平板傳熱面에 衝突하는 二次元衝突噴流系의 熱傳達特性에 關한 硏究

A Study on the Heat Transfer Characteristics on Flat Plate Surface by Two-dimensional Impinging Air Jet

李 龍 和* 金 相 弼** 徐 正 閏***
Y. H. Lee S. P. Kim J. Y. Seo

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the heat transfer characteristics and the flow structure in the case of rectangular air jet impinging vertically on the flat heating surface.

The maximum value of Nusselt number at stagnation point is observed at H/B=10. It is found that this trend has been caused by the effect of stretching of large scale vortex in the stagnation region. For potential core region the Nusselt number distribution in the downstream of the stagnation point decreases gradually and begins to increase at about X/B=3.

From the flow visualization it could be seen that small eddy produced from the nozzle edge grows in large scale and that large scale eddy disturbed the thermal boundary layer on the heating plate. The local average Nusselt number becomes maximum at X/B=0.5 regardless of H/B variation.

記 號 說 明

B : 노즐의 幅
$b_{1/2}$: 速度半値幅
h : 熱傳達係數
H : 노즐－傳熱面間 距離
k : 熱傳導率
Re : Reynolds 數
Nu_f : 局部 Nusselt 數($Nu_f = h \cdot B/k$)
$\overline{Nu_f}$: 局部平均 Nusselt 數($\overline{Nu_f} = (1/2 \cdot x) \cdot \int_x^x Nu \cdot dx$)
U_e : 노즐出口流速
U_s : 噴流中心軸上에서의 速度
X : 정체점으로부터의 거리, 노즐 幅方向으로의 座標
Y : 노즐길이方向으로의 座標
Z : 노즐에서 傳熱面 方向으로의 座標

1. 序 論

噴流는 流體力學上 가장 기본적인 流動形態의 하나로서 과거부터 많은 硏究가 있어왔다.

* 柳韓工業專門大學 建築設備科
** 東洋工業專門大學 工場自動化科
*** 仁荷大學校 機械工學科

특히 噴流를 物體에 衝突시키는 衝突噴流는 熱 및 物質傳達效果가 상당히 크기 때문에 物體의 冷却, 加熱 혹은 乾燥手段으로서 工業的 應用範圍가 점차적으로 擴大되고 있다.[1,3]

壁面에 衝突하는 噴流系는 自由噴流領域, 衝突領域, 壁面噴流領域으로 分類된다.[4,5]

平板에 垂直으로 衝突하는 衝突噴流의 熱傳達에관한 始初의 硏究는 Gardon 등[6,7]의 硏究를 들수 있다. 그의 一連의 硏究에 따르면 노즐-傳熱面間 距離가 노즐幅의 8～10 培되는 位置에서 最大熱傳達係數를 얻을수 있으며, 또한 Reynolds 數 10^3 以上에서 노즐-傳熱面間의 無次元 距離(H/B)가 H/B＜6일 때 壁面噴流領域에서는 停滯點으로부터 노즐出口幅의 7倍되는 位置에서 第2의 極大 熱傳達係數가 나타나며, 이것은 각각 自由噴流의 亂流成分과 境界層의 遷移에 따른 結果라고 推定·發表하였다.

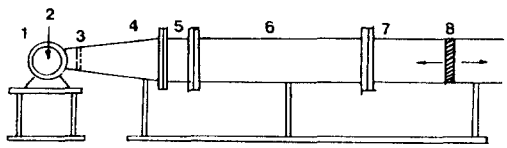
이후 停滯點의 熱傳達 特性을 究明하기위한 많은 硏究가 있어왔지만 衝突噴流의 複雜性때문에 아직까지도 정확하게 유체의 유동특성을 測定하여 열전달현상을 규명하기가 매우 어려운 狀態이다.

따라서 本 硏究에서는 2次元 衝突噴流系에서 平板衝突面上의 停滯點과 壁面噴流領域의 傳熱特性을 考察하고 可視化 實驗을 통해 流動現象을 究明하고자 한다.

