

衝突板 近傍에 配列된 2次元 Rod가 衝突噴流 熱傳達에 미치는 影響 [2]: Rod 피치變化에 대한 效果

Heat Transfer Augmentation on Flat Plate with Two-Dimensional Rods in Impinging Air Jet System [2]: Effect of rod pitch

李 龍 和, 徐 正 閔**
Yong-Hwa Lee, Jeong-Yun Seo

ABSTRACT

The propose of this study is augmentation of heat transfer without additional external power in 2-dimensional impinging air jet. The passive heat transfer augmentation method tried in this experimental study is placement of rod bundles with the clearance, 2mm, in front of the heat transfer surface. The effects of pitch distance among rods and nozzle-to-target plate distance are investigated. The overall heat transfer rate of flat plate with rods reaches maximum at $H/B=10$ and $P=40\text{mm}$, and for $H/B=2$ and $P=40\text{mm}$ the augmentation rate of heat transfer becomes maximum to a value which is about 1.57 times that of the flat plate without rods.

記號說明

B : 노즐 出口幅 [mm]
C : 平板과 Rod 사이의 間隙 [mm]
d : Rod 直徑
h : 熱傳達 係數 [W/m² °C] = $q/(T_w - T_\infty)$
H : 노즐 - 衝突板間 距離 [mm]
 Nu, \bar{Nu} : 局部 및 平均 Nusselt數 = $h \cdot B / \lambda$,
 $(1/2x) \cdot \int_{-x}^x Nu dx$
P : rod 피치 [mm]
Re: Reynolds 數 = $U_e \cdot B / \nu$
 T_w : 傳熱面上的 局部溫度 [°C]
 T_∞ : 노즐出口에서의 空氣溫度 [°C]
X : 停滯點으로부터의 距離 [mm]

U_e : 노즐 出口 流速 [m/s]

λ : 熱傳導率 [W/m · °C]

ν : 動粘性 係數 [m²/S]

q : 熱流束 [W/m²]

< 아래 添字 >

C : rod 群을 設置한 平板

f : rod 群을 設置하지 않은 平板

1. 序 論

지난 수 십년 동안 衝突噴流 熱傳達에 대한 研究가 많이 수행되어 왔으나 이들 研究의 대부분은 平板에 垂直으로 衝突하는 경우에서 주로 衝突領域內的 熱傳達 特性에 관한 것이

* 仁荷大學校 大學院 機械工學科

** 仁荷大學校 機械工學科

었다. 그런데 衝突領域을 벗어난 壁面噴流領域에서의 熱傳達 效果는 停滯點 近傍에 비해 상대적으로 떨어지기 때문에 [1]-[5], 실제 工業的 應用에 있어서는 문제가 되고 있다.

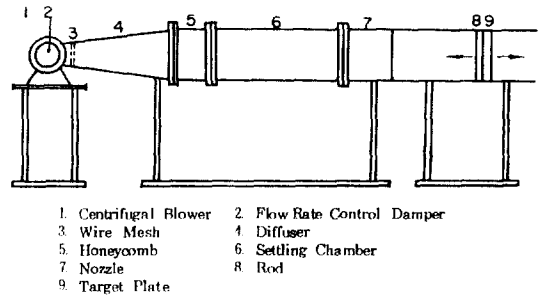
일반적으로 強制 對流 熱傳達에서 附加的 動力을 가하지 않는 受動的 傳熱增進法은 傳熱面의 加工, 즉 人工的인 粗度를 주거나 各種 亂流促進體를 設置하여 流體流動의 旋回, 攪亂, 加速, 剝離, 再附着의 作用으로 傳熱面 近傍의 流體의 交換 및 溫度境界層에 變化를 일으키게 하여 傳熱增進을 도모하게 된다.

衝突噴流系에서도 최근 몇 년 동안에 附加的인 動力을 가하지 않고 傳熱增進을 이룩할 수 있는 受動的인 傳熱增進法으로서 傳熱面에 人工的인 粗度를 주거나 [6]-[8], 傳熱面 前方에 多孔板을 設置하는 方法 [9]-[11]등을 통해서 연구된 바 있다.

