

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 15, No. 3, 1995

사각로드를 이용한 충돌분류계의 열전달증진에 관한 연구 (로드폭의 영향)

금성민* · 이용화** · 서정윤*

* 인하대학교 기계공학과

** 유한전문대학 건축설비과

An Experimental Study on Heat Transfer Augmentation by Square Rod in Impinging Air Jet System (Effect of Rod Width)

Seong-Min, Kum* · Yong-Hwa, Lee** · Jeong-Yun, Seo*

* *Inha University*

** *Yuhan Junior College*

요 약

본 연구는 2차원 충돌공기분류계에서 공기의 흐름 방향과 수직이 되게 설치한 평판 전열면 앞에 전열증진을 목적으로 난류촉진체인 정4각 로드군을 설치할때의 유동특성과 전열특성을 실험을 통해서 구명하고, 본 실험범위내에서 로드의 최적 설치조건을 제시하기 위한 실험적 연구이다.

실험은 먼저 로드를 설치하지 않은 평판에서의 전열특성을 밝힌후, 로드를 설치할 경우 로드의 피치가 40mm일때 로드와 전열면사이의 간극 및 로드폭 변화시의 유동특성과 전열 특성을 구명하여 로드를 설치하지 않은 평판과의 전열성능을 비교하였다. 본 실험범위내에서 전열면에 간극을 두고 로드를 설치하면 로드 바로 밑에서의 가속 및 로드 에 의한 난류생성과 재부착에 의해 전열성능은 향상되며 로드폭을 변화시킨 경우에는 로드폭이 클수록 로드 바로 밑에서의 가속효과와 로드 직전에 와류의 영향이 크게 작용하여 전열설능이 향상된다.

Abstract

This experimental study was carried out to examine the heat transfer characteristics of a 2-dimensional impinging air jet on a flat plate with a set of square rods. The objectives of the study were to investigate the flow and heat transfer characteristics caused by the square rods. Experiment was carried out first without using the rods to establish the baseline heat transfer performance. Then, rods of different widths and clearances were installed to cause the turbulence on the fluid flow. When rods are installed in front of the plate, the acceleration of the flow and the turbulence generation due to the rods and reattachment of the flow seem to contribute to the observed heat transfer augmentation and the heat transfer augmentation increases as the clearance decreases. With wider individual rod the heat transfer coefficient is higher, which is due to the increased acceleration and development of the eddies just before the rods.

기호설명

A : 전열면적[m ²]	V : 전압[volt]
B : 노즐출구 폭[mm]	W : 사각로드의 폭[mm]
C : 로드와 전열면 사이의 간극[mm]	X : 정체점으로부터 노즐 폭방향으로의 거리[mm]
h : 열전달계수[W/m ² · °C]	λ : 열전도율[W/m · °C]
H : 노즐출구로부터 전열면까지의 거리[mm]	참자
I : 전류[ampere]	f : 로드를 설치하지 않는 평판
Nu _f : 로드를 설치하지 않은 평판의 누셀트수	r : 로드를 설치한 평판
Nu _r : 로드를 설치한 평판의 누셀트수	s : 정체점
L : 노즐 높이[mm]	
P : 로드의 피치[mm]	
q : 열유속[W/m ²]	
T _w : 전열면의 국부온도[°C]	
T _o : 노즐출구에서의 공기온도[°C]	
U : 노즐출구에서의 분류의 평균속도[m/s]	
U _s : 분류의 중심속도[m/s]	
$\sqrt{u^2}$: 난류강도	

1. 서 론

전열증진의 대표적인 것에는 대류 열교환 기술을 대상으로하는 충돌분류계가 있는데, 이 계는 충돌영역에서 발생하는 대규모 와류 (large scale eddy)에 의해 높은 열전달계수를 얻을 수 있기 때문에 실험적, 이론적 연구가 활발하게 진행되고 있으며 공업적인 예를 고온물체의 급속냉각, 직물 및 종이 등의 건조,

가스터어빈 익의 냉각과 근래에는 전자장비의 냉각 등에 이용하고 있다.^{1,2,3)} 그런데 충돌분류는 충돌영역을 벗어나 벽면분류영역으로 진행할수록 속도감소와 분류의 확산으로 전열효과가 상대적으로 낮아지기 때문에 이를 보완하기 위한 기술개발이 필요하다고 생각된다.

특히 지금까지 보고된 전열증진기술은 두 가지로 대별할 수 있는데 첫번째는 능동적 방법(Active technique)으로서 외부로부터 동력 공급량을 증가시키거나 전열면에 진동 등을 가하는 방법이며, 두번째는 수동적 방법(Passive technique)으로서 외부에서 부가적인 동력의 공급없이 전열면의 확대 및 가공, 전열면 앞에 다공판 설치, 노즐내에 twisted tape 삽입 및 난류촉진체를 이용한 전열증진 등이 이에 상당한다.^{4,5,6)}

따라서 에너지 절약이라는 측면에서 볼때 부가적 동력 공급이 없는 수동적 방법이 전열증진에 가장 바람직한 것이라고 생각된다. 특히 수동적 방법에 관한 연구 가운데 Lewis⁴⁾는 rib가 부착된 전열면에서의 전열증진을 위해서는 rib에 의한 박리영역을 최대한 줄이고 재부착이 용이하도록 하이브리드 리브의 설계가 필요하다고 지적하고 있으며, Khan⁵⁾ 등은 전열면 앞에 다공판을 설치할 경우 분류는 다공판을 빠져 나오면서 소분류로 분할되고 이 분류는 난류도가 증가된 상태로 전열면에 충돌하기 때문에 전열성능을 향상시킨다고 설명하고 있다. 또한 박¹⁵⁾은 원형노즐내에 twisted tape를 삽입할 경우 선회류가 발생되어 전열향상을 이룰 수 있다고 보고하고 있으며, 이는 전열면 앞에 간극을 두고 원형로드를 설치할 경우 유체의 가속 및 교란효과와 경계층의 박막효과로 벽면분류 영역에서도 높은 열전달계수를 얻을 수 있다고 지적했다. 본 연구에서는 충돌분류계의 벽면분류영역에

서 전열증진 효과를 규명하는데 그 목적을 두고 수동적 방법의 하나인 로드를 사용하기로 한다. 즉 로드는 폭이 4, 6, 8mm인 정사각형 단면의 로드를 평판전열면 앞에 각각 설치한 다음, 로드의 피치를 40mm로 고정하고 노즐 출구속도, 노즐출구와 전열면 사이의 거리 및 로드와 전열면 사이의 간극을 변화시키면서 이때의 유동특성과 전열특성을 실험적으로 규명하고 로드 설치하지 않은 평판의 경우와 비교, 검토하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치의 개요

Fig.1은 실험장치의 개략도이다. 공기는 원심식 송풍기①에서 송출되며 유량은 유량조절 Damper②에 의해 조절되고 Wire Mesh③과 Diffuser④를 지나 Honeycomb⑤와 Settling Chamber⑥에 의해 균일화 되면서 Nozzle⑦을 통해 분출된다. 특히 노즐은 형상 및 축류비가 분류의 평균속도, 난류 유동특성, 분류의 확산 등에 큰 영향을 미치게 되므로⁷⁾ 유체역학적 특성을 고려하여 노즐 출구에서 균일한 속도분포와 저난류강도를 유지할 수 있도록 폭 250mm, 출구 폭 50mm, 높이 500mm, 길

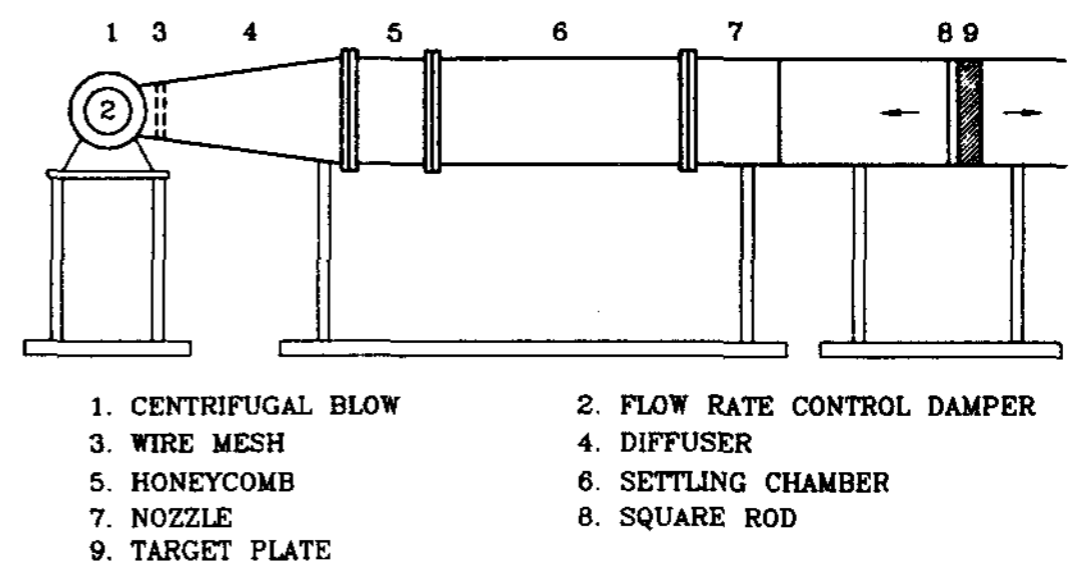


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

이 300mm인 sine곡선형으로된 사각 노즐을 제작 사용하였으며, 2차원 분류가 되도록 분출 후의 유로상하면에는 평행판을 설치하였고 층돌판⑨는 전후 좌우이동이 가능하도록 하였다.

Fig. 2, 3은 평판전열면 앞에 난류축진체인로드를 설치한 경우의 좌표계로서 로드와 폭

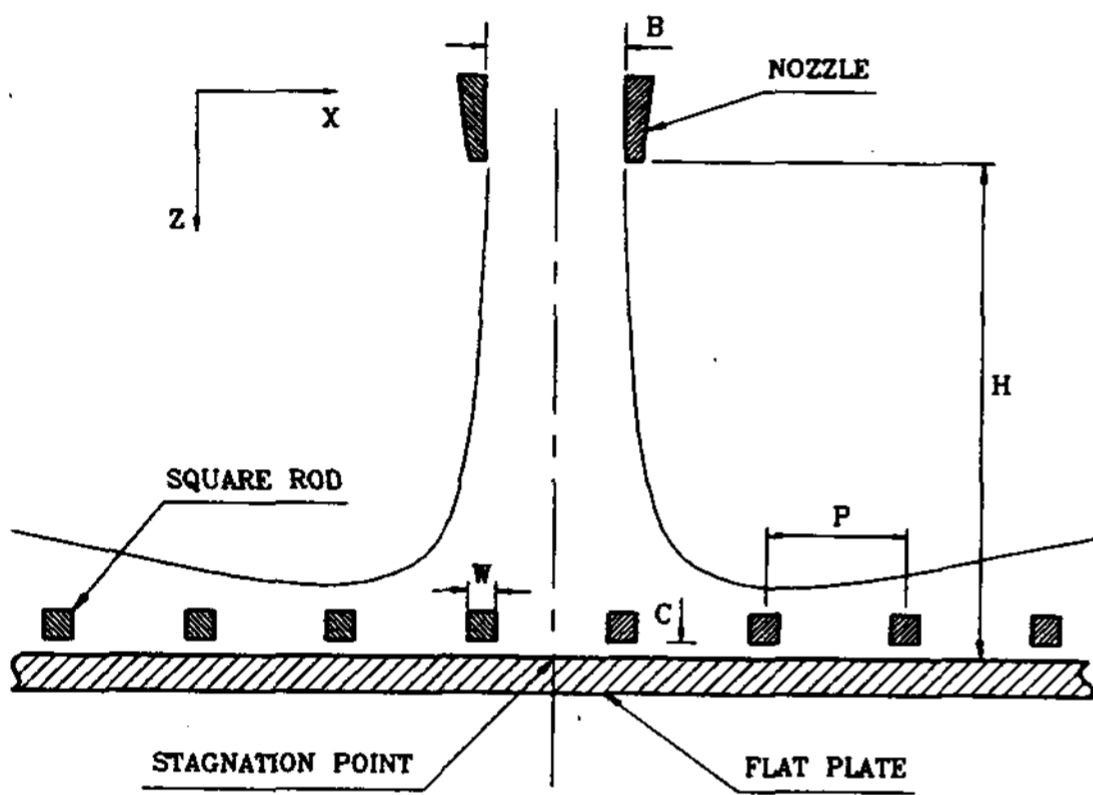


Fig. 2 Coordinate system of flat plate with rods.(I)

