and without rods in case clearances change.

으로 P 변화에 관계없이 정체점 부근을 제외한 전영역에서 rod를 설치하지 않은 평판에 비해 높은 Nu_r 의 분포를 나타내고 있다. 특히 정체점 부근에서 Nu_r 은 첫번째 rod 전까지는 rod를 설치하지 않은 평판 보다 낮지만 rod 바로 밑을 지나면서 가속과 rod에 의한 난류촉진에 의해 점차 높아지고 있다.

X/B 전영역에서 rod 바로 밑의 Nu_r 의 분포를 살펴보면 전체적으로 $P=30\text{mm}$ 일 때가 $P=40\text{mm}$, 50mm 일 때 보다 높게 나타나는데, 이것은 $P=30\text{mm}$ 일 때는 rod아 rod사이

의 거리가 짧기 때문에 rod를 지나면서 박리하는 유체는 rod 위를 타고 넘어온 유체에 의해 전열면상을 흐르면서 많은 양이 다음 rod 밑으로 진행하게 된다. 그러나 $P=40\text{ mm}$, 50 mm 일 때는 $P=30\text{ mm}$ 보다 rod와 rod사이의 거리가 다소 길기 때문에 rod를 지나면서 박리하는 유체는 rod 위를 타고 넘어온 유체에 의한 영향도 받지만 확산현상도 함께 받기 때문이라고 생각한다.

그리고 $P=40\text{ mm}$, 50 mm 인 경우에 벽면분류영역에서는 rod와 rod사이에서 재부착 현상이 나타나며 하류 영역으로 갈수록 유체의 유속 감소로 인하여 재부착에 의한 Nu_r 의 증가 경향은 줄어들고 있으며 $P=30\text{ mm}$ 와 40 mm 일 때 벽면분류영역에서는 $P=50\text{ mm}$ 와는 다르게 rod 바로 밑에서의 Nu_r 보다 rod 직전에서의 Nu_r 이 더 높게 나타난다. 이것은 2·1절에서도 언급했듯이 rod 직전에서 생긴 와류의 영향때문이며 $P=50\text{ mm}$ 의 경우에는 이러한 경향은 볼 수 없다.

Fig 12는 rod를 설치하지 않은 경우의 평균 Nu_r 와 rod를 설치한 경우의 평균 Nu_r 의 비를 나타낸 것으로 P 변화와 관계없이 $X/B > 2.5$ 영역에서 전열증진율이 높게 나타나고 있다. 이것은 rod가 설치되지 않은 평판의 실험에서도 밝혔듯이 충돌판이 포텐셜 코어영역에 설치되었을 때 $X/B=2.5$ 부근에서 일어나는 대규모의 와류에 의한 특징적인 현상으로 rod를 설치하더라도 이와같은 현상은 계속적으로 일어나며 P 변화에 의한 평균전열증진율은 30 mm 일 때 1.58배, 40 mm 일 때 1.6배, 50 mm 일 때 1.6배로서, P 변화에 의한 전열성능은 전체적으로 유사하다는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구는 2차원 충돌분류계의 포텐셜코어