2. 實驗裝置 및 方法

2.1 實驗裝置의 槪要

衝突噴流의 槪略圖 및 座標系는 Fig. 1, 2에 나타내었다. 空氣는 送風機 ①에 의해 보내지며, 流量은 댐퍼 ②로 조절한다. 均一한 流動을 얻기위하여 流路에 철망 ③과 하니콤 ⑤를 설치하였으며, 4각 노즐(出口幅 50mm, 교축비 15:1인 sine 곡선)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 座標는 노즐幅 方向



1. Centrifugal Blower
2. Flow Rate Control Damper
3. Wire Mesh
4. Diffuser
5. Honeycomb
6. Settling Chamber
7. Nozzle
8. Target Plate

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

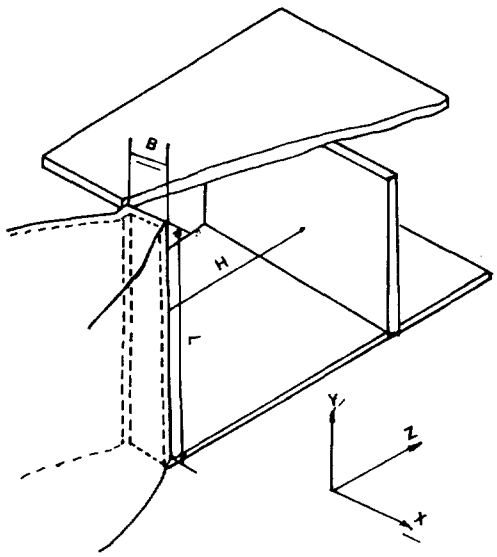


Fig.2 Coordinate system

을 X, 노즐높이 方向을 Y, 그리고 노즐出口로의 方向을 Z로 취했다.

Fig. 3은 傳熱面의 형상을 나타낸 것이다. 傳熱面은 두께 20mm의 Bakelite 板(500×500mm)에 두께 0.03mm인 스테인레스鋼箔板(10×500mm) 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 1,020 W/m² 으로 一定하게 유지(열유속의 不確定性(uncertainty)은 0.55% 미만)하는 直接通電加熱法을 사용하였다. 傳熱面의 溫度測定은 0.07mm인 C-C 熱傳對를 停滯點으로부터 5mm 간격으로 스테인레스鋼箔板의 裏面에 납땜부착하고 DATA-

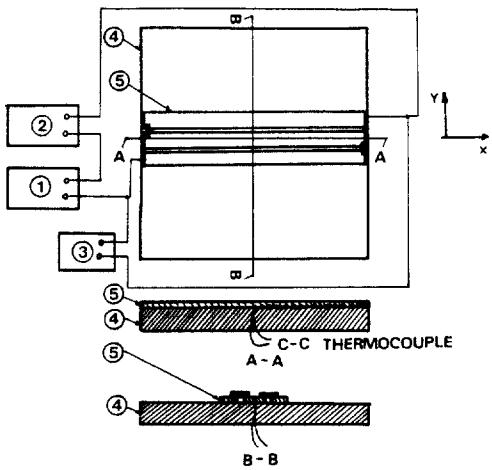


Fig.3 Detail of heating apparatus

LOGGER에 연결하여 각 점마다 10回 反復測定하여 각각 온도의 平均値를 취하였으며 測定된 온도의 불확정성은 1% 미만이었다.

그리고 衝突板近傍의 流動特性을 可視化하기위하여 비교적 간단히 행할 수 있는 smoke-wire 法을 채용하였다.[8,10] Smoke-wire 法에 사용한 細線은 流動場에 거의 영향을 주지 않으면서 可視化를 수행할 수 있도록 0.1mm의 니크롬線을 사용하였다. 연기발생은 流動 parafin에 機械油를 소량 섞은 昇華劑를 니크롬線에 도포한 후 AC 30-40 V를 通電시켜 연기를 발생시켰다. 그리고 연기를 tracer 로 하여 생기는 흐름의 連續撮影이 가능하도록 카메라에 moter-driver 를 裝着하여 撮影하였다. 그리고 可視化 實驗時에는 니크롬線의 直徑을 代表길이로 한 Reynolds 數가 16이 되게하였다.[8,9] 물론 이 Reynolds 數에서는 流體의 流動이 實際의 경우와는 다를 것이지만 흐름의 정성적 論議에는 지장이 없다고 생각된다.