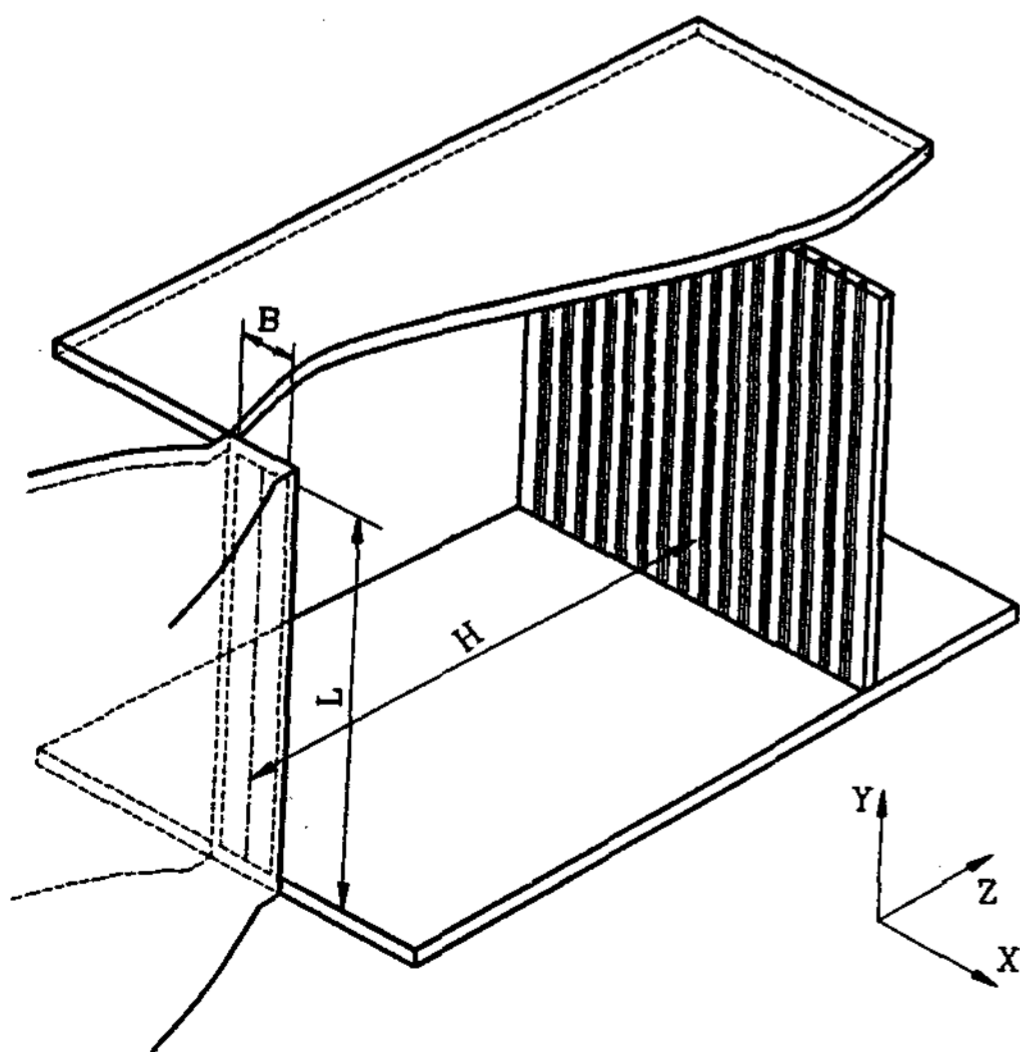


Fig. 3 Coordinate system of flat plate with rods.(II)

을 W, 로드와 전열면간의 간극을 C, 로드 사이의 피치를 P, 노즐 출구폭을 B, 노즐의 높이를 L, 평판의 정체점(Stagnation point)으로부터 노즐 출구폭 방향의 거리를 X, 노즐 출구로부터 전열면까지의 거리를 H로 하여 X와 H를 각각 X/B, H/B로 무차원화 하였으며, 노즐중심은 전열면 중앙부에 인접한 두개의 로드 사이의 중심선과 일치하도록 하였다.

2-2. 자유분류의 속도와 난류강도

Fig. 4는 분류중심축상에서의 속도와 노즐 출구속도와의 비(U_x/U) 및 난류강도와 노즐 출구속도와의 비($\sqrt{u^2}/U$)를 나타낸 것으로 분류중심 속도는 약 $H/B = 6$ 까지 노즐 출구속도가 유지되며 $H/B = 6$ 이후 감소하고 있다. 따라서 포텐셜 코어영역은 $H/B = 6$ 까지로 생각되며 난류강도는 노즐 출구로부터 증가하기 시작하여 주위 유체와의 혼합작용이 충분히 이루어지는 $H/B = 10$ 에서 최대가 된 후 점차 감소하고 있다. 따라서 본 실험범위 내에서 난류강도가 최소가 되는 위치는 $H/B = 2$ 이며 최대가 되는 위치는 천이영역인 $H/B = 10$ 이다.

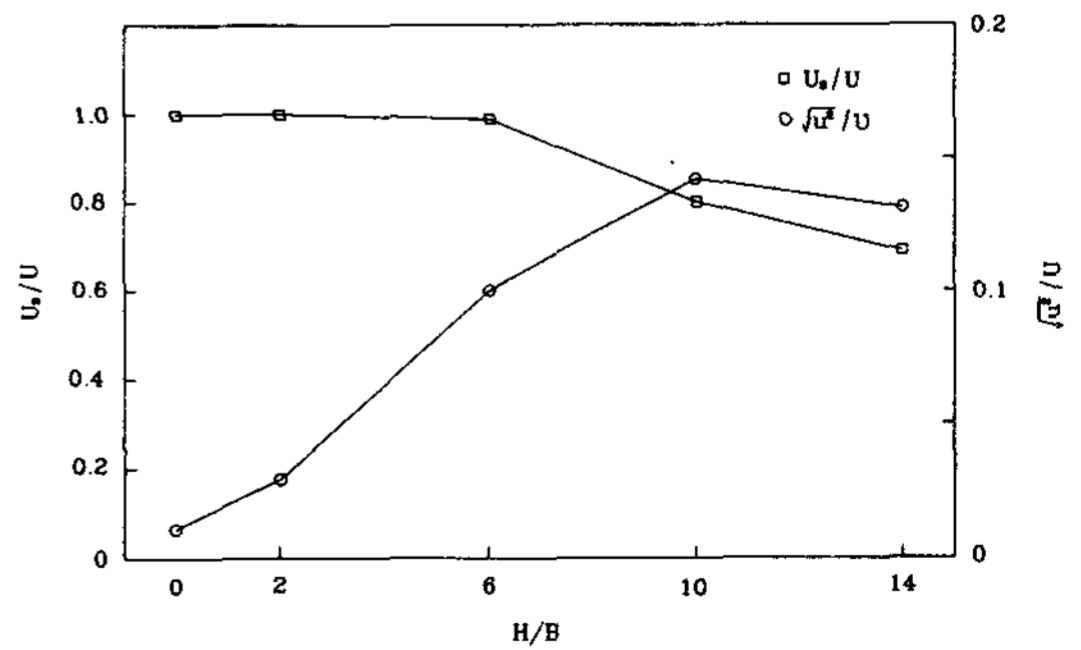


Fig. 4 Distribution of velocity and turbulence along the centerline of free jet. (U=18m/s)

2-3. 전열면 형상 및 온도 측정

전열면의 형상은 Fig.5와 같으며 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.

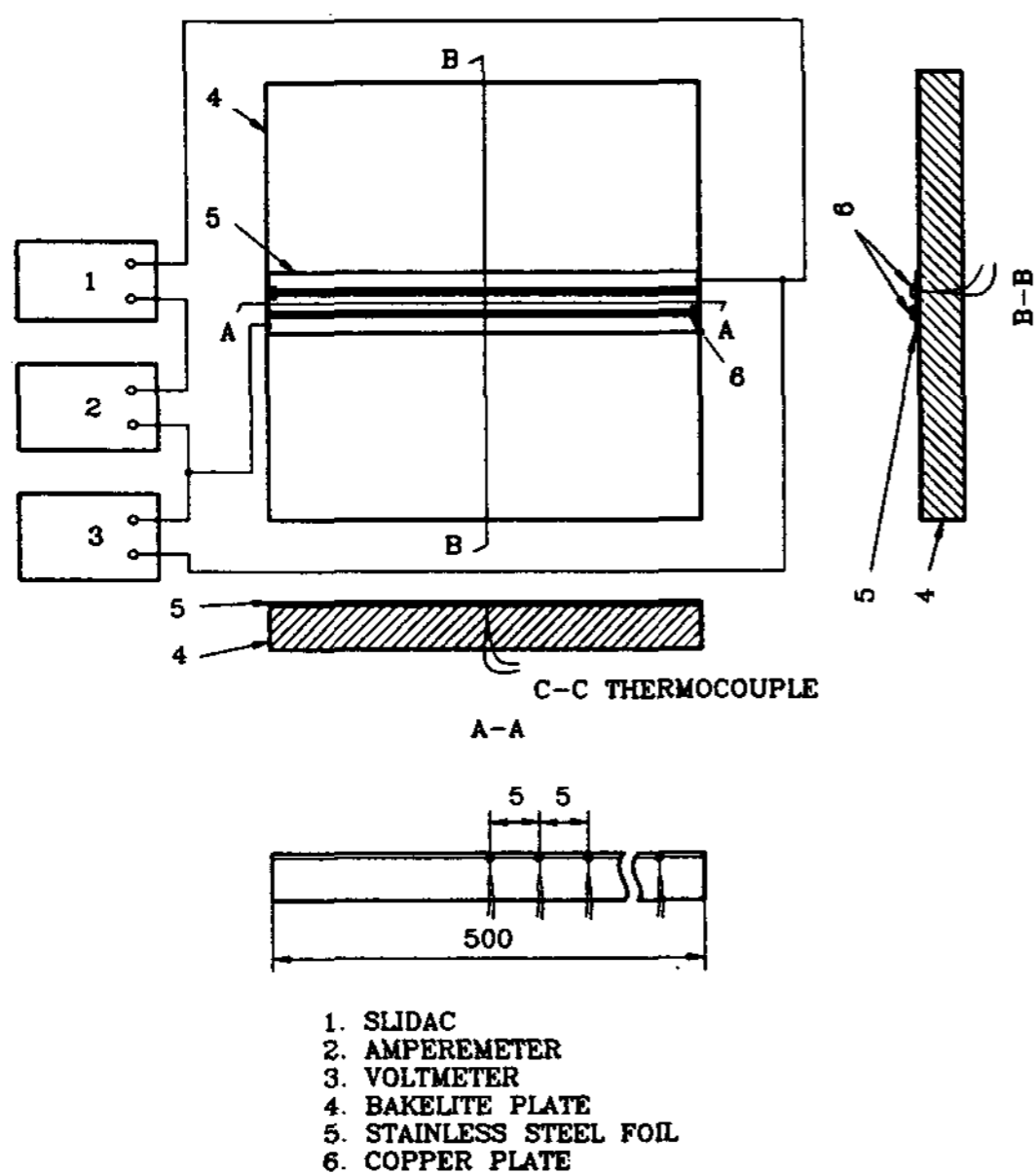


Fig. 5 Detailed diagram of heating apparatus.