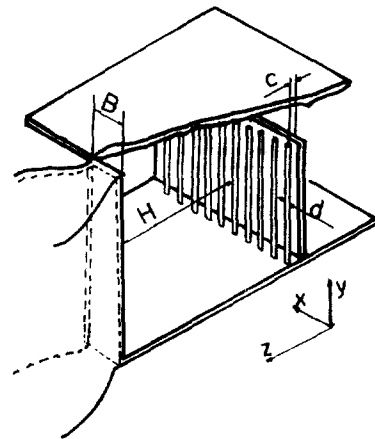
本 研究에서는 2次元 衝突噴流系에서 傳熱面에 變化를 주지 않고 熱傳達을 增進시키기 위한 技術로서 流體의 加速, 再附着 등의 흐름의 攪亂效果가 기대되며, 동시에 傳熱面 近傍에 간단히 設置할 수 있는 亂流促進體로서 傳熱面 前方에 間隙을 갖는 Rod 群을 設置하여 Rod의 Pitch 變化에 따른 영향에 대해 實驗하였다. Rod의 直徑($d = 4\text{mm}$), Rod와 傳熱面間의 間隙($C = 2\text{mm}$)을 일정하게 하고 노즐 出口와 傳熱面間의 距離(H/B)를 2~14, 노즐 出口速度(U_e)를 12~18 m/s, 그리고 Rod間의 Pitch를 30, 40, 50 mm로 變化시킬 때의 傳熱特性을 實驗적으로 究明하고, Rod를 設置하지 않은 平板 傳熱面의 경우와 熱傳達 性能을 비교·검토 하는데 그 目的이 있다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

衝突噴流系의 概略圖 및 座標系는 Fig.1(a) 및 (b)에 나타내었다. 空氣는 送風機①에 의해 보내지며, 流量은 댐퍼 ②로 조절한다. 均一한 流動을 얻기 위하여 流路에 鐵網③과 하니콤⑤를 設置하였으며, 4角노즐(出口幅



(a) Schematic diagram of experimental apparatus.



(b) Coordinate System

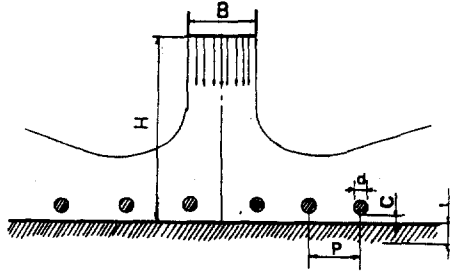
Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus and Coordinate system

50 mm, 絞縮比 15:1인 Sine 曲線)을 통해 平均流速 12~18 m/s 로 噴出시켰다. 이때 Reynolds 數의 範圍는 $3.85 \times 10^4 \sim 5.77 \times 10^4$ 이다. 노즐에서 噴出된 噴流는 平板 傳熱面 ⑨와 衝突하게 되며, 이 平板 傳熱面은 前·後로 移動可能 하게 하였다. 그리고 平板 傳熱面 前方에 Rod 群 ⑧을 設置하였다.

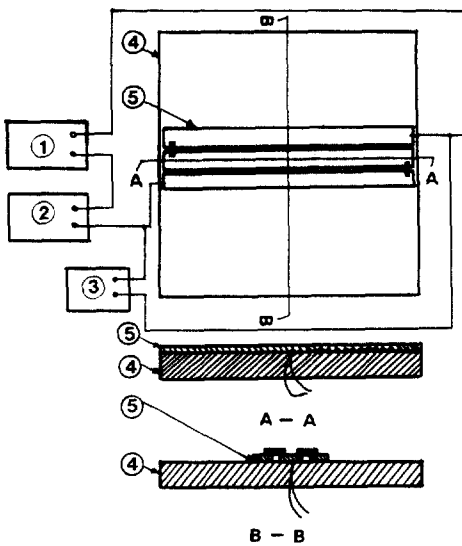
Fig.2(a) 및 (b)는 傳熱面과 Rod 系 및 傳熱面의 形狀을 나타낸 것이다.

Fig.2(a)에서 C는 傳熱面-Rod間 間隙을 나타내며, d는 Rod의 直徑, P는 Rod間 Pitch, t는 衝突板의 두께를 나타낸 것이다.

本 研究에서는 $C = 2\text{mm}$, $d = 4\text{mm}$ 로 고정하고, P를 각각 30, 40, 50 mm로 變化시켰다. Fig.2(b)는 傳熱面의 形狀을 나타낸 것이다.