2.2 自由噴流의 特性

噴流의 基本特性을 알아보기 위하여 Fig.1의 實驗裝置에서 衝突板을 제거한 후 熱線風速計를 사용하여 自由噴流의 流速과 亂流强度를 測定하였으며, 이때 분류의 초기난류강도는 0.9% 였다. Fig. 4는 각 X-Z 流動斷面에서의 自由噴流의 平均速度分布를 나타낸 것이다.

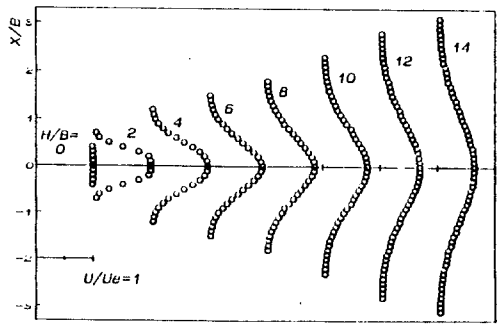


Fig.4 Z-directional variation of dimensionless velocity of a plane jet at different X/B. (Re= 5.769×10^4)

出口 Reynolds 數가 5.769×10^4인 경우에 노즐出口部分(H/B=0)에서 형성되는 초기의 平坦한 速度分布는 流體의 境界層의 發達과 더불어 서서히 減少하는 分布로 變化함을 알 수 있으며, 噴流의 速度分布는 中心軸에 대하여 左右對稱임을 알 수 있다.

流動方向에 따른 噴流의 擴散을 알아보기위하여 噴流中心速度의 1/2이 되는 位置까지의 距離, 즉 速度半値幅($b_{1/2}$)을 圖示하면 Fig. 5와 같다. 速度半値幅은 potential core 領域과 그 以後의 遷移領域으로 나누어 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$2 \le H/B \le 5 \quad b_{1/2}/B = 0.048(H/B) + 0.38 \cdots\cdots (2-1)$$

$$6 \le H/B \le 14 \quad b_{1/2}/B = 0.096(H/B) + 0.025 \cdots\cdots (2-2)$$

Fig. 6은 噴流의 中心軸上(Y 方向)에서의 平均速度分布를 나타낸 것이다. 노즐에서 噴出된 噴流는 Y 方向으로 均一한 速度分布임을알 수 있으며, 따라서 X-Z 平面上의 2次元噴流임을 확인할 수 있다.

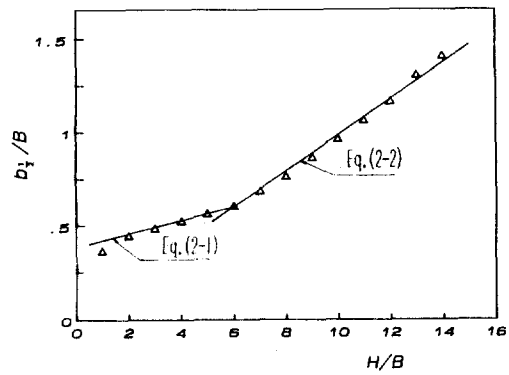


Fig.5 Variation of half-width along the centerline of free jet

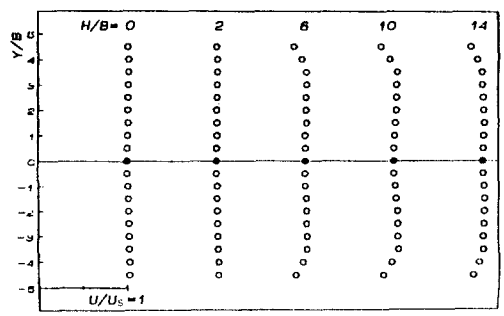


Fig.6 Y-directional variation of dimensionless velocity of a plane jet at different X/B. ($Re=5.769\times10^4$)

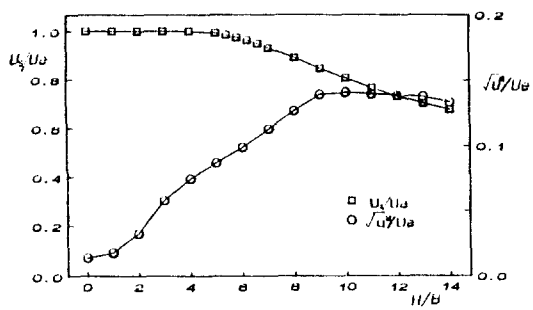


Fig.7 Variation of Velocity and turbulence the centerline of free jet. ($Re=5.769\times10^4$)

Fig. 7은 噴流의 中心軸上에서의 速度와노즐出口速度와의 比(U_s/U_e) 와 노즐出口流速을 써서 無次元化한 亂流强度($\sqrt{u^2}/U_e$) 를 각 H/B에 대해 나타낸 것이다.