전열면의 가열은 $q = 1020\text{W/m}^2$ 의 등열유속 조건으로 하여 통전가열하였으며 이 때 전압은 자동전압조정기를 사용하여 일정하게 유지시켰고, 열유속 값은 식(2-1)과 같이 회로내의 전류계의 전류와 스테인레스 박판 양단 전위차의 곱으로 구하였다.

$$q = I \cdot \frac{V}{A} \quad (2-1)$$

전열면의 온도측정은 스테인레스 박판 뒷면에 직경 0.07mm의 C-C열전대(Thermocouple: T-type) 45개를 정체점으로 부터 5mm 간격으로 납땜 부착하여 Data Logger

(Fluke Co, Helios I)에 연결하고, 전열면이 정상상태에 도달한 것을 확인한 후 3분 간격으로 10회 측정하여 평균온도를 측정하였다.

특히 온도측정은 전열면이 정상온도에 도달한 것을 확인하기 위해 층돌판의 위치조건 변경시에는 약 1시간 경과후 매회 전열면의 평균온도차가 0.1°C 이하가 될때의 온도를 정상온도로 정했으며, Bakelite판(열전도율 $0.332\text{W/m}\cdot\text{K}$)에서의 방출열량은 전체 가열량의 1% 이내의 범위였기 때문에 Bakelite판을 통한 열손실은 무시하였다.

또한 온도측정은 자유분류의 유속측정으로 부터 좌우 대칭성을 확인했기 때문에 정체점으로부터 한방향으로만 측정하였고 이때 분류의 온도범위는 $21 \pm 1^\circ\text{C}$ 였으며 사용된 물성치는 참고문헌⁷⁾을 이용하였다.

그리고 국부열전달계수(h), 국부Nusselt수(Nu), 국부평균nusselt수(\bar{Nu})는 다음과 같이 계산하였다.

$$h = \left(\frac{q}{T_w - T_\infty} \right) [\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}] \quad (2-2)$$

여기서 T_w 는 전열면의 온도, T_∞ 는 노즐 출구에서의 공기 온도이다.

$$Nu = h \cdot B / \lambda \quad (2-3)$$

$$Nu = \int_{-x}^x Nu \cdot dx / \int_{-x}^x dx \quad (2-4)$$

또한 본 연구에서 구한 Re 와 Nu 에 대한 불확실성⁸⁾은 $Re = \pm 2.1\%$ 이고, $Nu = \pm 5.7\%$ 이다.

2-4 실험 data의 신뢰성

Fig.6은 본 실험 data의 신뢰성을 검증하기 위해 로드를 설치하지 않은 평판의 경우 $U = 18\text{m/s}$, $H/B = 10$ 일 때 평균 Nu 를 Ref.6의 평균 Nu 와 비교한 것으로 정서적으로 매우

유사한 경향을 나타내고 있으며, 정략적으로 비교하면 약 4% 정도의 차이를 나타내고 있다. 따라서 본 실험에서 로드설치하지 않은 평판의 Nu_r 는 다른 실험결과와 정성·정량적으로 유사성을 갖고 있으며 열유속 및 속도가 동일한 상태에서 로드설치하여 실험을 수행했기 때문에 Nu_r 역시 유사한 정확도를 가질 것으로 생각된다.

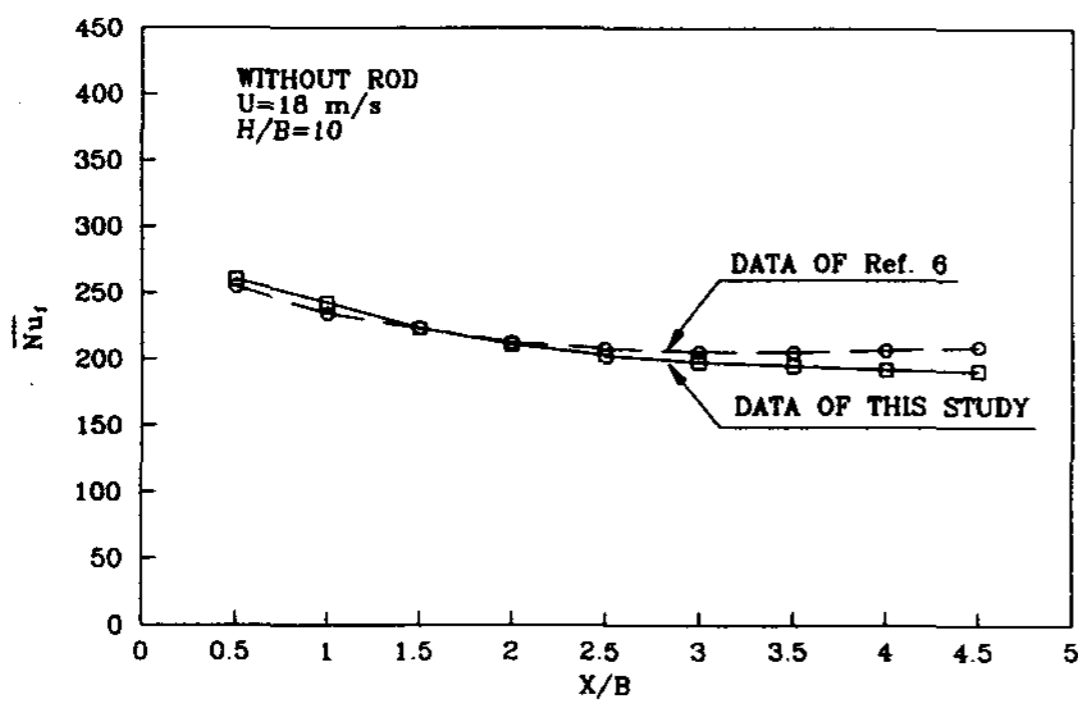


Fig. 6 Comparison of the results of this study with data of Ref. 6

2-5. 실험조건 및 범위

본 실험에 적용된 실험조건 및 범위를 정리하면 다음과 같다.

1. 노즐 출구폭 : $B = 50$ [mm]
2. 노즐 출구 높이 : $L = 500$ [mm]
3. 노즐 출구의 평균속도 : $U = 2, 8, 14, 18$ [m/s]
4. 충돌판의 형상 : $500 \times 500 \times 20$ [mm] 평판
5. 노즐 출구와 전열면간의 거리 : $H = 100, 300, 500, 700$ [mm]
6. 충돌판에 부착된 전열면의 열유속 : $q = 1020$ [W/m²]
7. 난류촉진제(로드)의 형상 :
 - $4 \times 4 \times 500$ [mm]의 정 4각 로드
 - $6 \times 6 \times 500$ [mm]의 정 4각 로드
 - $8 \times 8 \times 500$ [mm]의 정 4각 로드

8. 로드의 폭 : $W = 4, 6, 8$ [mm]
9. 로드와 로드사이의 피치 : $P = 40$ [mm]
10. 로드와 전열면사이의 간극 : $C = 1, 2, 4, 6$ [mm]
11. 분류의 형상 : 2차원 수평분류
12. 작동유체 : 공기

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 로드설치하지 않은 평판에서의 전열특성

본 절에서는 2차원 공기 분류가 로드설치하지 않은 평판 전열면에 충돌할 때의 유동 특성 및 전열특성에 대하여 고찰하고자 한다.

3-1-1. 정체점의 전열특성

Fig.7은 로드설치하지 않은 평판 전열면에 분류가 충돌할 때 노즐 출구속도 변화에 따른 정체점에서의 전열특성을 나타낸 것으로 정체점에서의 Nu_r 는 H/B 가 증가함에 따라 서서히 증가하기 시작하여 $H/B = 10$ 에서 최대가 된 후 다시 감소한다.

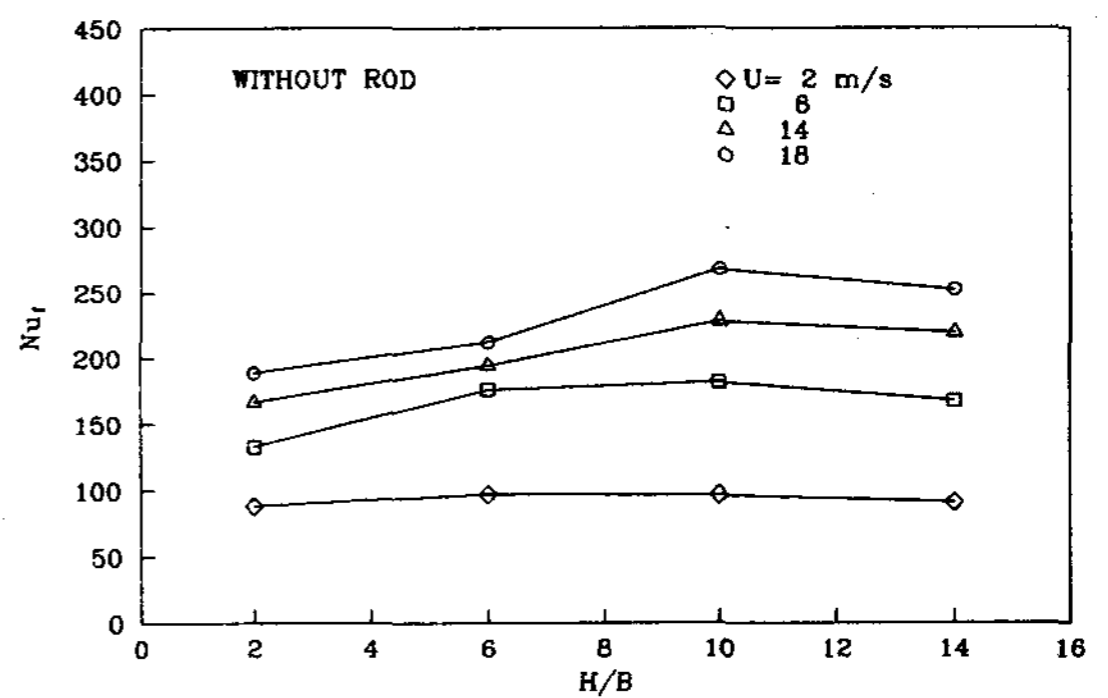


Fig. 7 Variation of stagnation point Nu_r as a function of H/B for various velocities.

특히 Nu_r 가 노즐 출구속도 변화에 관계없이 $H/B = 10$ 에서 최대가 되는 것은 분류가

전열면에 충돌하기 전에 주위 유체와의 혼합 작용이 충분히 이루어져 난류강도가 증가되었기 때문이다.⁹⁾

또한 노즐 출구속도 변화에 대한 관계를 고려하면 $U = 2, 8\text{m/s}$ 인 경우, $H/B = 6$ 과 $H/B = 10$ 에서의 Nu_r 는 큰 차이가 나타나지 않는데, 이것은 속도가 감소함에 따라 난류도가 최대가 되는 위치는 노즐 출구쪽으로 이동하기 때문이라고 생각되며(Fig. 4참조), 이것은 다른 연구 결과들^{9,10)}과도 동일한 경향을 나타내고 있다.

3-1-2. 벽면분류역역의 전열특성

Fig.8은 $U = 18\text{m/s}$ 일 때 정체점으로부터 X 방향의 Nu_r 를 각 H/B 에 대하여 나타낸 것으로 X방향으로의 Nu_r 는 정체점 이후 감소하고 있는데 이것은 분류가 벽면분류영역으로 진행하면서 속도가 감소되고 확산이 일어나기 때문이며, Nu_r 는 노즐 출구속도변화에 관계없이 전체적으로 $H/B = 10$ 에서 최대가 되며 $H/B = 2$ 에서 최소가 된다.

