

衝突板 近傍에 配列된 2次元 rod가 衝突噴流 熱傳達에  
미치는 影響 [ 3 ] : rod直徑變化에 대한效果  
Heat Transfer Augmentation on Flat Plate with Two-Dimensional  
Rods in Impinging Air Jet System [3]:Effect of Rod Diameter

金 東 春\*, 李 龍 和\*\*, 徐 正 閔\*\*\*  
D. C. Kim, Y. H. Lee , J. H. Seo

ABSTRACT

The purpose of this study is augmentation of heat transfer without additional power in two-dimensional impinging air jet.

The technique of heat transfer augmentation used in this experiment is to place rod bundles in front of the flat heated surface.

The effects of rod diameter, nozzle-to-target plate distance and the nozzle exit velocity on heat transfer have been investigated.

The main conclusions obtained from this experiment are as follows.

High heat transfer augmentation is achieved by means of flow acceleration and thinning of boundary layer by placing rod bundles in front of the flat plate.

Average heat transfer coefficient becomes maximum in the case of  $H/B=10, D=4\text{mm}$ .

For  $H/B=2, D=4\text{mm}$ , maximum heat transfer augmentation has been determined to be about 1.5 times larger than that of the flat plate.

Heat transfer augmentation by placing the rod bundles at 12m/s is to be about 2 times more than increasing nozzle exit velocity from 12m/s to 18m/s.

記 號 說 明

$B$  : 노즐 出口幅 (mm)

$C$  : 平板傳熱面과 rod 사이의 間隙 (mm)

$D$  : rod 直徑 (mm)

$h$  : 熱傳達係數 ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

$H$  : 노즐-傳熱面間 距離 (mm)

$L$  : 노즐 出口 높이 (mm)

$Nu = h \cdot B / \lambda$  : 局部 Nusselt 數

$\overline{Nu} = \int_{-x}^x Nu \cdot dx / \int_{-x}^x dx$  : 局部平均 Nusselt 數

$\overline{Nu}_o = \int_0^{x=B} Nu \cdot dx / \int_0^{x=B} dx$

: 平均 Nusselt 數

$P$  : Rod 피치 (mm)

$Re = Ue \cdot B / \nu$  : Reynolds 數

\* 金星中央研究所

\*\* 柳韓工業專門大學 建築設備科

\*\*\* 仁荷大學校 機械工學科

- $U_e$  : 노즐 出口流速 (m/s)
- $X$  : 停滯點으로부터의 距離 (mm)
- $\lambda$  : 熱傳導率 (W/m<sup>2</sup>°C)
- $\nu$  : 動粘性係數 (m<sup>2</sup>/s)
- (아래 添字)
- f : rod 群을 설치하지 않은 平板
- r : rod 群을 설치한 平板

1. 緒 論

傳熱面을 흐름에 垂直으로 세워 衝突시키는 衝突噴流는 停滯點 近傍에서 熱 및 物質傳達 效果가 높기 때문에 많은 究研가 있어왔다. 특히 衝突噴流는 動力源의 容量이 작고 比較的 簡單한 構成과 流量制御에 의한 熱 및 物質傳達의 微小調整이 容易하기 때문에 單相 強制 對流熱傳達의 한 方法으로서 工業적으로 많이 應用되고 있다.

衝突噴流의 工業的 應用 例로는 織物이나 製紙의 乾燥, 유리의 Tempering, 가스터어빈 翼의 冷却 등을 들 수 있다.<sup>1,2)</sup>

噴流를 平板에 垂直으로 衝突시킬 때의 流動領域은 Fig.1 과 같이 自由噴流領域 (Free jet region), 衝突領域 (Impingement region), 壁面噴流領域 (Wall jet region) 으로 구분된다.

衝突噴流熱傳達到 대한 究研는 지난 30 年 간 광범위하게 究研되어 왔는데 그 始初의 究研는 Gardon 等<sup>3,4)</sup>에 의해 이루어졌으며 이후의 衝突噴流 熱傳達到에서의 研究結果를 요

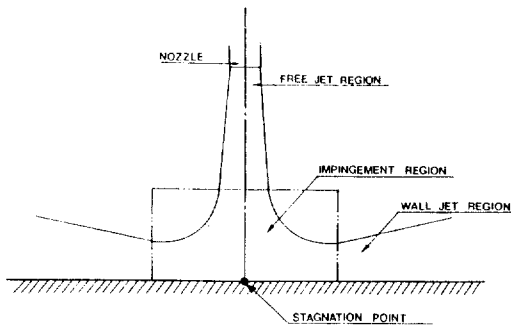


Fig. 1 Classification of flow field in impinging jet

약하면 壁面噴流領域에서의 傳熱性能은 溫度 境界層의 成長 때문에 停滯點 近傍에 비해 相對的으로 떨어지므로 이 領域에서의 傳熱促進이 必要하게 된다.