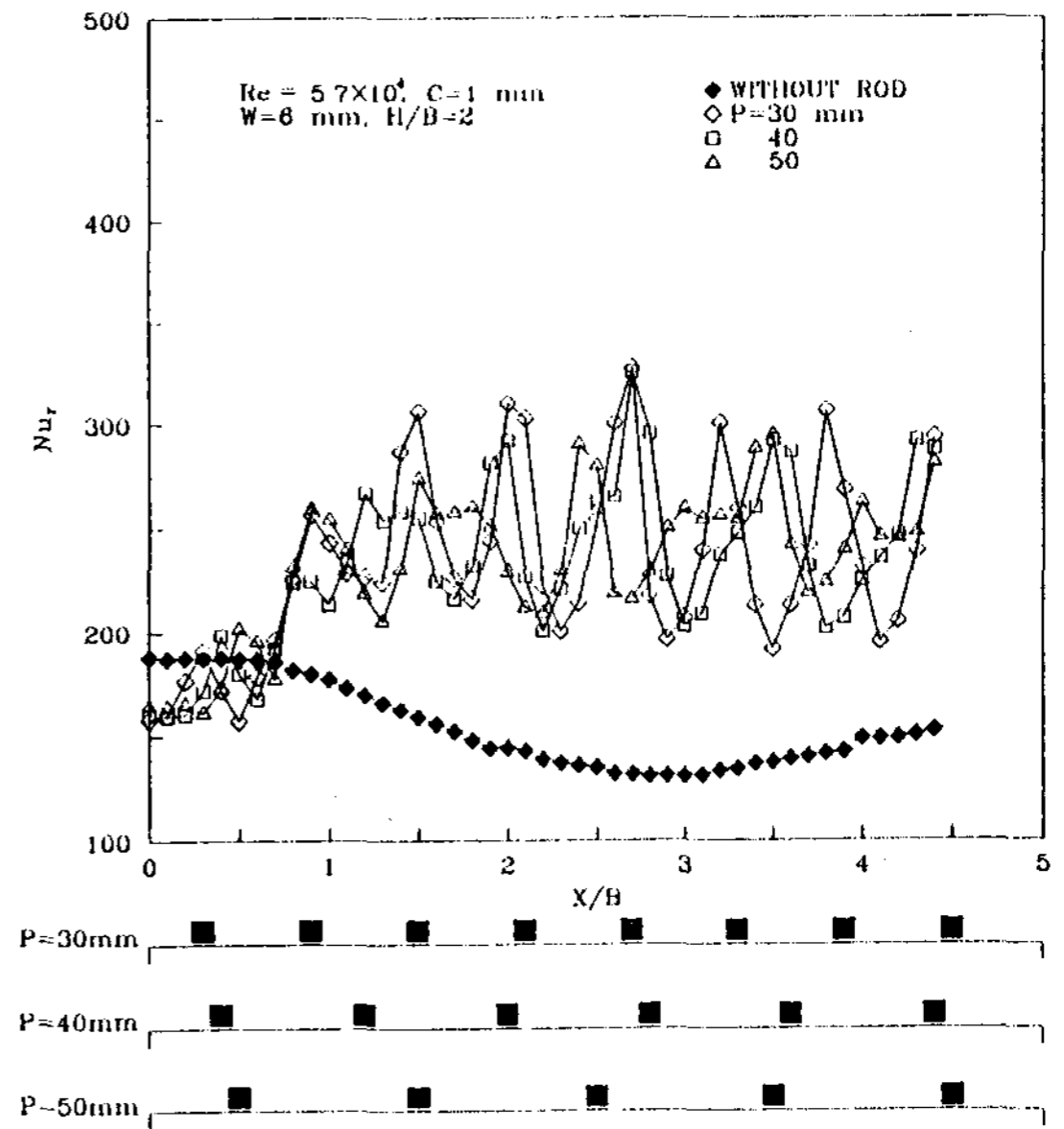


Fig. 11. The distribution of local Nusselt number as the pitch of rods change.

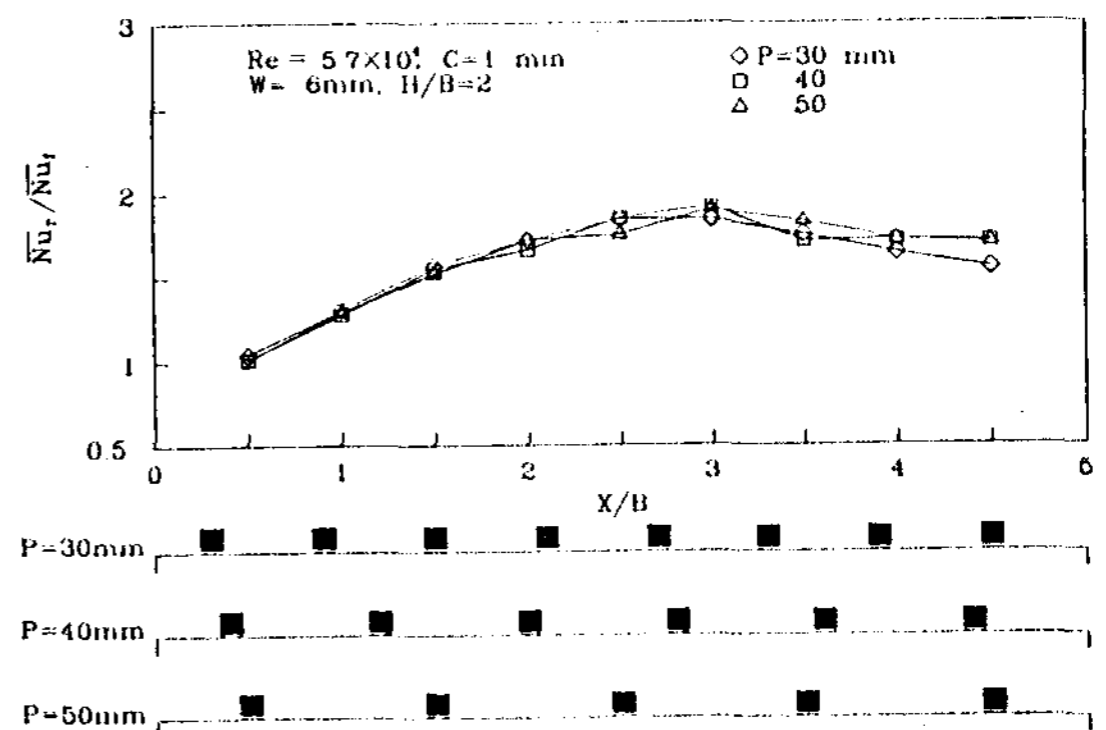


Fig. 12. The distribution of local average Nusselt number as the pitch of rods change.