(a) Heating plate-rod system



1. Ampmeter
2. Slidacs
3. Voltmeter
4. Bakelite plate
5. Stainless steel foil

(b) Heating plate

Fig. 2 Heating plate-rod system and heating plate

傳熱面은 두께 20 mm의 Bakelite板(500×500 mm)에 두께 0.03 mm인 스테인레스鋼箔板(10×500 mm) 3枚를 X方向으로 附着하고 銅板으로 直列連結 하였으며, 自動電壓調整器와 슬라이닥스를 사용하여 供給電壓을 조절하여 熱流束을 1020 W/m²으로 一定하게 유지하는 直接通電 加熱法을 사용하였다. 傳熱面의 溫度測定은 0.07 mm인 C-C 熱傳對를

停滯點으로부터 5mm 간격으로 스테인레스鋼箔板의裏面に 납땜 附着하고 Data Logger에 연결하여 各點마다 10회 反復測定하여 그들의 平均値를 취하였다.

그리고 實驗에 사용한 四角노즐의 2次元性은 實驗의으로 이미 확인하였다.[6]

3. 實驗結果 및 考察

3-1. 局部 Nusselt 數

平板 傳熱面에서 노즐의 出口流速이 18m/s인 경우 노즐과 傳熱面間의 無次元距離(H/B)를 Parameter로 하여 停滯點(X/B=0)으로부터 X方向으로의 局部 Nu의 變化를 Fig.3에 나타내었다.

停滯點의 熱傳達 特性을 보면 H/B = 10인 條件에서 Nu가 最大로 되는데 이와 같은 現象은 噴流의 亂流도가 이 部分에서 가장 크기 때문이다.[1] X方向의 局部 Nu 分布는 X方向의 距離가 增加함에 따라 Nu는 점차적으로 減少한다. 따라서 壁面噴流領域에서의 熱傳達을 促進시키기 위해서, 本 研究에서는 傳熱面 前方에 直徑 4mm의 Rod 群을 傳熱面과 2mm의 間隙을 두고 設置하여 Rod 間의 Pitch 變化에 따른 影響을 實驗한 結果에 대해 考察해 보고자 한다.

Fig. 4~Fig. 6은 노즐 出口流速을 18m/s로 한 경우 Rod를 設置한 平面에서의 局部 Nu 分布를 3種의 Pitch(P = 30, 40, 50 mm)에

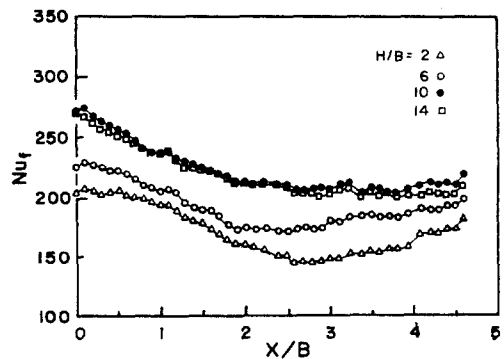


Fig. 3 Local heat transfer coefficient distribution for the flat plate without rods ($U_e = 18 \text{ m/s}$).

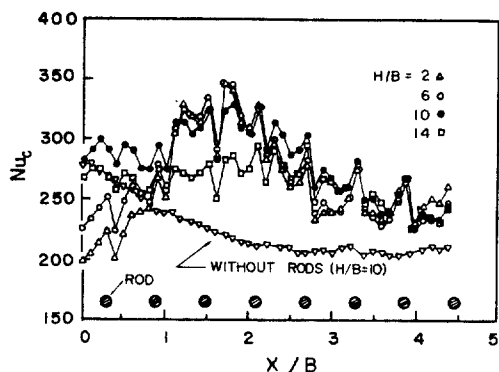


Fig. 4 Local heat transfer coefficient distribution for the flat plate with rods ($U_e = 18 \text{ m/s}$, $P = 30 \text{ mm}$).

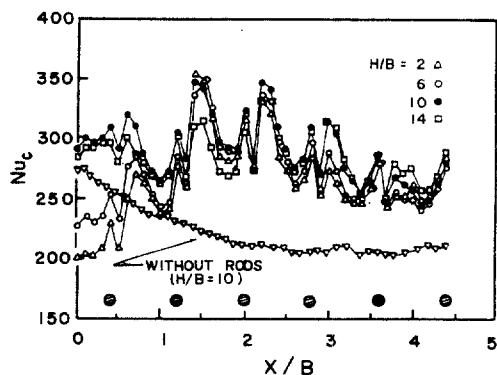


Fig. 5 Local heat transfer coefficient distribution for the flat plate with rods ($U_e = 18 \text{ m/s}$, $P = 40 \text{ mm}$).