최근 몇년동안에 衝突噴流系에서의 傳熱促進法으로서 附加的인 動力을 加하지 않는 受動的 方法으로 傳熱面의 擴大나 人工的인 粗度의 使用, 傳熱面 前方에 多孔板을 設置하는 方法 등을 통한 究研가 활발하게 究研되고 있다.<sup>5,6,7,8)</sup>

本 究研에서는 前報<sup>9,10)</sup>에 이어서 傳熱面 前方에 亂流促進體로서 rod 群을 設置하여 rod 의 直徑變化에 따른 傳熱特性에 대해서 밝히고자 한다.

즉 2次元 衝突噴流系에서 平板傳熱面 前方에 間隙(C=2mm)을 두고 rod 피치(P=40mm)를 一定하게 하여 rod 群을 設置하여 rod 直徑을 D=4, 6, 8mm로 變化시키면서 노즐과 傳熱面間 距離(H/B)와 노즐出口 流速(U<sub>e</sub>)變化에 따른 傳熱特性을 규명하고 平板의 경우와 比較하여 rod 群의 最適 設置 條件을 밝히고자 한다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

Fig. 2는 2次元 衝突噴流系에 대한 實驗裝置의 概略圖로서 實驗裝置에 관해서는 前報<sup>9,10)</sup>에서 상세히 설명하였다. 여기서 노즐 出口의 平均流速範圍는 12~18m/s, Reynolds 數의 範圍로는 3.85×10<sup>4</sup>~5.77×10<sup>4</sup>이다.

Fig. 3은 平板傳熱面 前方에 rod 群을 設置한 경우를 나타낸 것이다. 여기서 B는 노즐 幅, L은 노즐의 높이를 나타낸다. H는 노즐 出口로부터 衝突板까지의 距離를 나타내며, 無次元距離로서는 H/B를 使用하였다. 平板에서의 座標는 노즐 幅 方向을 X로 하고 停滯點으로부터 노즐 幅 方向의 距離는 無次元距離(X/B)로 취했다. 또한 D는 rod 直徑, P는 rod pitch, C는 rod 와 傳熱面間 間隙을 나타낸다. 그리고 傳熱面-rod間 間隙, rod pitch는 熱傳達 效果가 最適이 되는 C=2mm, p=40mm로 하였다.<sup>9,10)</sup> rod는 연

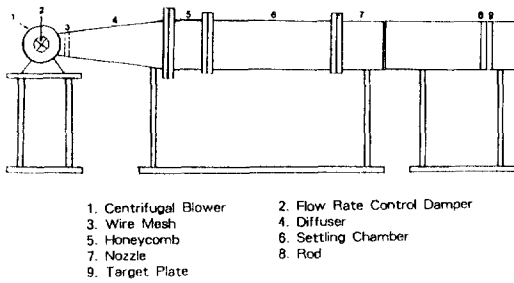


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

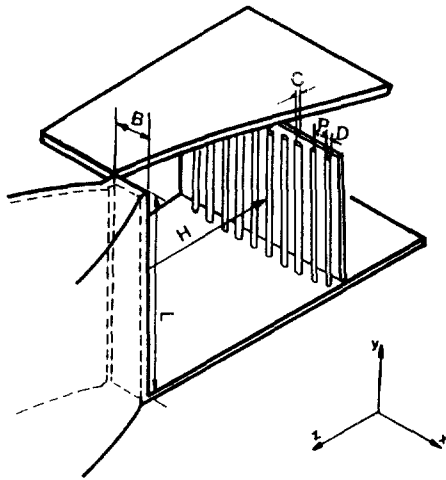


Fig. 3 Coordinate system.

강봉을 사용하였으며, 噴流의 中心은 傳熱面 中央部에 있는 rod와 rod 사이의 中心線과 항상 一致하도록 하였으며, rod는 노즐幅 方向으로 設置하였다.