즉 포텐셜 코어영역($H/B < 6$)에서는 분류가 충돌하기 전에 주위 유체와의 혼합작용이 충분하게 이루어지지 않았기 때문에 천이영역

($H/B > 8$)인 $H/B = 10$ 보다 Nu_r 는 낮게 나타난다.

그리고 분류가 벽면을 따라 진행하면서 나타나는 특성으로 포텐셜 코어영역에서 Nu_r 는 정체점 이후 감소하다가 $X/B = 2.5$ 부근에서 다시 증가하기 시작한다.

이 현상에 대해서 증전¹¹⁾은 분류가 층류에서 난류로 천이하기 때문이라고 보고하고 있으며, 최¹²⁾등에 의하면 이것은 노즐 양끝에서 생성된 와류가 성장하여 $X/B = 2.5$ 부근에서 전열면상의 경계층을 교란시키기 때문이라는 것을 가시화 실험에 의해 밝히고 있다.

이와같은 현상은 충돌판이 포텐셜 코어영역 내에 설치된 경우에는 노즐 출구속도 변화에 관계없이 모두 확인할 수 있었다.

Fig.9, 10은 충돌판이 포텐셜 코어영역내에 설치된 $H/B = 2$ 와 천이영역인 $H/B = 10$ 에서의 노즐 출구속도 변화에 대한 Nu_r 의 분포를 각각 나타낸 것이다.

Nu_r 의 분포는 노즐 출구속도 변화에 따라 유사한 경향으로 나타나며 $H/B = 2$ 인 경우 $X/B = 2.5$ 부근에서 Nu_r 의 재상승을 확인할 수 있다. 그러나 노즐 출구속도가 감소할수록 주위 정지유체와의 혼합작용이 감소하여 와류

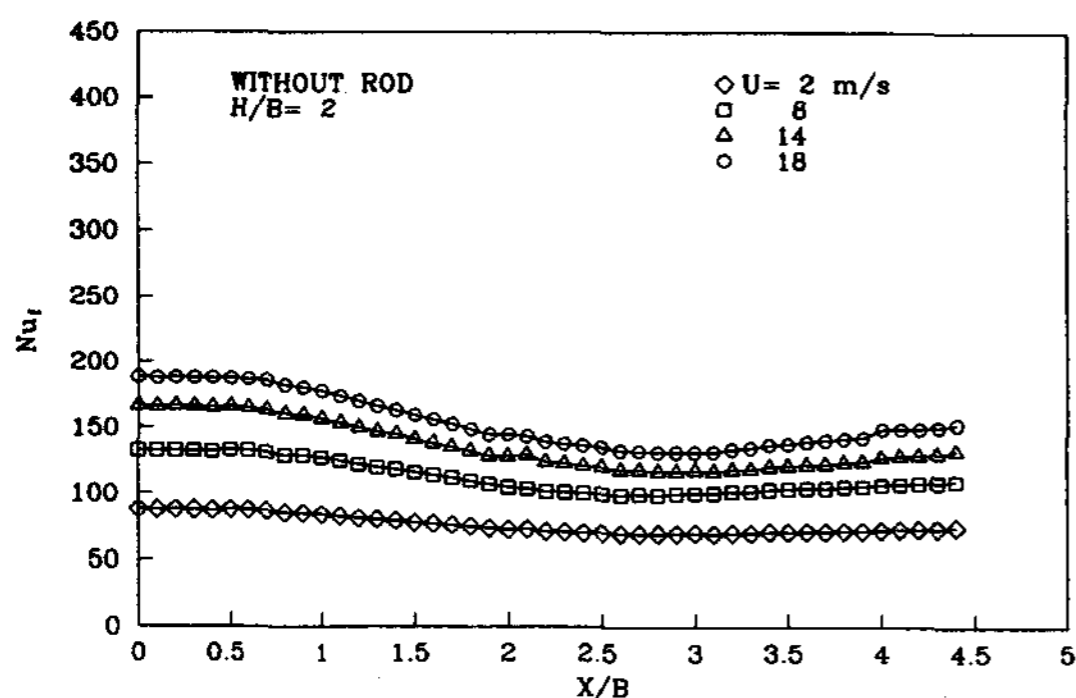


Fig. 8 Distribution of local Nu_r on the flat plate as a function of X/B for various velocities with $H/B=2$.

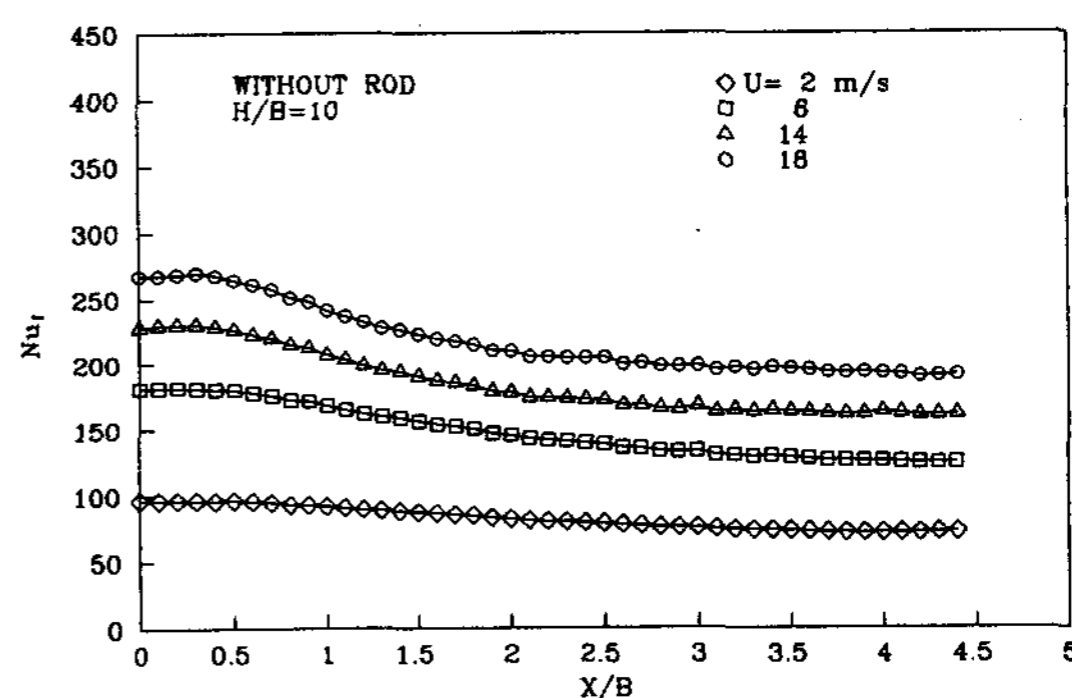


Fig. 9 Distribution of local Nu_r on the flat plate as a function of X/B for various velocities with $H/B=10$.

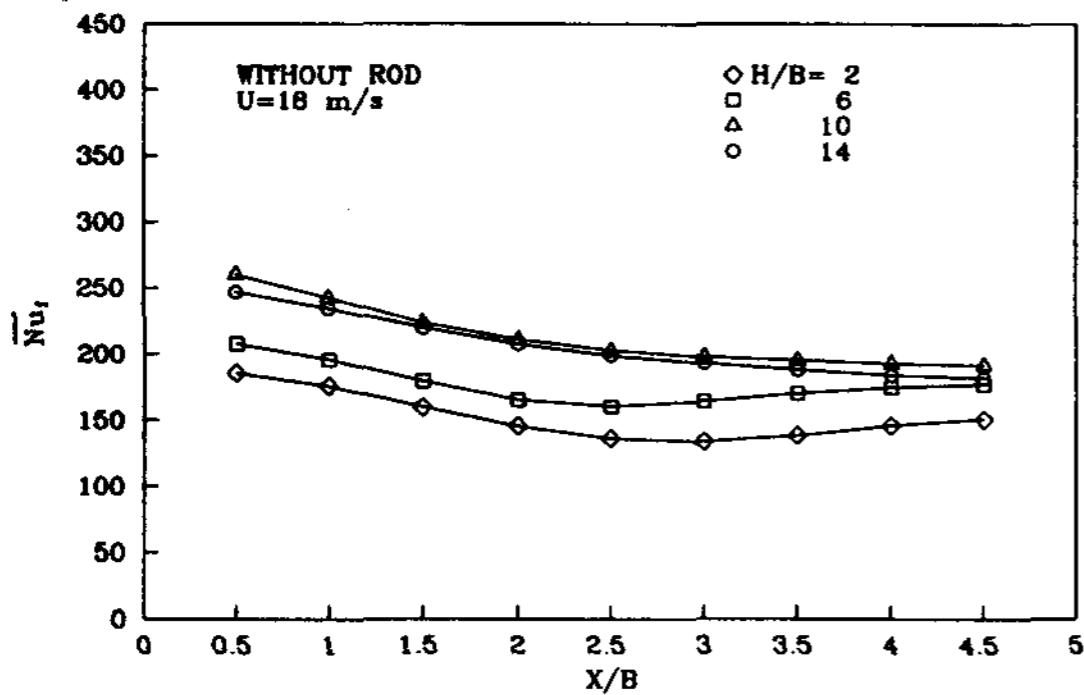


Fig. 10 Distribution of local average Nu on the flat as a function of X/B for U=18m/s.

의 생성이 활발하지 않기 때문에 Nu_r의 재상승 현상은 줄어든다.^{13,14)}

Fig. 11은 U = 18m/s일 때 국부평균 Nu_r를 각 H/B에 대하여 나타낸 것으로 모든 H/B중에서 H/B = 10인 경우에 X/B 전영역에서 Nu_r가 최대가 되고 포텐셜 코어영역인 H/B = 2, 6인 경우에는 X/B = 2.5 부근에서 Nu_r의 재상승이 일어나며 H/B의 변화에 대한 평균 Nu_r를 비교하면 H/B = 10일때가 H/B = 2인 경우보다 약 41%정도 높게 나타난다.

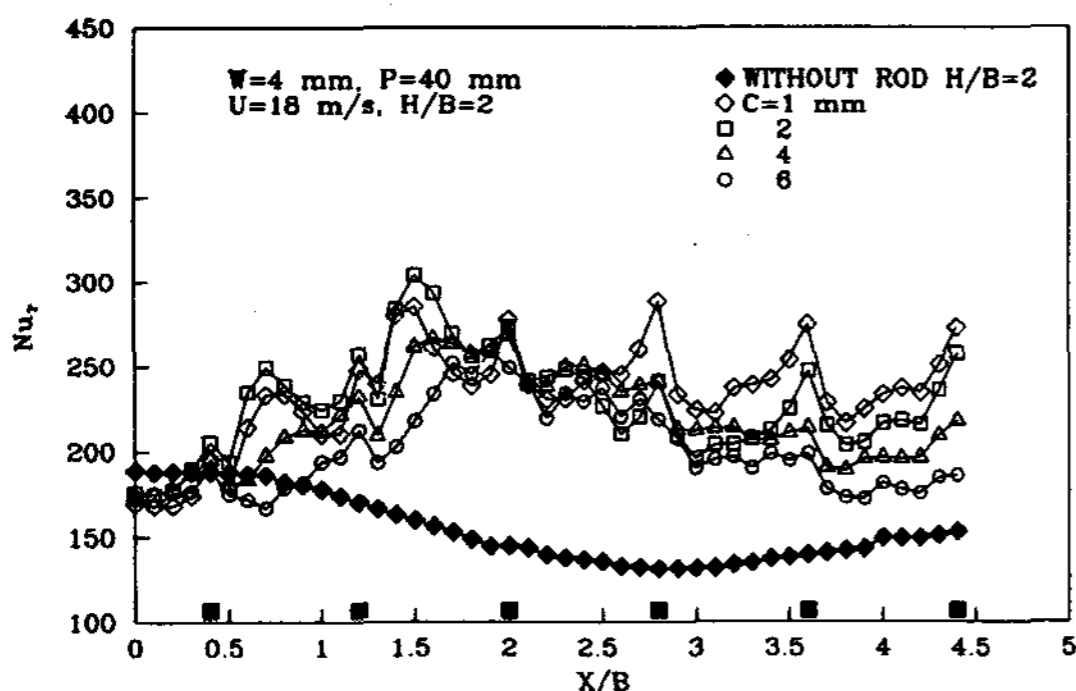


Fig. 11 Distribution of local Nu as a function of X/B for various clearances. (W=4mm, H/B=2)

이상과 같이 2차원 충돌분류계에서 분류가로드를 설치하지 않은 평판 전열면에 충돌할 때의 유동특성 및 전열특성에 대하여 고찰한 결과, 분류가 평판에 충돌할 경우 Nu_r는 정체점 이후 X방향으로 계속 감소하며, 포텐셜 코어영역내에 충돌판이 설치되더라도 X/B = 2.5 부근에서의 재상승 경향은 있지만 벽면분류 영역에서의 Nu_r는 정체점에서의 Nu_r 보다 상대적으로 낮기 때문에 충돌분류계의 전열증진을 위해서는 벽면분류영역내의 전열향상이 이루어져야 한다고 생각한다.