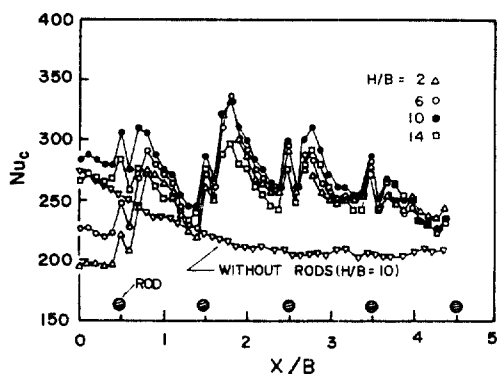


Fig. 6 Local heat transfer coefficient distribution for the flat plate with rods ($U_e = 18 \text{ m/s}$, $P = 50 \text{ mm}$).

대해 각각 나타낸 것이다.

Fig. 4의 Rod 간 Pitch가 30mm인 경우에 H/B에 따른 熱傳達의 영향을 보면 停滯點 부근인 $X/B < 1$ 인 領域에서는 H/B의 영향이 크게 나타나고 있으며, 停滯點에서의 Nu는 Rod를 設置하지 않은 경우 (Fig. 3參照)와 마찬가지로 H/B=10에서 最大로 된다. $X/B \geq 1$ 인 領域에서의 Nu分布는 H/B의 영향을 거의 나타내지 않으며, Rod直下點에서 Nu의 第1極大值가 나타나고 Rod直後에서 Nu의 極小值가, 그리고 隣接한 두 Rod사이에서 제2의 極大值가 나타나는 周期的인 分布를 나타낸다. 여기서 Nu의 第1極大值는 Rod直下에서 Rod와 傳熱面 사이를 통과하는 流體의 加速에 의한 영향 때문이라고 생각되며, Rod直後에서의 Nu의 減少는 流體가 平板에서 剝離하기 때문에 일어나는 現象이며, 두 Rod사이에서 나타나는 第2極大值는 流體가 平板에 再附着하기 때문에 일어나는 效果라고 생각된다.[12].

이상의 局部 Nu 分布형상은 Figs. 5 & 6의 Pitch가 40, 50mm인 경우에도 동일하게 나타나고 있다. 그러나 두 Rod사이에서 나타나는 Nu 極大值는 Pitch가 增加할수록 再附着에 의한 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. 停滯點에서의 熱傳達系數는 Pitch變化에 큰 영향을 받지 않으며, Rod를 設置하지 않은 平板에 비해서도 增進은 거의 없다. 그렇지만 停滯點으로부터 첫번째 Rod까지의 Nu 分布를 보면 Pitch가 가장 작은 30mm인 경우에 停滯點으로부터의 Nu 增加 경향이 가장 큰데 이것은 停滯點 近傍에 設置된 Rod에 의한 流體攪亂 때문이며, Pitch가 작을수록 이 效果가 커지기 때문이라고 생각된다.

Fig. 7은 노즐 出口流速이 18m/s인 경우에 H/B를 Parameter로 하여 $P=40\text{mm}$ 인 Rod群을 設置한 平板과 Rod를 設置하지 않은 平板과의 局部 Nu의 比를 X/B에 따라 나타낸 것이다. 停滯點을 제외한 X/B의 全 領域에서 局部 熱傳達係數가 增進됨을 나타내며, Rod直後(局部 Nu 極小值點)에서도 Rod

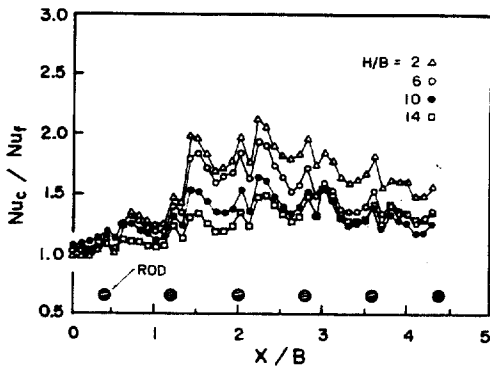


Fig. 7 Comparison with local heat transfer coefficient on the flat plate with and without rods ($U_e = 18 \text{ m/s}$, $P = 40 \text{ mm}$).