本 實驗에 使用한 傳熱面 및 溫度測定에 대해서는 前報<sup>9,10)</sup>에서 상세히 언급한 바와 같 으며 傳熱面の 加熱은  $q = 1020 \text{ W/m}^2$ 의 等 熱流速 條件으로 하고 加熱方法은 通電加熱 方式으로 하였다.

### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3.1 熱傳達係數 分布

Fig. 4는 노즐出口流速이 18m/s 인 경우에 平板上에서의 熱傳達係數 分布를 각 H/B에

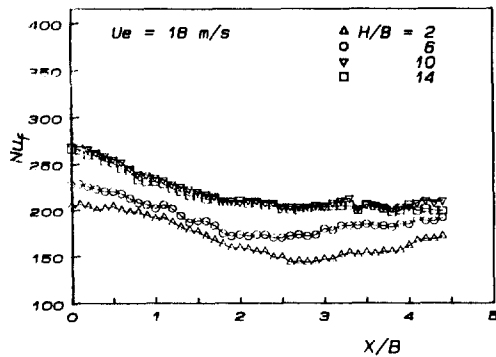


Fig. 4 Distribution of local Nusselt number along the flat plate at various impinging distances ( $U_e = 18 \text{ m/s}$ ).

대해 나타낸 것이다. 停滯點上의 熱傳達 特性을 보면  $H/B = 10$ 인 조건에서 最大가 되는데 이와같은 原因은 噴流의 亂流度가 이 附近에서 가장 크기 때문이라고 생각된다.<sup>3)</sup>

X 방향의 局部 Nusselt 數 分布는 X 方向의 距離가 增加함에 따라 Nusselt 數는 점차적으로 減少하고는 있지만 각 경우에서  $H/B = 10$ 인 조건이 높게 나타난다. 따라서 本 研究에서는 亂流 促進體로서 rod 群의 直徑을 변화시킬 때의 停滯點 近方以後의 壁面 噴流 領域에서의 熱傳達을 究明하고자 하는 것이다. 즉 傳熱面 前方에 rod pitch가 40mm인 rod 群을 傳熱面과 2mm의 間隙을 두고 設置하여 rod 直徑變化에 따른 影響에 대하여 실시한 實驗에 대해 考察하고자 한다.

Fig. 5~Fig. 7은 rod 直徑이 각각 4, 6, 8 mm인 경우에 局部 Nusselt 數의 分布를  $H/B = 10$ 의 rod 를 설치하지 않은 平板에서의 경우와 比較하여 H/B에 따른 影響을 나타낸 것이다. Fig. 5에서 P40D4 C2는 rod pitch (P)가 40mm, rod 直徑(D)이 4mm, rod-傳熱面間 間隙(C)이 2mm인 rod 設置條件을 나타낸 것이다. 熱傳達에 주는 H/B의 影響은 停滯點 近方인 첫번째 rod 까지의 領域에서는 H/B의 影響이 크게 나타나고 있는데, 특히 停滯點上의 熱傳達係數는 rod 를 設置하지 않은 平板의 경우 (Fig. 4 參照)와 마찬가지로  $H/B = 10$ 에서 最大가 되고  $H/B = 2$ 에서 最小로 나타나고 있다.

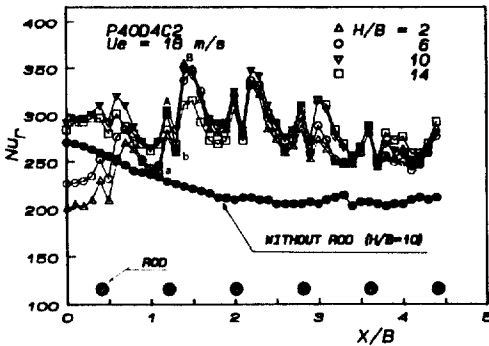


Fig. 5 Distribution of local Nusselt number along the flat plate with rods at various impinging distances ( $U_e = 18 \text{ m/s}$ ,  $P = 40 \text{ mm}$ ,  $D = 4 \text{ mm}$ ,  $C = 2 \text{ mm}$ ).

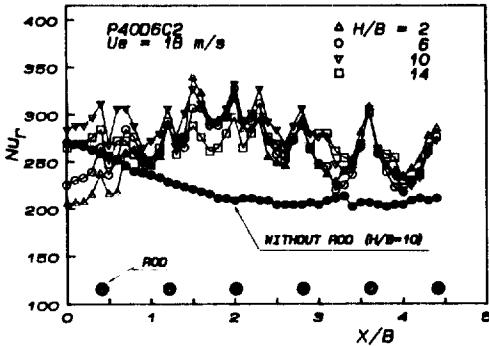


Fig. 6 Distribution of local Nusselt number along the flat plate with rods at various impinging distances ( $U_e = 18 \text{ m/s}$ ,  $P = 40 \text{ mm}$ ,  $D = 6 \text{ mm}$ ,  $C = 2 \text{ mm}$ ).