그리고 H/B의 변화에 대한 Nu_r의 관계를 살펴보면 속도에 관계없이 Nu_r는 H/B = 2에서 가장 낮게 나타나며 H/B = 10에서 가장 높게 나타나므로 본 연구에서는 로드 설치하더라도 모든 H/B중에서 특히 전열성능이 가장 낮은 H/B = 2와 난류강도가 충분히 발달되어 전열성능이 가장 크게 나타날 것으로 예상되는 H/B = 10을 중심으로 로드와 로드와 전열면 사이의 간극을 변화시켜 이때의 유동특성 및 전열특성을 밝히고 로드 설치하지 않은 평판과 비교, 검토하고자 한다.

3-2. 로드 설치에 의한 영향

3-2-1 로드와 전열면 사이의 간극변화가 열전달에 미치는 영향

Fig.12는 노즐 출구에서의 속도(이하 U라 함)가 18m/s, 로드와 전열면 사이의 간극(이하 W라 함)이 4mm, 로드와 로드사이의 피치(이하 P라 함)가 40mm인 경우, 충돌판을 포텐셜 코어영역인 H/B = 2인 위치에 설치했을 때 로드와 전열면 사이의 간극(이하 C라 함) 변화에 대한 Nu_r의 분포를 나타낸 것으로, 여기서 Nu_r는 정체점 부근을 제외한 X/B 전영역에서 C의 변화에 관계없이 정체점보다 매우 높게 나타나며 로드가 없는 평판과 비교해 보면 정체점

부근을 제외한 전영역에서 높게 분포되어 있다.

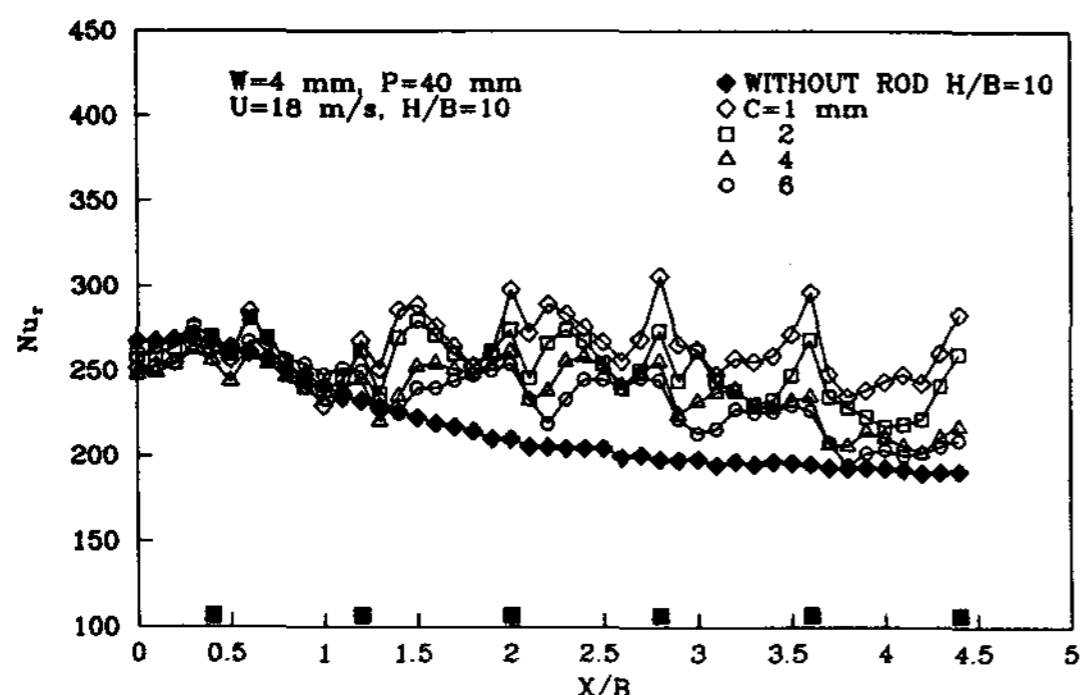


Fig. 12 Distribution of local Nu as a function of X/B various clearances. (W=4mm, H/B=10)

로드를 설치한 경우, 정체점 부근에서의 Nu_r이 로드를 설치하지 않았을 때보다 낮게 나타나는 것은 초기 분류가 로드 저항을 받기 때문에 벽면분류로의 진행이 원활하지 않아서 약간의 정체 현상이 일어나기 때문이며, 13) C의 변화와 관계없이 로드 바로 밑에서 Nu_r이 최대값을 나타내는 것은 로드 바로 밑에서 일어나는 유체의 가속효과^{5,13)}에 의한 경계층의 박막화 때문이다. 즉 C의 변화에 의한 가속효과의 영향을 살펴보면 C = 1mm인 경우, C = 2, 4, 6mm에 비해 벽면분류 영역에서 로드 바로 밑의 Nu_r은 상대적으로 높는데 이것은 간극이 작을수록 유체의 가속효과가 크게 작용하기 때문이라고 생각한다.

그리고 C의 변화와 관계없이 로드 직후에서 Nu_r이 급격하게 낮아지는데 이것은 분류가 로드 바로 밑을 지나면서 전열면에서 이탈하는 박리현상^{5, 13)} 때문이며 X/B가 커질수록 박리점에서 Nu_r은 계속 낮아지고 있다. 특 X/B가 커질수록 유체는 로드의 측면저항으로 인한 운동량 감소와 확산으로 로드 바로 밑의

가속효과는 점차 줄어서 박리의 영향도 크게 받는다.

특히 X/B = 1.5 부근에서 Nu_r이 rod 바로 밑보다 높게 나타나는데 이것은 Photo. 1에서 알 수 있듯이 이 부근에서 발생한 와류에 의한 영향으로 생각하며, C가 클수록 와류의 생성위치도 조금씩 이동하고 있음을 알 수 있다.

Fig.13은 천이영역인 H/B = 10인 위치에 충돌판을 설치한 경우로서 H/B = 2와 마찬가지로 C가 작을수록 Nu_r은 높게 나타나며, 로드를 설치하지 않은 평판과 비교해 볼때 Fig.12의 H/B = 2에서의 전열증진을 보다는 작다. 이것은 H/B = 10인 경우에는 난류강도가 충분히 성장하여 충돌하기 때문에 로드 설치하더라도 증진효과는 크지 않은 반면, H/B = 2에서는 난류강도가 충분히 발달하지 않은 상태에서 충돌하지만 벽면분류 영역으로 진행하면서 로드에 의해 난류효과가 발생하기 때문에 로드 설치하지 않은 평판에 비해 전열증진율은 크게 향상된다.

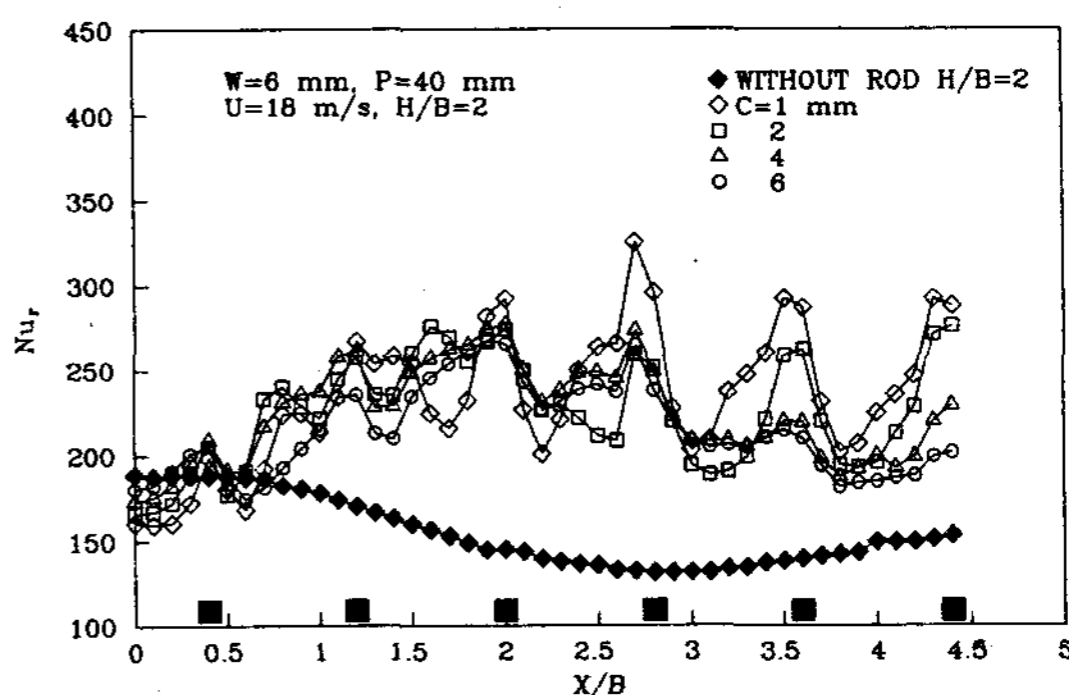


Fig. 13 Distribution of local Nu as a function of X/B for various clearances. (W=6mm, H/B=2)

Fig.14는 W = 6mm, P = 40mm, U = 18m/s, H/B = 2인 경우이며 C의 변화에 대한 영향은 3번째 로드까지는 Fig.12의 W = 4mm

일 때와 같이 로드 바로 밑에서 높게 나타나지만, 3번째 로드 이후 ($X/B > 2.5$)에서는 로드 직전의 Nu_r 이 로드 바로 밑의 Nu_r 보다 높게 나타난다. 이것은 로드 측면에 충돌하는 분류가 와류를 일으켜 이 부근의 온도경계층을 박막화시키기 때문이며(Photo. 1 참조)¹⁶⁾ 이 효과는 로드 바로 밑에서의 가속효과보다 크게 작용하므로 로드 바로 밑의 Nu_r 보다 높다. 따라서 $W = 6\text{mm}$ 인 경우에는 Fig.12의 $W = 4\text{mm}$ 와는 다르게 $X/B > 2.5$ (정체점으로부터 125mm) 이후의 영역이 되면 C 의 변화에 의한 로드 바로 밑의 가속효과보다는 로드