를 設置하지 않은 경우에 비해 局部 熱傳達의 增進效果가 있음을 나타내고 있다. 특히 局部的으로는 Rod 直下點(加速에 의한 熱傳達 增進)과 Rod 사이의點(再附着에 의한 現象)에서 2倍以上의 높은 熱傳達 增進을 얻을 수 있다. 그리고 Rod 를 設置하지 않은 경우 衝突噴流의 Potential Core 領域內에 衝突板이 設置된 경우인 $H/B = 2$ 에서의 局部 Nu 값은 전반적으로 낮게 나타났으나 Rod群을 設置하므로써 가장 높은 局部 熱傳達 增進率을 보이고 있다. 따라서 衝突噴流를 이용한 加熱, 冷却 裝置에 간단히 Rod 群을 設置하므로써 傳熱效果를 거두면서 裝置의 小型化를 이룩할 수 있을 것이다.

Fig. 8은 $P = 40 \text{ mm}$, $H/B = 10$ 인 경우에 노즐 出口의 流速變化에 따른 局部 Nu 分布

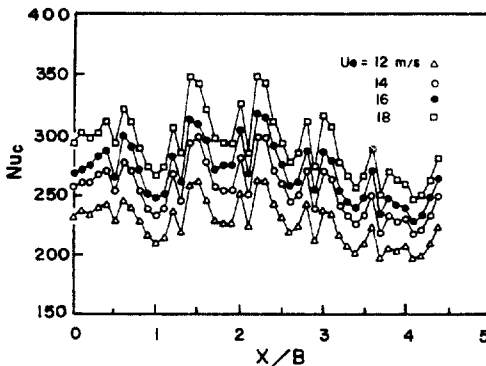


Fig. 8 Local heat transfer coefficient for the flat plate with rods ($P = 40 \text{ mm}$, $H/B = 10$).

를 나타낸 것이다. 노즐 出口流速이 增加하면 熱傳達係數는 增加하지만 X/B 의 方向的 局部 Nu 分布는 本 實驗範圍에서는 모든 速度에 대해서 유사한 경향을 갖는다.

이상 앞에서 언급한 局部 Nu 分布에 대한 現象을 명확히 究明하기 위해서 流動의 可視化가 앞으로 수행되어야 할 것이라고 생각된다.

3-2. 平均 Nusselt 數

本 研究에서 平均 Nu (\bar{Nu})는 $\bar{Nu} = 1 / (2X) \cdot \int_0^X Nu \, dx$ 로 定義하였으며, Fig. 9 ~ Fig. 11은 平均 Nu와 X/B 의 關係를 나타낸 線圖이다.

Fig. 9는 Rod의 Pitch가 30mm인 경우로서, Rod를 設置하지 않은 경우에 Nu의 減少率이 큰 領域에서 오히려 \bar{Nu} 가 增加하는 것을 알 수 있다. $X/B \leq 1.5$ 인 영역에서 $H/B = 2.6$ 인 경우에 \bar{Nu} 는 급격히 증가함을 나타내며, $H/B = 10, 14$ 인 경우에는 그 增加率이 작게 나타나고 있다. 이러한 現象은 一般 亂流噴流에서는 $H/B = 10$ 近傍에서 亂流度가 最大가 되기 때문에 Rod의 設置效果는 그다지 크게 나타나지 않는다. 그러나 Potential Core 영역內에 衝突板이 設置되는 $H/B = 2.6$ 의 경우에는 Rod를 設置하므로써 Rod 주위에서 亂流가 促進되어 流體의 流動이 활발하게 되기 때문이라고 생각된다. 그리고 \bar{Nu} 는 $X/B = 1.5 \sim 2$ 인 領域에서 最大值에 도달한 후 이후 下流域으로 이동함에 따라 流速의 減少로 인해 점차 平均熱傳達係數는 減少한다.

Figs. 10 & 11의 Pitch 40, 50 mm인 경우도 동일한 경향을 나타낸다. 또한 3種의 Pitch 어느 경우나 H/B 가 커짐에 따라 \bar{Nu} 도 增加하여 $H/B = 10$ 에서 거의 最大가 되는데 그 이상에서는 다시 減少하며, 下流領域으로 갈수록 H/B 에 따른 \bar{Nu} 의 差는 작아지고 있다.