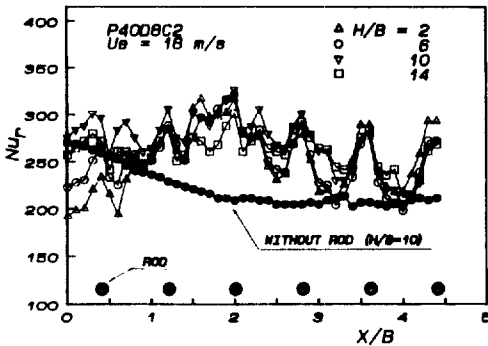


Fig. 7 Distribution of local Nusselt number along the flat plate with rods at various impinging distances ( $U_e = 18 \text{ m/s}$ ,  $P = 40 \text{ mm}$ ,  $D = 8 \text{ mm}$ ,  $C = 2 \text{ mm}$ ).

壁面噴流領域에서의 熱傳達係數分布은 인접한 두 rod 사이에서 rod 直下에서 第1의 極大點(A점), rod 와 rod 間에 第2의 極大點(B점)이 나타나고, rod 直前 및 直後에서는 Nusselt 數의 極小點(a, b점)이 나타나며 이와같은 Nusselt 數의 高低현상은 周期的으로 反復되며  $H/B$ 에 따른 變化의 傾向은 거의 같다.

여기서 Nusselt 數의 第1 極大値는 rod 直下에서 rod-傳熱面間의 間隙을 通過하는 流體의 加速에 의한 影響 때문에 나타나는 것이고, 인접한 두 rod 사이에 나타나는 Nusselt 數의 第2 極大値는 rod 를 通過한 流體에 의한 境界層의 薄膜效果에 의한 것이라고 생각되며 rod 直前과 直後에서 熱傳達係數의 極小現象은 平板으로부터 流體가 剝離하기 때문이라고 생각된다.

또한 壁面噴流領域에서 下流로 갈수록 熱傳達係數의 極小値는 점차 작아지는데 이것은 rod 설치에 의해 流動抵抗의 增加로 인해 流速이 減少하기 때문이라고 생각된다. 그리고 Fig. 6, 7의  $D = 6, 8 \text{ mm}$ 인 경우에도 同一한 傾向을 나타내고 있으나 停滯點으로부터 4번째 rod 以後부터는 Nusselt 數의 第2 極大値가 나타나지 않는다. 이것은 rod 直徑의 增加로 인해  $D = 4 \text{ mm}$ 보다 流動抵抗이 增加하여 흐름이 擴散되면서 境界層의 薄膜效果가 소멸하기 때문이라고 생각된다.

Fig. 8은  $H/B = 2$ 일 때 直徑의 變化에 따른 熱傳達係數의 分布을 나타낸 것이다.  $D = 4 \text{ mm}$ 인 경우 rod 와 rod 間의 Nusselt 數의 極大點(第2 極大値)은 流體의 加速에 의한 極大點(第1 極大値)보다 높다. 또한 直徑이 增加할수록 그 差異는 줄어들며  $D = 6.8 \text{ mm}$ 인 경우에는 4번째 rod 이후부터 이러한 極大點이 나타나지 않고 있다.

첫번째 rod 부터 네번째 rod 까지의 Nusselt 數의 第2 極大値의 存在位置는 rod 直徑이 增加할수록 rod 로부터 떨어진 位置에서 나타나는데 이는 rod 後方에 생기는 渦流領域이 커지기 때문이라고 생각된다. 停滯點으로부터 첫번째 rod ( $X/B = 0.4$ )까지는 直徑이

增加할수록 rod 近傍의 流體에 攪亂效果가 급격히 증가하여 첫번째 rod 까지 熱傳達係數가 증가하는 경향이 나타나지만, 停滯點에서는 rod 直徑 증가에 따른 流動의 停滯效果가 커져서 rod 直徑이 증가할수록 熱傳達係數는 떨어지며 平板의 경우보다도 약간 낮아진다.