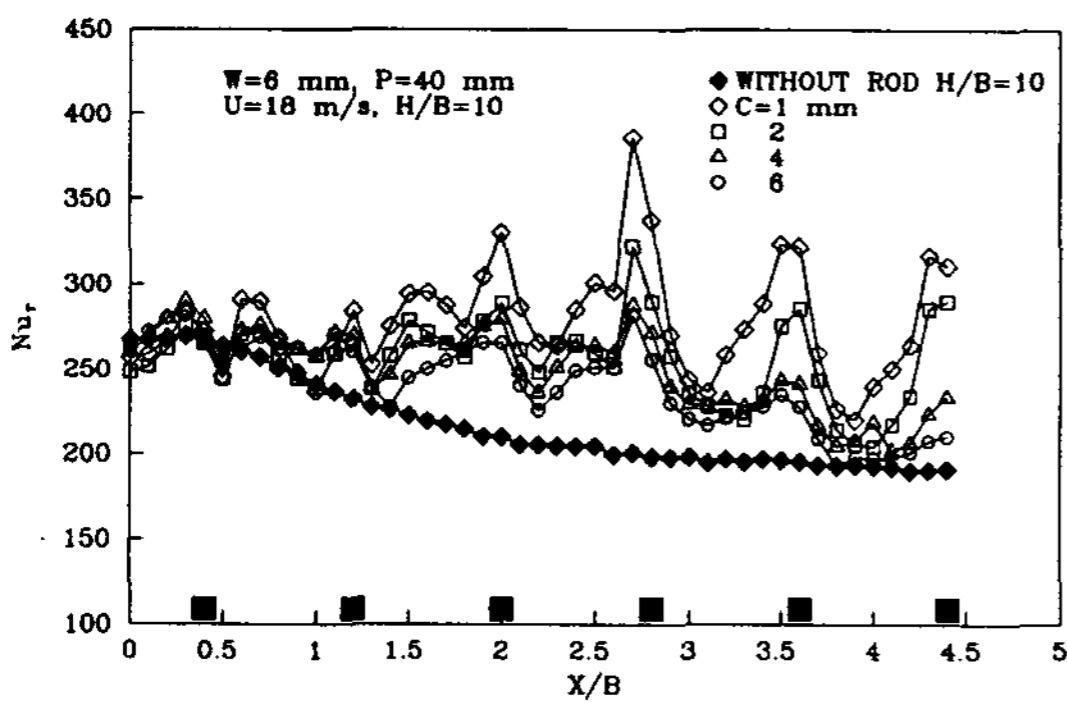


Fig. 14 Distribution of local Nu_r as a function of X/B for various clearances. ($W=6\text{mm}$, $H/B=10$)

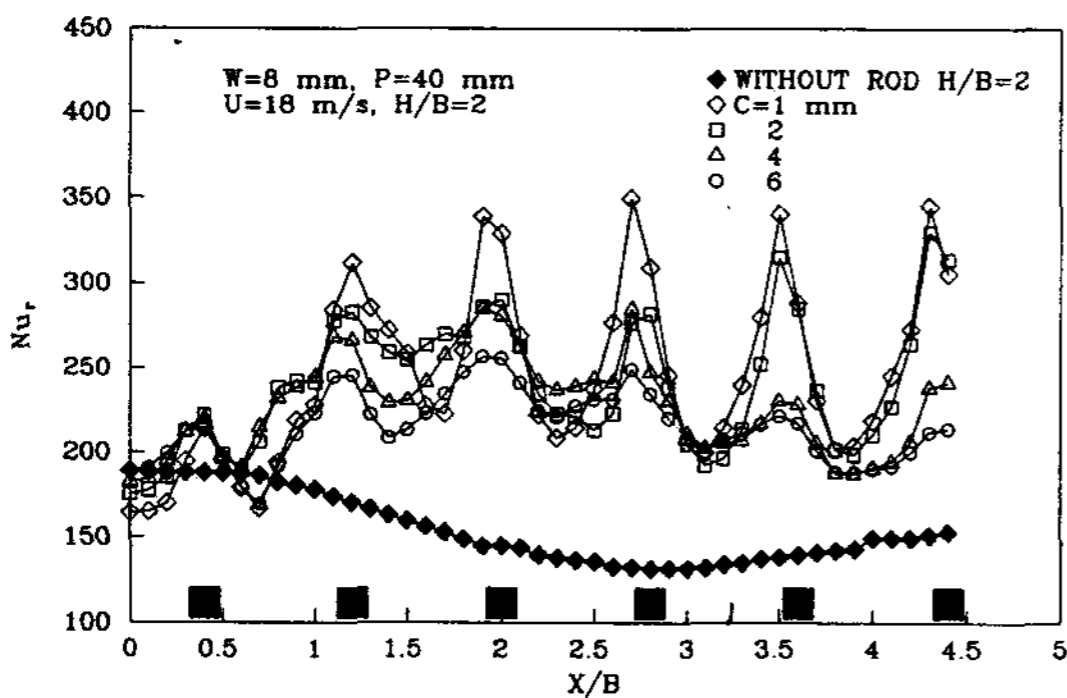


Fig. 15 Distribution of local Nu_r as a function of X/B for various clearances. ($W=8\text{mm}$, $H/B=2$)

직전에서의 와류에 의한 영향이 더 크게 작용하고 있음을 알 수 있으며, 이와같은 현상은 $C = 2\text{mm}$ 에서도 나타난다. 또한 C 의 변화에 대한 Nu_r 의 분포는 Fig.15에서 확인할 수 있듯이 C 가 클수록 전체적으로 낮아지는 현상이 나타난다.

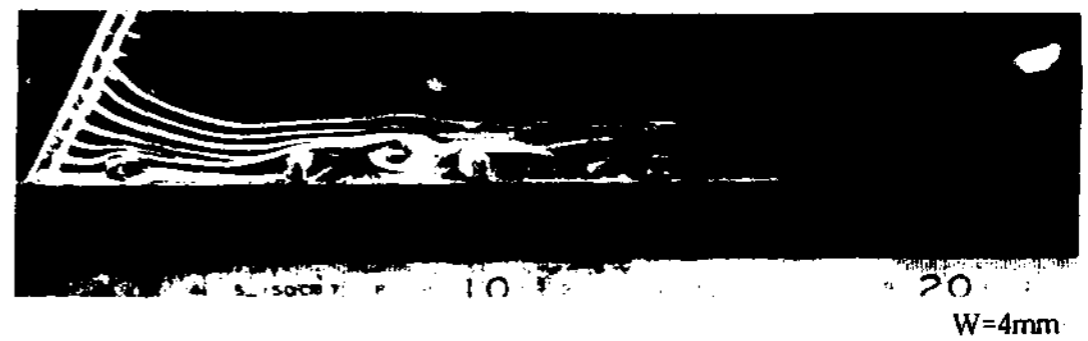


Photo. 1 Flow visualization for various widths between the flat plate and rod. ($C=1\text{mm}$, $P=40\text{mm}$, $H/B=2$)

Fig.16은 $W = 8\text{mm}$, $P = 40\text{mm}$, $U = 18\text{m/s}$, $H/B = 2$ 인 경우로 W 가 넓어짐에 따라 C 의 변화에 의한 유체의 가속효과 및 와류의 영향이 가장 크게 작용하고 있음을 알 수 있으며 C 의 변화와 관계없이 $X/B > 1.5$ 영역에서는 로드 바로 밑에서의 Nu_r 보다는 로드 직전에서의 Nu_r 이 더 높다.

Fig.17의 $H/B = 10$ 에서 이러한 현상은 더욱 명확하게 나타나며, 난류강도의 발달로 인한 와류의 영향은 C 가 증가함에 따라 급격하게 감소한다. 특히 $C = 6\text{mm}$ 인 경우에는 X/B

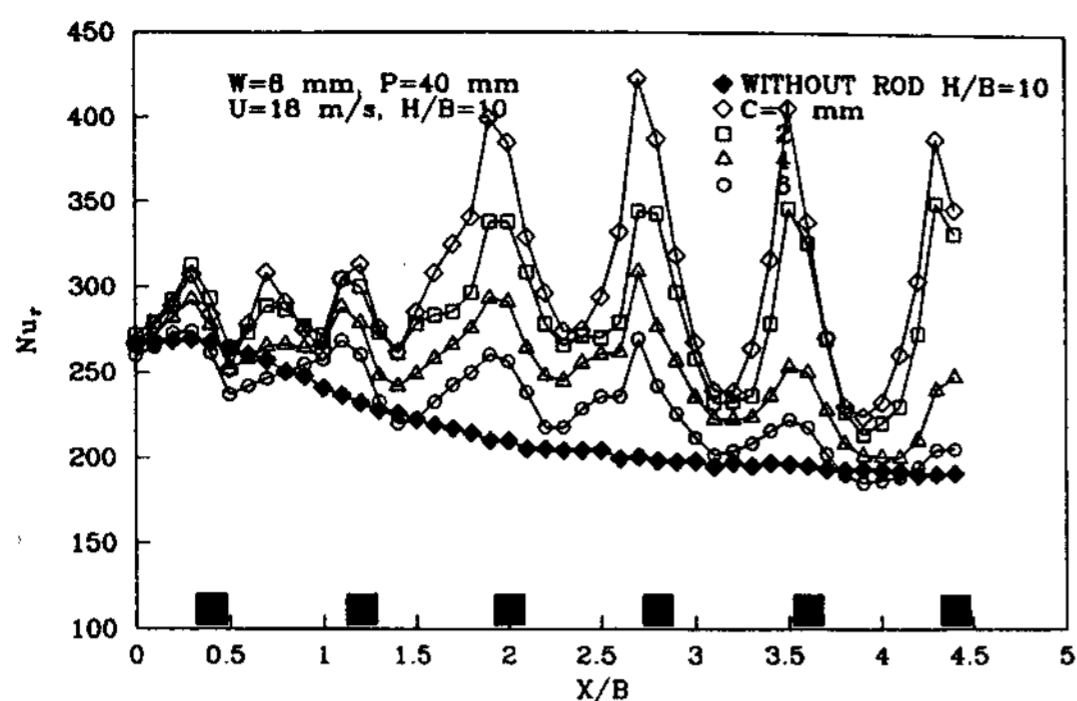


Fig. 16 Distribution of local Nu as a function of X/B for various clearances. (W=8mm, H/B=10)

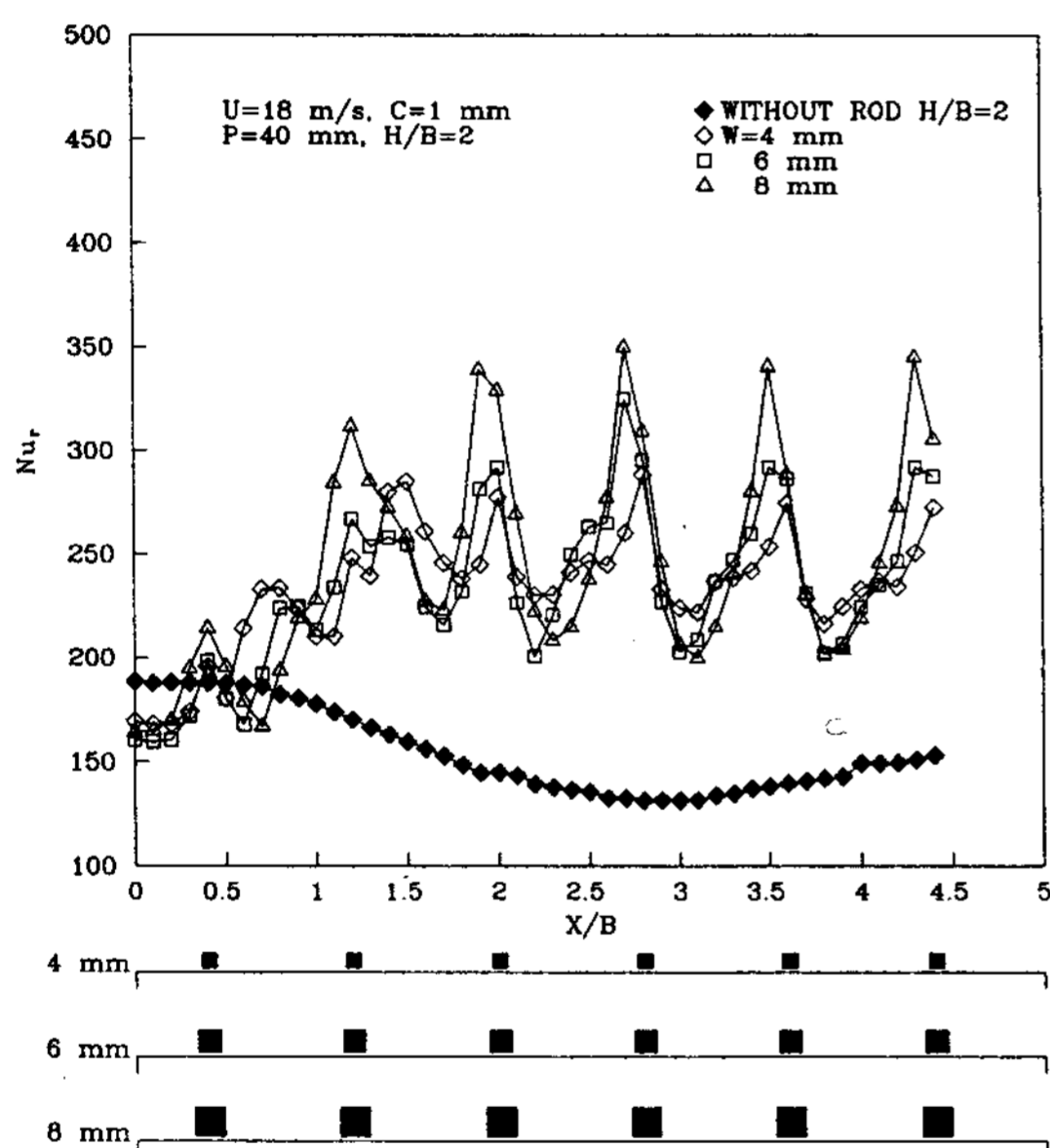


Fig. 17 Distribution of local Nu as a function of X/B for various width. (C=1mm, H/B=2)