Fig. 12는 $U_e = 18 \text{ m/s}$, $H/B = 2$ 에서 Rod를 設置한 平板의 各 Pitch에 대한 \bar{Nu} 를 Rod를 設置하지 않은 平板과 비교하여 나타

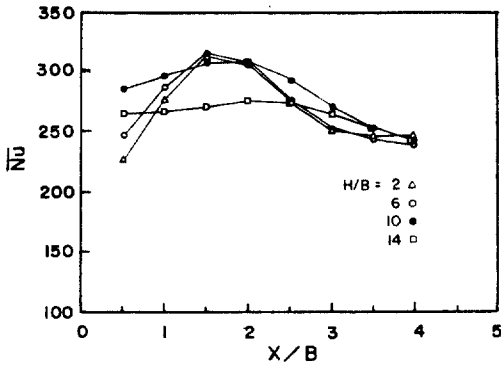


Fig. 9 Average heat transfer distribution in X-direction by integration. ($U_e=18\text{ m/s}$, $P=30\text{ mm}$)

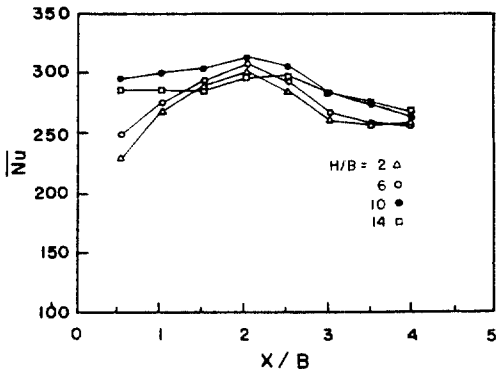


Fig. 10 Average heat transfer distribution in X-direction by integration. ($U_e=18\text{ m/s}$, $P=40\text{ mm}$)

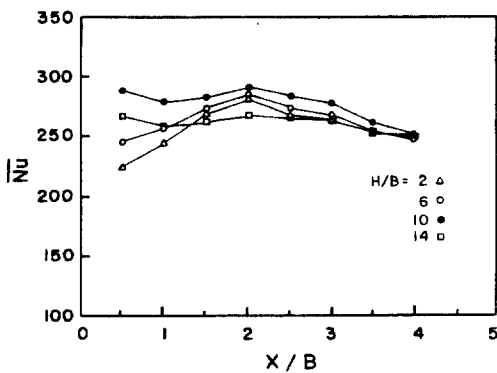


Fig. 11 Average heat transfer distribution in X-direction by integration. ($U_e=18\text{ m/s}$, $P=50\text{ mm}$)

낸 것이다. Rod 를 設置하므로써 Rod 를 設置하지 않은 경우보다 높은 熱傳達 增進을 얻을 수 있으며, Rod 를 設置한 경우 Rod의 Pitch 가 增加할수록 \overline{Nu} 의 最大值는 下流域으로 이동하며, 最大值 以前의 上流域의 \overline{Nu} 의 增加率도 점차 작아진다. 그러나 \overline{Nu} 最大值 以後의 \overline{Nu} 變化는 Pitch 가 增加할수록 점차 減少率이 작아지며, Pitch 變化에 따른 영향도 점차 減少하고 있다. 이와 같은 원인은 最大值 以前의 上流域에서는 Rod 를 設置하므로써 流體의 亂流效果로 인해 높은 熱傳達 增加率을 얻을 수 있지만 最大值 以後의 下流域에서는 Rod 數가 增加할수록, 즉 Pitch 가 減少할수록 Rod 에 의한 流動抵抗이 增加하여 流速이 減少하기 때문에 下流域에서의 \overline{Nu}

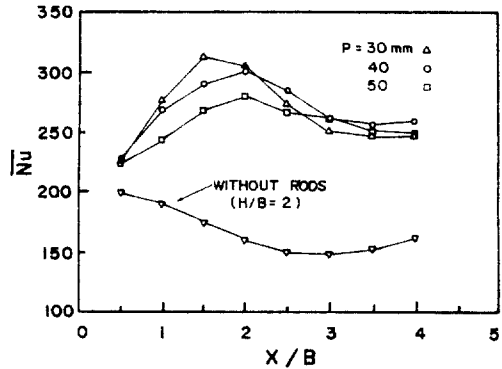


Fig. 12 Average heat transfer distribution in X-direction by integration. ($U_e=18\text{ m/s}$, $H/B=2$)