그러나 Fig. 9는 노즐出口流速이 18m/s,  $H/B = 10$  인 경우 rod 直徑變化에 따른 熱傳達係數의 分布를 나타낸 것으로서 Fig. 8의  $H/B = 2$  인 경우와 類似한 Nusselt 數 分布를 나타내지만 停滯點에서는  $H/B = 2$  의 경우와는 달리 平板의 경우보다 증가하는데, 이것은  $H/B = 10$ 에서는 rod 가 없는 경우에도 불규칙한 渦流가 生成되며 여기에 rod 를 設置하면 이러한 渦流의 生成을 더욱 활발히 해주기 때문이라고 생각된다. Fig. 10은 rod 直徑이 8mm 인 경우에 流速變化에 따른 Nusselt 數의 分布形狀을 나타낸 것인데, Nusselt 數는 流速變化와는 關係없이 Nusselt 數는 類似한 分布形狀을 나타내고 있다.

Fig. 11 및 Fig. 12는  $U_e = 18\text{m/s}$ ,  $H/B$  가 각각 2와 10인 경우 直徑의 變化에 따른 局部平均 Nusselt 數의 分布를 나타낸 것이다. Rod 를 설치하지 않은 平板에서 局部平均 Nusselt 數의 減少率이 크게 나타나는 領域 ( $X/B \leq 2.5$ )에서 Rod 를 設置하므로써 局部平均 Nusselt 數는 增加하고 있으며  $X/B = 2$  附近에서 最大가 된 후 下流域으로 갈수록 Rod 에 의한 流動抵抗의 增加로 인해 全般적으로 緩慢하게 減少하고 있다.

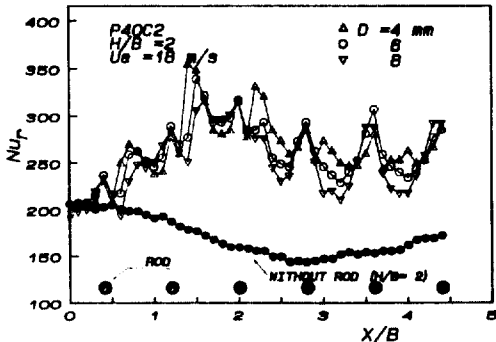


Fig. 8 The effect of rod diameters on local Nusselt number ( $U_e = 18\text{m/s}$ ,  $H/B = 2$ ).

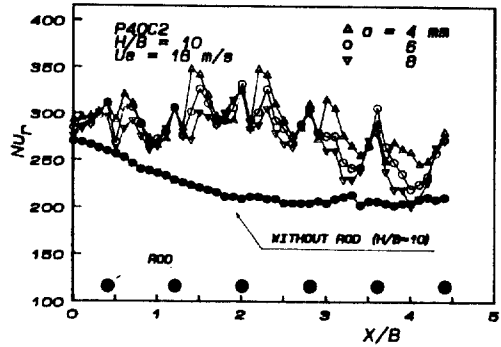


Fig. 9 The effect of rod diameters on local Nusselt number ( $U_e = 18\text{m/s}$ ,  $H/B = 10$ ).

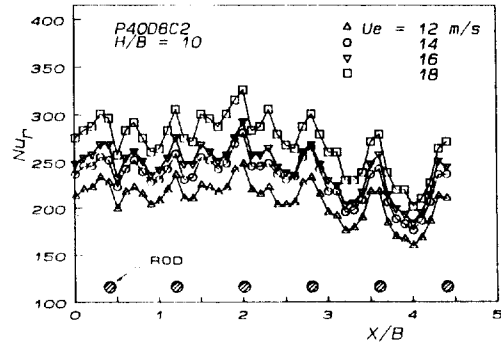


Fig. 10 The effect of nozzle exit velocities on local Nusselt number distribution ( $H/B = 10$ ,  $P = 40\text{mm}$ ,  $D = 8\text{mm}$ ,  $C = 2\text{mm}$ ).

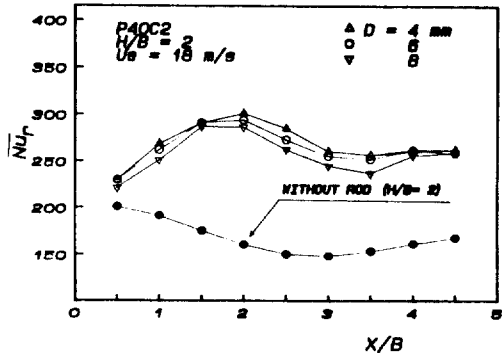


Fig. 11 The effect of rod diameters on local average Nusselt number ( $U_e = 18\text{m/s}$ ,  $H/B = 2$ ).