> 3.5 영역에서 Nu_r은 로드를 설치하지 않은 평판보다 오히려 낮게 나타난다.

지금까지 고찰한 C의 변화에 대한 영향을 종합해보면 C가 작을수록

- i) 로드 바로 밑의 가속효과를 증진시키며
- ii) 박리 및 재부착에 의한 영향은 크게 받으며

iii) 와류 생성에 의한 효과가 크게 작용한다.

결국 C가 클수록 위의 3가지 영향을 기대할 수 없으므로 전열성능을 향상시키기 위해서는 C를 작게 하는 것이 바람직하다. 그러나 박리, 재부착 및 와류의 생성은 C의 변화에도 영향을 받지만 W 변화의 영향도 함께 받는 것으로 생각된다.

3-2-2. 로드 폭변화가 열전달에 미치는 영향

본 절에서는 로드 폭(이하 W라 함)변화가 열전달에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

전 절에서 C의 변화에 따른 전열증진율은 C = 1mm인 경우가 가장 우수하였으므로 C는 1mm로 고정할 때 W 변화에 의한 전열특성을 살펴보고 로드 없는 평판과 비교하고자 한다.

Fig.18은 U = 18m/s, C = 1mm, P = 40mm인 경우 충돌판을 포텐셜 코어영역인 H/B = 2의 위치에 설치할 때 W의 변화에 대한 Nu_r의 관계를 나타낸 것으로, W의 변화와 관계 없이 로드 설치하지 않은 평판에 비해 정체점 부근을 제외한 전영역에서 높은 Nu_r의 분포를 나타내고 있다.

W = 4mm인 경우, 충돌영역에서 Nu_r의 분포를 살펴보면 로드 직후에서는 박리로 인해 Nu_r이 낮게 나타나며, 로드와 로드 사이에서는 재부착에 의해 Nu_r이 높게 나타난다. 특히 이와같은 현상은 W = 6mm, 8mm에서는 볼 수가 없는데, 이것은 W = 4mm는 W = 6mm 및 8mm보다 상대적으로 로드폭이 작기 때문에 로드 바로 밑에서의 가속 효과가 작을 뿐만 아니라 이로 인한 박리도 일찍 일어나지만, 노즐 출구에서 분출한 유체는 로드의 높이가 낮기 때문에 W = 6, 8mm인 경우보다 전열면에 쉽게 충돌하면서 재부착하게 된다. 특히 W = 4mm인 경우에는 로드 바로 밑에

서 가속에 의한 유체의 속도가 $W = 6, 8\text{mm}$ 보다 작기 때문에 로드 바로 밑을 지나온 유체는 빨리 박리된다.

또한 $W = 4\text{mm}$ 일 때는 전영역에 걸쳐 로드 바로 밑에서 Nu_r 이 로드 직전의 Nu_r 보다 높게 나타나지만 $W = 6\text{mm}, 8\text{mm}$ 일 때는 벽면분류역역($X/B > 1.5$)으로 진행하면서 로드 직전의 Nu_r 이 로드 바로 밑의 Nu_r 보다 높게 나타난다. 이것은 3-2-1절에서도 언급했듯이 로드 직전에서 생기는 와류¹⁶⁾의 영향 때문이며 C 및 H/B 가 변해도 이와같은 현상은 확인할 수 있다. 특히 X/B 전영역에서 $W = 8\text{mm}$ 인 경우가 로드 직전에서 발생하는 와류의 영향이 가장 크게 나타나므로 벽면분류역역에서 와류의 발생은 C 및 W 에 의한 영향이라고 생각할 수 있다.

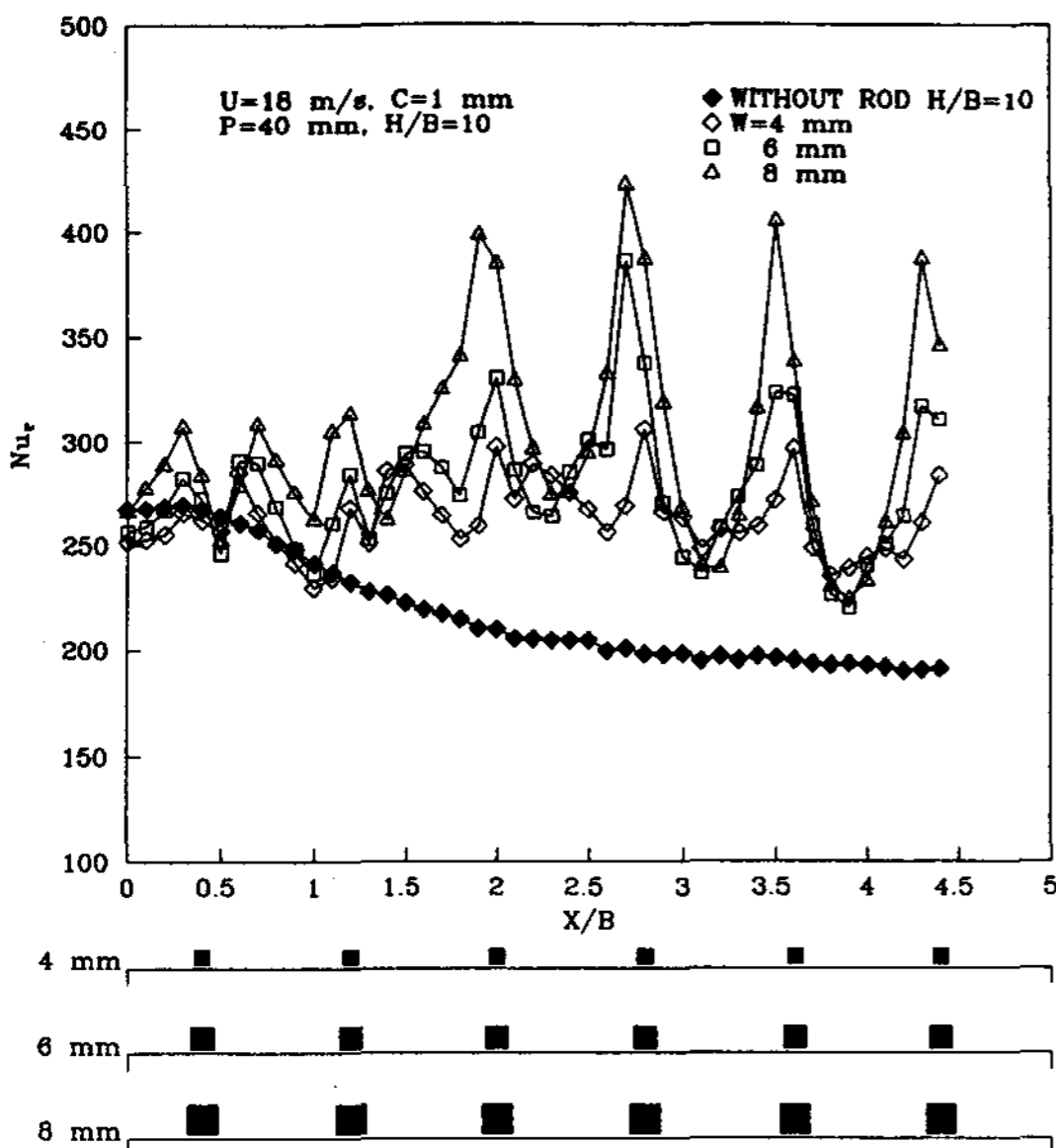


Fig. 18 Distribution of local Nu as a function of X/B for various width. ($C=1\text{mm}, H/B=10$)

Fig.19는 $U = 18\text{m/s}, C = 1\text{mm}$ 이고 충돌판

을 천이영역인 $H/B = 10$ 의 위치에 설치할 때 W 의 변화에 의한 Nu_r 의 관계를 나타낸 것으로, 전체적인 경향은 $H/B = 2$ 와 유사하지만 $H/B = 10$ 인 경우에는 분류의 난류강도가 충분히 발달한 상태에서 전열면에 충돌하기 때문에 $H/B = 2$ 보다는 Nu_r 이 훨씬 높게 분포되어 있다. 특히 $W = 6, 8\text{mm}$ 인 경우에는 3번째 로드 직전부터 와류에 의한 영향이 나타나지만 $W = 4\text{mm}$ 인 경우에는 와류에 의한 영향은 일어나지 않는다. 즉 와류는 벽면분류역역에서 분류가 로드 측면에 충돌하면서 일어나므로 W 가 비교적 작은 $W = 4\text{mm}$ 인 경우에는 분류의 충돌면적이 작기 때문에 와류의 생성은 일어나지 않는 것으로 생각된다. 따라서 W 가 클수록 와류의 영향도 크다.