噴流中心의 速度는 $H/B=5$ 近傍까지는 出口流速이 유지되지만, 이 位置 以後의 下流로 갈수록 점차 減少한다. 따라서 potential core 의 位置는 약 $H/B=5$ 까지 形成되는 것으로 推定된다. 또한 亂流强度는 노즐出口로부터 점차 增加하기 시작하여 주위의 流體가 噴流中心까지 浸透한다고 생각되는 $H/B=10$에서 最大가 된후 점차 減少한다.

따라서 衝突板(傳熱面) 은 $H/B=2$ 부터 發達領域이 시작된다고 생각되는 $H/B=14$ 까지 移動할 수 있도록 設置하여 實驗을 실시하였다.

3. 結果 및 考察

3.1 停滯點의 熱傳達 特性

Fig. 8은 停滯點에서의 熱傳達 特性을 各 H/B에 대해 나타낸 것이다. 停滯點에서의 熱傳達係數는 H/B의 값에따라 큰 變化를 나타내는데 먼저 自由噴流의 potential core 領域內에 衝突板이 設置되는 경우 즉, $H/B\leq5$ 인 範圍內에서의 Nusselt 數는 거의 變化가 없지만 $H/B=6$ 부터 급격히 增加하기 시작하여 $H/B=10$에서 最大値가 된다. 그후 H/B의 增加와 함께 서서히 減少하는 경향을 나타낸다. 이와 같이 $H/B=10$에서 最大 Nusselt 數를 갖는 것은 Fig.7에 나타난 바와 같이 自由噴流의 亂流强度가 $H/B=10$에서 最大로 나타나며, 또한 衝突板을 設置한 경우에도 역시 이부근에서 亂流成分이 가장 크게 나타난다. 이러한 特徵은 流動의 可視化에 의한 Photo.1에 의해서도 확인 할 수 있다. 平板上의 停滯點 近傍에서는 衝突噴流의 흐름과 反對方向의 渦流가 不規則的으로 發生하고 있는데 $H/B=10$의 경우가 $H/B=6$의 경우에 비하여 渦流의 規模가 크고 흐름의 攪亂이 심하다는 것을 알 수 있으며, 이것은 Reynolds 수가 10^3 크기인 범위에서 실험한 Hirata [11] 의 가시화 연구결과

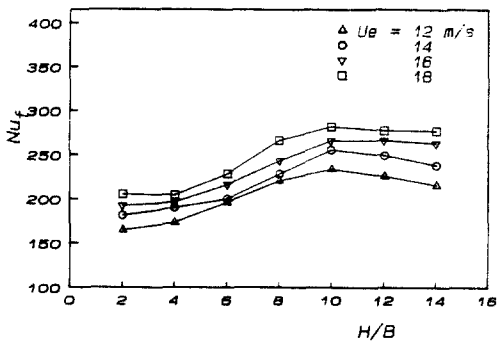


Fig.8 Stagnation Nusselt number of placed at various axial distance from nozzle exit.

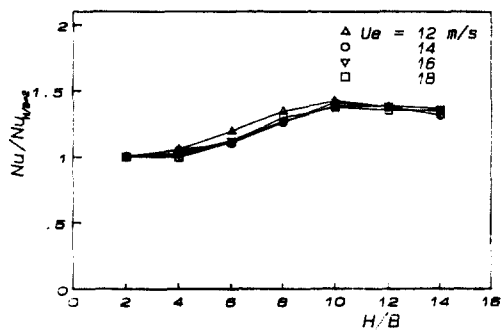


Fig.9 Heat transfer augmentation ratio on stagnation point.