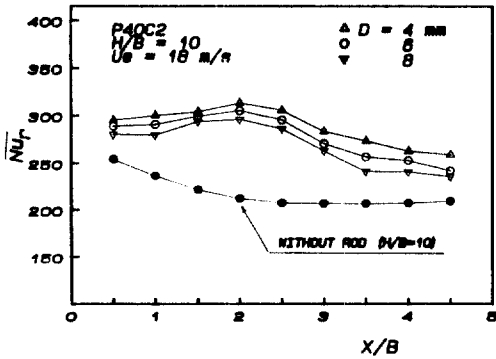


Fig. 12 The effect of rod diameters on local average Nusselt number ( $U_e = 18\text{m/s}$ ,  $H/B = 10$ ).

$X/B$ 의 全領域에서의 局部平均 Nusselt 數는 Rod 直徑이 작을수록 높으며 이와 같은 현상은 특히 Fig.12의  $H/B = 10$ 인 경우 더욱 분명하게 나타나는데, 이것은  $H/B = 10$ 인 경우에 壁面噴流領域의 유속이 작고 또한 Rod의 抵抗에 의한 유속의 減少效果가 더해지기 때문이라고 생각된다.

### 3.2 傳熱增進率

Fig. 13은  $U_e = 18\text{m/s}$ 일 때 Rod 直徑을 parameter로 하여 각  $H/B$ 에 대하여 局部 Nusselt 數의 比(傳熱增進比率)  $Nu_r/Nu_f$ 를  $X/B$ 에 따라 나타낸 것이다. rod 群 設置에 따른 停滯點( $X/B = 0$ )의 傳熱增進效果를 보면  $H/B$  및 直徑의 變化에 관계없이 거의 그效果는 나타나지 않는다( $Nu_r/Nu_f \approx 1$ ).

모든  $H/B$ 에 대하여 Rod 直下點에서는 加速에 의한 效果때문에 높은 傳熱增進率을 나타내며,  $H/B = 2$ 인 條件에서는 局部的으로 約 2배에 가까운 傳熱增進效果를 나타낸다. 즉, 傳熱面이 噴流의 Potential core 領域內에 設置된  $H/B = 2$ 인 條件에서는 rod 群을 設置하지 않은 平板에서의 局部 Nusselt 數의 값은 全般的으로 낮게 나타났지만(Fig. 4 參照) Rod 群을 設置함으로써 流體의 加速 및 亂流效果로 인하여 가장 높은 局部傳熱增進率을 나타내고 있다. 그러나  $H/B$ 가 6, 10, 14와 같이 증가할수록 噴流가 傳熱面에 衝突할 때

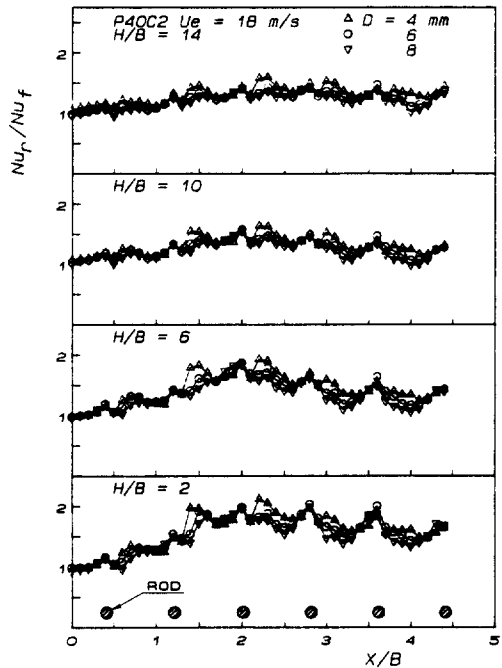


Fig. 13. Comparison with local Nusselt number on the flat plate with and without rods ( $U_e = 18\text{m/s}$ ).

이미 亂流成分이 크게 增加되어서 Rod를 設置하지 않아도 높은 傳熱效果를 얻을 수 있기 때문에 Rod 群 設置에 따른 亂流促進效果는 점차적으로 감소한다.