영역($H/B=2$)내에서 전열증진을 목적으로 전열면 앞에 폭 6 mm 인 정 4각 rod군을 설치하고 rod와 전열면간의 간극($C=1, 2, 4, 6\text{ mm}$)과 rod와 rod 사이의 피치($P=30, 40, 50\text{ mm}$)를 변화시킬때의 유동특성과 전열특성

을 실험적으로 규명하고 rod를 설치하지 않았을 경우와 비교·검토한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Rod를 설치하지 않은 평판의 경우

포텐셜코어 영역내에 충돌판을 설치하였을 때 노즐 출구 유속변화에 관계없이 정체점 이후 Nu_f 는 계속 감소하자 $X/B=2.5$ 부근에서 다시 증가하기 시작하는데 이것은 노즐 출구에서 발생한 와류가 성장하여 이 부근에서 전열면상의 온도경계층을 박막화시키기 때문이다.

2. Rod를 설치한 평판의 경우

① Rod를 설치하지 않은 평판의 경우 벽면 분류영역에서의 Nu_f 는 정체점보다 낮지만, rod를 설치할 경우에는 rod에 의한 난류생성, 가속화, 재부착 등에의해서 정체점보다 높은 Nu_f 를 얻을 수 있다.

② Rod와 전열면사이의 간극(C)을 변화시킬 경우, C가 작을수록 rod 바로 밑에서의 가속 효과가 증진되며, 와류 및 재부착의 영향이 크기 때문에 전열성능은 우수하다.

④ 본 실험범위에서 rod의 피치(P)를 변화시킨 경우 재부착 및 rod 직전의 와류현상이 나타나며 피치변화시 $C=1\text{mm}$ 일 때 rod가 설치되지 않은 평판에 비해 각각 약 1.6배의 전열증진을 나타냈다.

References

- (1) C. O. Popiel and L. Boguslawski, 1986, "Local Heat Transfer from a Rotating Disk in an Impinging Round Jet", ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 108, pp. 357~364.
- (2) J. K. Hagge and G. H. Junkhan, 1975, "Mechanical Augmentation of Convective Heat Transfer in Air", ASME Journal of Heat Transfer, Ser. C, Vol. 97, pp. 516~520.
- (3) E. M. Sparrow, R. J. Goldstein, M. A. Rouf, 1975, "Effect of Nozzle-Separation Distance on Impingement Heat Transfer for a Jet in a Grossflow", Int. J. Heat Mass transfer, Vol. 99, pp. 528~533.
- (4) 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.
- (5) J. C. Han, L. R. Glicksman, W. M. Rohsenow, 1978, "An Investigation of Heat Transfer and Friction for Rib-Roughened Surfaces", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 21, pp. 1143~1156.
- (6) R. L. Webb, E. R. G. Eckert and R. J. Goldstein, 1971, "Heat Transfer, Vol. 14, pp. 601~617.
- (7) 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.
- (8) 藤田秀臣, 高浜平七郎, 山下亮一, 1976, "壁面近傍におかれた二次元圓柱主が平板強制對流熱傳達におよぼす影響", 日本機械學會論文集(第2部), 42卷 361號, pp. 2828~2836.
- (9) C. Gau, C. M. Chung, 1991, "Surface Curvature Effect on Slot-Air-Jet Impingement Cooling Flow and Heat Transfer Process," ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 113, pp. 858~864.
- (10) 崔斗燮, 琴聲民, 李龍和, 徐正閔, 1993, "衝突空氣噴流系에서의 傳熱促進技術에 關한 研究", 태양에너지學會論文集 第13卷 第1號, pp. 11~21.

- (11) 琴聲民, 徐正閔, 1993, “衝突 噴流系에서의 亂流促進體의 間隙變化에 따른 熱傳達增進效果”仁荷大學校 産業科學技術研究所 論文集, 제 21輯, pp. 7~16.

Effect of Heat Transfer Augmentation by Square Rod Array in Impinging Air Jet System (Heat Transfer Characteristic of Potential Core Region)

Seong-Min Kum, Soo-Cheol Oh, Jeong-Yoon Seo

Department of Mechanical Engineering, Inha University

ABSTRACT

This research has been proceeded over the potential core region($H/B=2$) of two-dimensional impinging air jet sytem, in which square rods(width of 6 mm) has been set up in front of heating surface in order to increase heat tranfer. The objective of this research was to investigate the characteristics of heat transfer and air flow, in cases of the clearance from rods to heating surface($C=1, 2, 4, 6$ mm) and the pitch between each rods($P=30, 40, 50$ mm) changed. And this research compared the above with the experimentation without rods. As result, heat transfer performance was best under the condition of $C=1$ mm, in case clearance changed, and there was no serious difference in the effect of heat transfer augmentation in the case of pitch of rods changed.