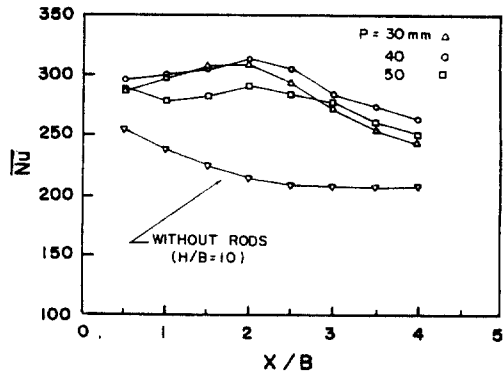


Fig. 13 Average heat transfer distribution in X-direction by integration. ($U_e=18\text{ m/s}$, $H/B=10$)

는 점차 減少된다고 생각된다.

Fig. 13의 $H/B=10$ 인 경우에는 \overline{Nu} 의 最大値가 $X/B=2$ 近傍에서 나타나며 이 領域上流域에서의 \overline{Nu} 分布의 傾向은 $H/B=2$ 경우와 같은 \overline{Nu} 의 급격한 增加는 없다. 이것은 $H/B=10$ 일 때는 傳熱面에 衝突하는 噴流가 이미 亂流의 상태로 衝突하므로 Rod를 設置하여도 亂流促進效果가 $H/B=2$ 인 경우와 같이 그리 크지 않기 때문이라고 생각된다.

$X/B=2$ 以後의 下流域에서의 Nu 分布는 $H/B=2$ 의 경우와 같이 流動抵抗의 增加로 인한 流速의 減少 때문에 \overline{Nu} 의 減少率은 점차 작아진다.

Rod Pitch 變化에 따른 最適 設置條件을 알아보기 위하여 $X/B=0$ (停滯點)부터 $X/B=4$ 까지 積分한 平均熱傳達係數를 Fig. 14

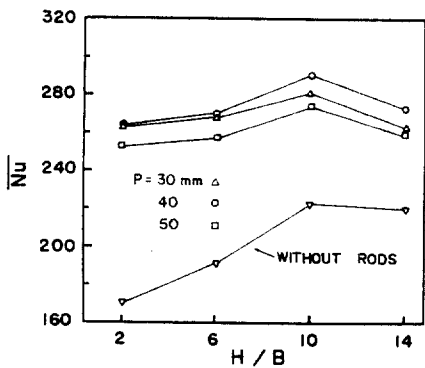


Fig. 14 Overall heat transfer coefficient on plate placed at various axial distance from nozzle exit. ($U_e = 18 \text{ m/s}$)

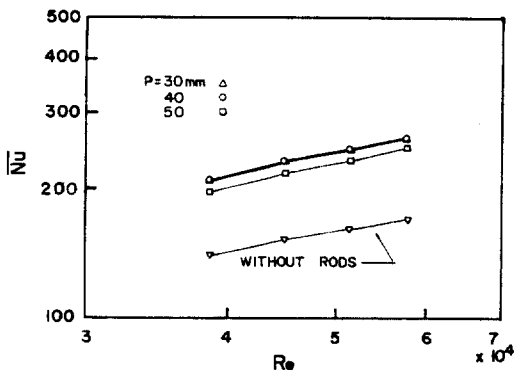


Fig. 15 Overall heat transfer coefficient for various Reynolds number. ($H/B=2$)

에 나타내었다. Rod를 設置하면 本 實驗範圍의 모든 H/B , Pitch에 관계없이 Rod를 設置하지 않은 경우보다 熱傳達 增進을 얻을 수 있다. $P=40$, $H/B=10$ 인 條件에서 가장 높은 熱傳達 效果를 얻을 수 있으며, 특히 $P=40$, $H/B=2$ 인 경우에 最大 熱傳達 增進率을 얻을 수 있는데, Rod를 設置하지 않은 경우보다 약 1.57배의 높은 增進效果를 얻을 수 있다.

또한 모든 H/B 에 대해 最適 Rod設置條件은 $P=40 \text{ mm}$ 임을 알 수 있다.