Fig. 14는  $U_e = 18\text{m/s}$ 일 때, 각  $H/B$ 의 條件에서 直徑變化에 따른 局部平均 Nusselt 數의 比( $\overline{Nu_r}/\overline{Nu_f}$ )를 나타낸 것이다.  $X/B$  全領域에서는 각  $H/B$ 에 대해서 直徑變化에 따른 增進比率의 差는 크지 않지만 작은 直徑에서 全般的으로 크게 나타나며, 어느 경우에서나  $X/B = 2$ 에서 最大增進率을 나타낸다. 여기서  $H/B = 2$ 의 경우가 直徑變化에 관계없이 가장 높은 傳熱增進效果를 나타내는데 이것은 Rod 設置에 따른 亂流促進效果가  $H/B = 2$ 에서 가장 크게 나타나기 때문이다.

Fig. 15는 平均 Nusselt 數의 增進率( $\overline{Nu_{or}}/\overline{Nu_{of}}$ )을 나타낸 것이다.

rod 群을 設置하면 本 實驗範圍의 모든  $H/B$ , rod 直徑變化에 관계없이 rod를 設置하

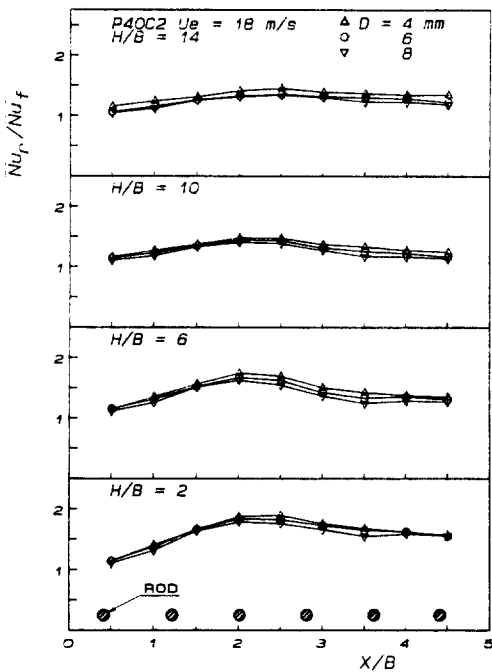


Fig.14 Comparison with local average Nusselt number on the flat plate with and without rods( $U_e=18m/s$ ).

지 않은 경우보다 傳熱增進效果를 얻을 수 있다. 直徑變化에 따른 傳熱增進效果는 모든  $H/B$ 에 대해 直徑이 가장 작은  $D=4mm$ 인 경우가 傳熱增進率이 最大가 되며,  $H/B=2$ 인 경우에 最高 1.57 倍의 傳熱增進을 얻었다. 그리고  $H/B$ 가 增加함에 따라 rod 群 設置에 따른 傳熱增進效果는 점차적으로 減少하고 있다. 즉  $H/B \geq 10$ 인 條件이 되면 rod 群 設置에 따른 傳熱增進率의 기대효과가 적어지므로 rod 設置效果에 限界가 있다.

Fig. 16은  $H/B=2$ 인 條件에서 能動的 方法(流速增加)과 手動的 方法(Rod 群 設置)에 의한 傳熱增進效果를 檢討하기 위하여 Reynolds 數 變化에 따른 平均 Nusselt 數를 나타낸 것이다. 入力增加( $Re$ 를  $3.846 \times 10^4$ 에서  $5.769 \times 10^4$ 으로 50% 增加)에 따른 傳熱增進率은 22%로 나타나는데 반해 同一出口流速( $Re=3.846 \times 10^4$ )下에서 2次元 rod 群을 設置하는 受動的 方法에서는 約 48%의 傳熱增進을 얻을 수 있음을 나타내고 있다.

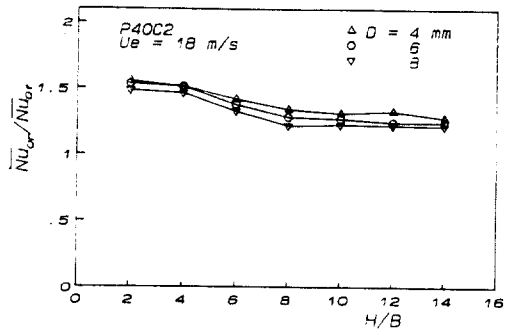


Fig.15 Comparison with average Nusselt number on the flat plate with and without rods ( $U_e=18m/s$ ).