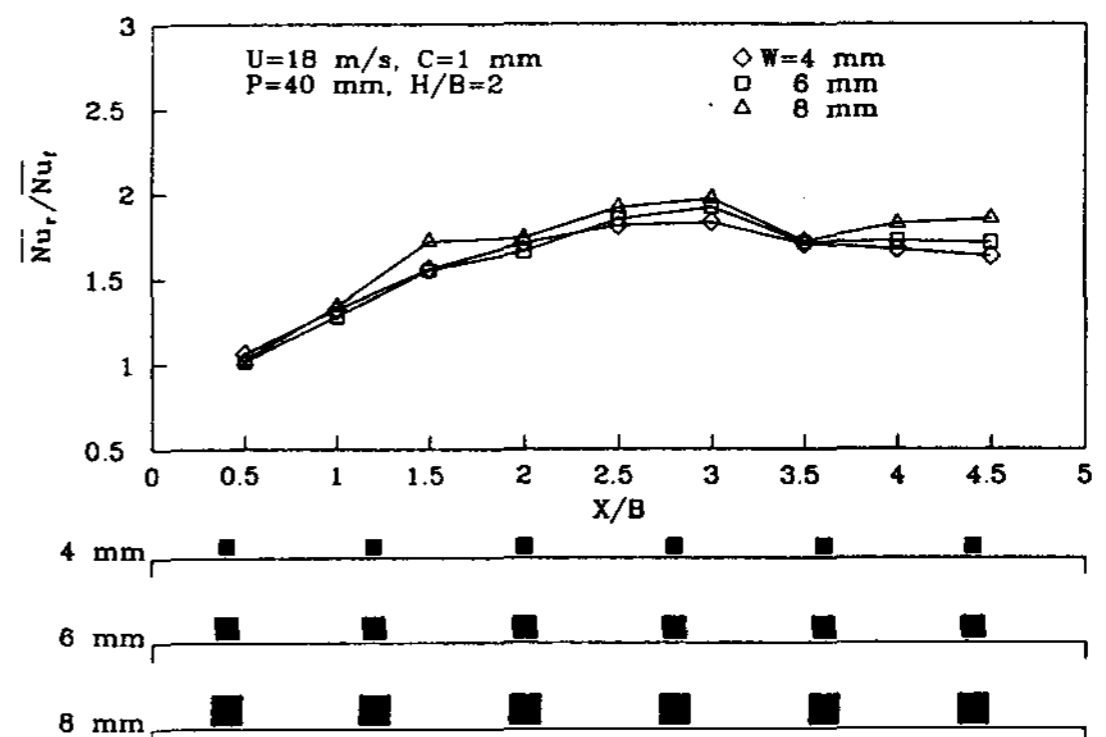


Fig. 19 Distribution of local average Nu as a function of X/B for various widths. ($C=1\text{mm}, H/B=2$)

Fig.20은 본 실험 범위 내에서 전열증진을 가장 우수한 $U = 18\text{m/s}, C = 1\text{mm}, H/B = 2$ 인 위치에 충돌판을 설치하고 W 를 4mm, 6mm, 8mm로 변화시킬 때 로드를 설치하지 않은 경우의 평균 Nu_r 와 로드를 설치한 경우의 평균 Nu_r 의 비를 나타낸 것으로 $W = 4\text{mm}$ 일 때는 평균 1.58배, $W = 6\text{mm}$ 일 때는

평균 1.6배, $W = 8\text{mm}$ 일때는 평균 1.67배의 전열증진율을 나타내고 있다.

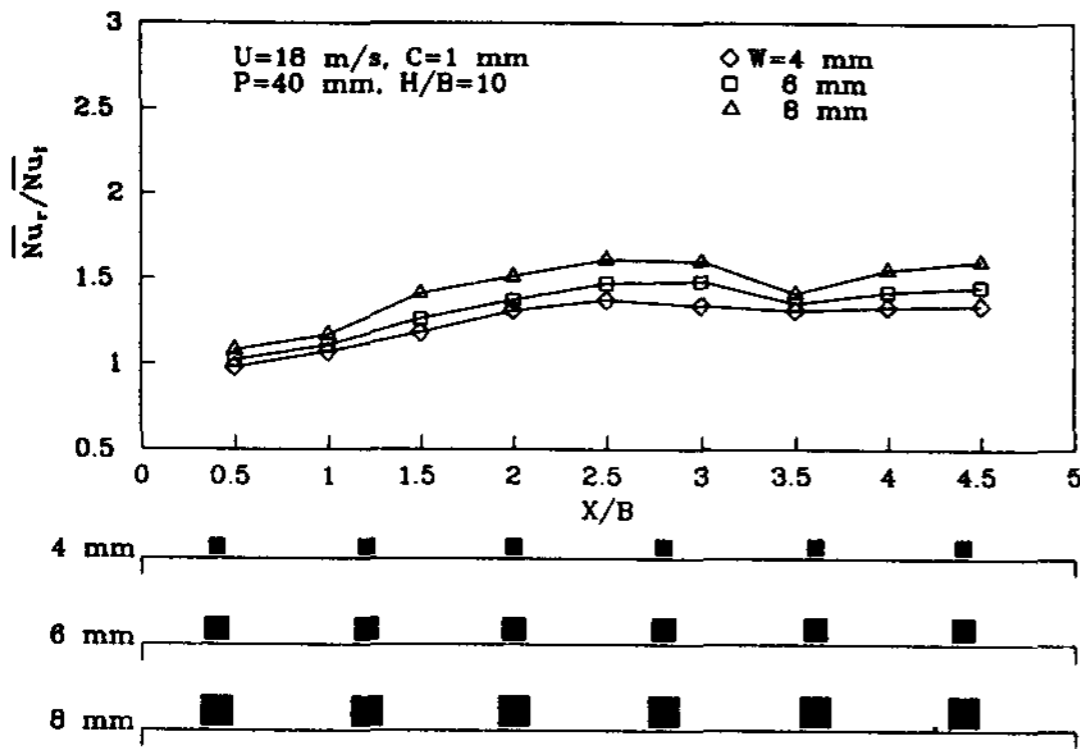


Fig. 20 Distribution of local average Nu as a function of X/B for various widths. ($C=1\text{mm}$, $H/B=10$)

Fig.21은 전열성능이 가장 우수한 $U = 18\text{m/s}$, $C = 1\text{mm}$, $H/B = 10$ 인 경우로서 로드 를 설치하지 않은 평판과 비교하면 전열증진 율은 평균적으로 $W = 4\text{mm}$ 일 때는 1.25배, $W = 6\text{mm}$ 일 때는 1.32배, $W = 8\text{mm}$ 일 때는 1.45배가 된다.

지금까지 고찰한 로드 의 폭(W)변화에 대한 영향을 종합해 보면

- i) W 가 클수록 로드 바로 밑에서의 가속 효과는 크며
- ii) W 가 클수록 벽면분류영역에서 로드 직전에 생기는 와류의 영향이 크게 작용하며
- iii) 박리와 재부착은 W 변화와도 관계된다.

4. 결 론

본 연구는 2차원 충돌공기분류계에서 전열 증진을 목적으로 전열면 앞에 정4각형 단면 로드 의 피치를 40mm 로 고정할때 다음의 조건 들 즉, 로드 의 폭($W = 4, 6, 8\text{mm}$), 로드와

전열면 사이의 간극($C = 1, 2, 4, 6\text{mm}$), 노즐 출구와 전열면 사이의 거리($H/B = 2, 6, 10, 14$) 및 노즐출구 속도($U = 2, 8, 14, 18\text{m/s}$)을 변화시킬 때의 전열특성을 실험적으로 규명하여, 로드 를 설치하지 않은 평판의 경우와 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

4-1. 로드 를 설치하지 않은 평판의 경우

1) 자유분류의 주축상에서 최대 전열성능을 얻을 수 있는 위치는 주위유체와의 혼합작용 이 활발하여 난류도가 가장 발달한 천이영역 인 $H/B = 10$ 이고, 전열성능이 가장 낮은 위치 는 포텐셜 코어영역인 $H/B = 2$ 이며, $U = 18\text{m/s}$ 일 때 $H/B = 10$ 인 경우가 $H/B = 2$ 인 경우보다 평균 Nu_r 는 약 41% 높게 나타난다.

2) 포텐셜 코어영역내에 충돌판을 설치하였 을 때 노즐 출구 속도변화에 관계없이 $X/B = 2.5$ 부근에서 Nu_r 는 다시 증가하기 시작하는 데 이것은 노즐 출구에서 발생한 와류가 성장 하여 이 부근에서 전열면상의 온도경계층을 박막화시키기 때문이다.

4-2. 로드 를 설치한 평판의 경우

1) 로드 를 설치하지 않은 평판의 경우에서 는 정체점 이후 Nu_r 이 계속적으로 감소하지만, 로드 를 설치할 경우에는 로드 에 의한 와 류생성, 가속화, 재부착 등에 의해서 정체점보 다 높은 Nu_r 을 얻을 수 있으며 국부적으로는 로드 를 설치하지 않은 평판보다 약 2.2배의 최대 국부전열증진율이 나타났다.

2) 로드와 전열면 사이의 간극(C)을 변화시 킬 경우, C 가 작을수록 로드 바로 밑에서의 가속 효과가 증진되며, 와류 및 재부착의 영 향이 크기 때문에 전열성능은 우수하다.

3) 로드 의 폭(W)을 변화시킨 경우 W 가 클 수록 로드 바로 밑에서의 가속 효과와 로드

직전에서 생기는 와류의 영향이 크게 나타나기 때문에 전열성능은 우수해진다.

References

1. R. Viskanta, Heat Transfer to Impinging Isothermal Gas and Flame Jets, Experimental Thermal and Fluid Science, 6, pp.111~134, 1993.
2. K. Kataoka, S. Hamano, K. Minamiura, G. Y. Li, "Local Control of Impinging Jet Heat Transfer by an Array of Circular Cylinders", Pro. 9th. Int. Heat Transfer Conference, Vol.1, pp.203~208, 1990.
3. 菱田 誠, "突起付き傳熱面の熱傳達", 第24回 日本傳熱シンポジウム講演論文集, pp.73~75, 1987.
4. M. J. Lewis, "Optimising the Thermohydraulic Performance of Rough Surfaces", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.18, pp.1243~1248, 1975.
5. M. M. Ali Khan, 笠木伸英, 平田賢, "衝突噴流熱傳達の増進技術に関する研究(第2報)", 第18回 日本傳熱シンポジウム講演論文集, pp.37~39, 1980.
6. 李龍和, "2次元 衝突噴流系에서의 熱傳達 増進技術에 관한 研究", 仁荷大學校 博士學位論文, 1989.
7. 日本機械學會, "傳熱工學資料", pp.65~66, 1986.
8. R. B. Abernethy, R. P. Benedict, R. B. Dowdel, "ASME Measurement Uncertainty", ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 107, pp.161~164, 1985.
9. R. Gardon, J. C. Akfirat, "Heat Transfer Characteristics of Impinging Two-Dimensional Air Jets", ASME Journal of Heat Transfer, Vol.88, pp.101~108, 1966.
10. C. Gau, C. M. Chung, "Surface Curvature Effect on Slot-Air-Jet Impingement Cooling Flow and Heat Transfer Process", ASME Journal of Heat Transfer, Vol.113, pp.858~864, 1991.
11. 増田 涉, 安藤 重大, "二次元噴流 における亂流計測", 日本機械學會論文集(B編), 54卷 497號, pp.45~50, 1988.
12. 崔斗燮, 琴聲民, 李龍和, 徐正閏, "衝突空氣噴流系에서의 傳熱促進技術에 관한 研究", 태양에너지學會論文集, 第1號, pp.11~21, 1993.
13. F. F. Cadek and R. D. Zerkle, "Local Heat Transfer Characteristics of Two-Dimensional Impinging Air Jets—Theory and Experiment", Proc. of 5th International Heat Transfer Conference, FC1. 4, pp.15~19, 1974.
14. N. T. Obot, A. S. Majumdar, W. J. M. Douglas, "The Effect of Nozzle Geometry on Impingement Heat Transfer under a Round Turbulent Jet", ASME Paper 79-WA/HT-53, 1979.
15. 朴聖洙, "旋回衝突噴流의 熱傳達 増進에 관한 研究", 仁荷大學校 博士學位論文, 1993.
16. 崔斗燮, "二次元 空氣噴流系에서의 亂流 促進體에 의한 傳熱増進에 관한 研究", 仁荷大學校 碩士學位論文, 1992.

An Experimental Study on Heat Transfer Augmentation by Square Rod in Impinging Air Jet System

(Effect of Rod Width)

Seong-Min, Kum* · Yong-Hwa, Lee** · Jeong-Yun, Seo*

* *Inha University*

** *Yuhan Junior College*

Abstract

This experimental study was carried out to examine the heat transfer characteristics of a 2-dimensional impinging air jet on a flat plate with a set of square rods. The objectives of the study were to investigate the flow and heat transfer characteristics caused by the square rods. Experiment was carried out first without using the rods to establish the baseline heat transfer performance. Then, rods of different widths and clearances were installed to cause the turbulence on the fluid flow. When rods are installed in front of the plate, the acceleration of the flow and the turbulence generation due to the rods and reattachment of the flow seem to contribute to the observed heat transfer augmentation and the heat transfer augmentation increases as the clearance decreases. With wider individual rod the heat transfer coefficient is higher, which is due to the increased acceleration and development of the eddies just before the rods.