Fig. 15의 $H/B=2$ (Potential Core 領域內)인 경우에 傳熱面 全體(停滯點부터 $X/B=4$ 까지)의 積分平均 Nu 를 Re 에 대해 나타낸 것이다. Re 增加와 함께 傳熱面의 熱傳達 效果가 增加함을 알 수 있으며, 또한 Rod를 設置하지 않은 경우의 熱傳達 係數는 層流의 상태로 噴流가 衝突하기 때문에 낮은 값을 갖지만, Rod를 設置하면 Rod에 의해 흐름이 급격한 亂流로 遷移하기 때문에 높은 熱傳達係數를 나타낸다.

4. 結 論

본 研究는 2次元 衝突噴流系에서 熱傳達을 增進시키기 위한 方法으로서 平板 傳熱面 前方에 Rod 群을 設置하여 노즐-傳熱面間 距離와 Rod 피치 變化에 대해 實驗한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 平板 傳熱面 前方에 Rod 群을 設置하므로써 熱傳達 效果가 上昇한다.

2) 모든 H/B 에 대해 熱傳達係數値가 最大가 되는 最適 Rod Pitch 條件은 40 mm 이다.

3) Rod를 設置하므로써 傳熱面 全體의 平均 熱傳達係數는 $H/B=10$, $P=40 \text{ mm}$ 일때 最大가 되며, 最大 熱傳達 增進率은 $H/B=2$, $P=40 \text{ mm}$ 에서 나타나는데 Rod를 設置하지 않은 경우 보다 약 1.57배 增進한다.

4) Rod 群을 設置하므로써 熱傳達 增進을 얻을 수 있으나, $H/B > 10$ 인 條件이 되면 增進率의 기대효과가 적어지므로 Rod 設置效果

에 한계가 있다.

參考文獻

1. R. Gardon and J.C. Akfirat, "The role of Turbulence in Determining the Heat Transfer Characteristics of Impinging Jets", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.8, pp.1261-1272, 1965.
2. R. Gardon and J.C. Akfirat, "Heat Transfer Characteristics of Two-Dimensional Impinging Air Jets", *J. of Heat Transfer*, pp.101-108, 1966.
3. F.F. Cadek and R.D. Zerkle, "Local Heat Transfer Characteristics of Two-Dimensional Impinging Air Jets - Theory and Experiments", *Proc. 5th International Heat Transfer Conference*, FC1.4, pp. 15-19, 1974.
4. W.D. Baines and J.F. Keffer, "Shear Stress and Heat Transfer at a Stagnation Point", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.19, pp.21-26, 1976.
5. Cz. O. Popiel, Th. Van Der Meer and C.J. Hoogendoorn, "Convective Heat Transfer on a plate in an Impinging Round Hot Gas Jet of Low Reynolds Number", *Int. J. Heat Transfer*, Vol.23, pp.1055-1068, 1980.
6. 金相弼, 徐正閔, "4角리브를 갖는 傳熱面에 衝突하는 2次元 噴流의 熱傳達에 관한 研究", *大韓機械學會 論文集*, 第11卷, 第2號, pp.214-221. 1987.
7. 車指永, 平田賢, "大規模組さを有する平板に衝突する二次元噴流の構造", *流れの可視化*, Vol. 4, No.14, pp.77-82, 1984.
8. 三宅常時, 笠木伸英, 平田賢, "矩形組さによる 二次元衝突噴流 の増進に関する研究", 第25回 日本傳熱シンポジウム講演論文集, A145, pp.61-63. 1988.
9. M.M. Ali Khan, N. Kasagi, M. Hirata and N. Nishwaki, "Heat Transfer Augmentation in an Axisymmetric Impinging Jet", *Proc. The 7th International Heat Transfer Conference*, Vol.3 FC63, pp.363-368, 1982.
10. 李寶錫, 金相弼, 徐正閔, "衝突空氣 噴流에 의한 平板上에서의 熱傳達에 관한 實驗的 研究", 仁荷大學校 産業科學技術研究所 論文集, 第14輯, pp.67-74, 1986.
11. D.M. Kercher, W. Tabakoff, "Heat Transfer by a Square Array of Round Air Jets Impinging Perpendicular to a flat surface including the Effect of Spent Air", *J. of Engineering Power*, *Trans. ASME. Ser. C*, Vol.92, No.1, pp.73-82, 1970.
12. 藤田秀臣, 高浜平七郎, 浴壽美, "壁面近傍にずれた 二次元圓柱が平板強制 對流熱傳達にすよぼす影響", *日本機械學會 論文集 (B編)*, 47卷, 414號, pp.317-324. 1981.