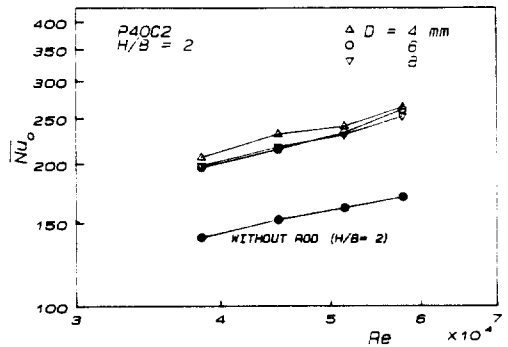


Fig.16 Average Nusselt number under the condition of constant Reynolds number ( $H/B=2$ ).

따라서 衝突噴流를 利用한 加熱冷却裝置에 간단히 rod 群을 設置하므로써 추가적인 動力의 供給없이도 높은 傳熱增進效果를 거두면서 裝置의 小型化를 이룩할 수 있다.

#### 4. 結 論

本 研究는 2次元 衝突噴流系에서 熱傳達을 增進시키기 위하여 平板傳熱面前方 2mm 떨어진 위치에 pitch가 40mm, 直徑이 각각 4, 6, 8 mm인 rod 群을 設置하고 또 노즐出口流速( $U_e$ )을 12-18m/s, 노즐-傳熱面間 無次元距離( $H/B$ )를 2~14로 하여 實驗한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 平板傳熱面에서 熱傳達係數가 급격하게

減少하는 領域에서도 rod 群을 設置 함으로서 높은 熱傳達係數를 얻을 수 있다. 그러나  $H/B \geq 10$  인 조건이 되면 增進率의 기대효과가 적어지므로 rod 設置效果에는 限界가 있다.

2) 모든  $H/B$  에 대해 熱傳達係數가 最大가 되는 最適 rod 直徑은  $D = 4$  mm 이다.

3) rod 群을 設置함으로서 傳熱面에서의 平均熱傳達係數는  $H/B = 10$ ,  $D = 4$  mm 일 때 最大가 되며, 또 最大熱傳達增進率은  $H/B = 2$ ,  $D = 4$  mm 에서 나타나는데 rod 群을 設置하지 않은 경우보다 約 57% 정도 增進한다.

4) 노즐出口流速을 增加(12m/s에서 18m/s로 50% 증가)시켰을 때 傳熱增進率은 約 22% 인데 반해 同一出口流速(12 m/s)에서 rod 群을 설치하는 경우는 48% 정도 增進한다.

### 參 考 文 獻

1. Advances in Heat Transfer, Vol. 13, Academic Press, pp. 1-60, 1977.
2. Kercher, D.M. and Tabakoff, W., "Heat Transfer by a Square Array of Round Air Jets Impinging Perpendicular to a Flat surface including the Effect of Spent Air", J. of Eng. for Power Trans. ASME, Vol. 92, pp. 73-82, 1970.
3. R. Gardon, J.C. Akfirat, "Heat Transfer Characteristics of Impinging Two-dimensional Air Jets", J. of Heat Transfer, Trans. of the ASME, Vol. 88, pp. 101-108, 1966.
4. R. Gardon, 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.
5. Peter Hrycak, "Heat Transfer from Impinging Jets to a Flat Plate with Conical and Ring Proturburances", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, No. 11, pp. 2145, 1984.
6. M.M. All khan, 笠木伸英, 平田 賢, "衝突噴流熱傳達の增進技術に關する研究(第2集)", 第17回 日本傳熱シンポジウム講演論文集, A 113, pp. 37~39, 1980.
7. 笠木伸英, 大後美道, 岡田健, "凸起部のある壁面の亂流熱傳達", 第8回 日本傳熱シンポジウム講演論文集, III-1, 15, pp. 357~360, 1971.
8. 車指永, 笠木伸英, 平田 賢, "波形面に衝突する 二次元噴流の熱傳達", 第21回 日本傳熱シンポジウム講演論文集, B 213, pp. 94~96, 1984.
9. 李龍和, 徐正閔, "衝突板 近傍에 配列된 2次元 rod가 衝突噴流 熱傳達에 미치는 影響(1): 傳熱面-rod間의 間隙效果", 空氣調和 冷凍工學 論文集, 第1卷 第1號 pp. 73-81, 1989.
10. 李龍和, 徐正閔, "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", 空氣調和 冷凍工學 論文集, 第1卷 第2號 pp. 182-189, 1989.