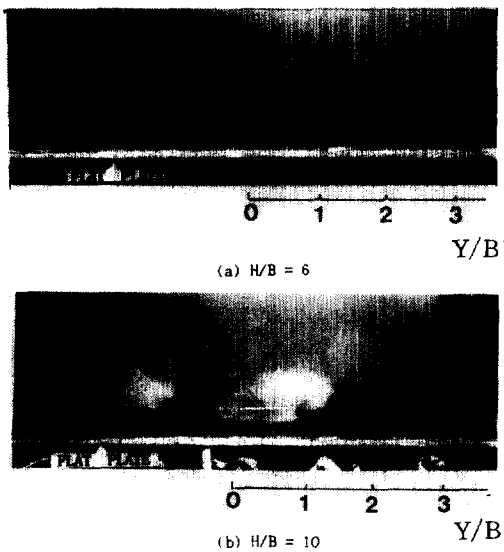


Photo.1 Flow-Visualization in Stagnation-region of Flat Plate.

와도 잘 일치하고 있다. 이와 같은 현상으로부터 H/B가 增加함에따라 停滯點上의 熱傳達係數는 增加하여 $H/B=10$ 근방에서 最大가 되는 원인을 확인할 수 있다.

그리고 노즐出口의 平均流速이 增加함에 따라 停滯點上의 Nusselt 數도 增加하며 노즐出口流速을 50%(12m/s-18m/s) 增加시키면 Nusselt 數는 약 25%정도 增加함을알 수 있다.

Fig.9는 傳熱面이 potential core 領域內에 設置되었을 때의 停滯點의 Nusselt 數에대한 遷移域에서의 熱傳達 增進率을 나타낸 것이다. 停滯點의 Nusselt 數는 $H/B=4$ 까지는 큰 變化가 없지만 $H/B=6$에서부터 급격히 增加하기 시작하여 $H/B=10$에서 最大가 되며, 특히 $U_e=18$m/s인 경우, 약 31%의 增進이 나타난 후 다시 점차 減少하기 시작한다.

3.2 壁面噴流領域의 熱傳達特性

Fig.10은 $Re=5.769\times10^4$에서 停滯點으로부터 X方向의 局部 Nusselt 數의 分布를 각 H/B에 대해 나타낸 것이다. 局部 Nusselt 數 분포도 停滯點의 Nusselt 數와 마찬가지로 $H/B=10$에서 전체적으로 가장 높은 局部 Nusselt 數를 나타내며, 停滯點으로부터 距離가 멀어짐에따라 局部 Nusselt 數는 減少한다. 그런데 衝突板이 potential core 領域內에 設置된 $H/B=2$의 경우에는 $X/B=3$인 位置에서부터 熱傳達係數는 다시 增加하기 시작하는데, 이것은 아직 完全히 발달하지않은 噴流가 衝突板上에서 X方向으로 퍼질때 噴流가 層流에서 亂流로 遷移하기 때문이라고 推定된다.[7,12] 즉, 亂流噴流가 完全히 발달하지않았지만 大氣中의 空氣가 主流內로 계속 浸透함으로써 主流內의 亂流强度를 增加시키기 때문이다. 本 硏究의 可視化實驗에서도 보면(Photo.2) 노즐出口의 兩端에서부터 生成된 小規模의 渦流(small eddy)가 점차 生長하여 壁面噴流에서 大規模의 渦流(large eddy)가 되어 傳熱面에까지 浸透하여 境界層에 영향을 미치는 것으로 생각되며, 이

것은 위의 설명과 일치한다고 볼 수 있다. 이와 같은 熱傳達係數의 再上昇은 Gardon 등[7]에 따르면 $X/B=4$에서 시작하여 $X/B=7$에서 最大가 된 후 다시 減少한다고 발표하고 있지만, 本 硏究의 實驗範圍는 $X/B<4.5$ 였기 때문에 熱傳達係數의 極大値는 확인할 수 없었다. 그리고 $H/B=6$에서도 이러한 遷移에의한 熱傳達係數의 上昇은 나타나며, $H/B=10$에서는 나타나지 않고 있다. 이것은 H/B가 증가함에따라 噴流中心軸上의 亂流强度가 크게 增加된 상태로 壁面에 衝突하기 때문에 (Fig.7 參照) 衝突領域에서 높은 熱傳達係數를 갖게 하며 層流에서 亂流로의 遷移에 따른 熱傳達係數의 上昇[1,7]은 더이상 바랄 수 없게 되는데 이것은 亂流效果가 衝突領域에서부터 이미 작용하기 때문이다.

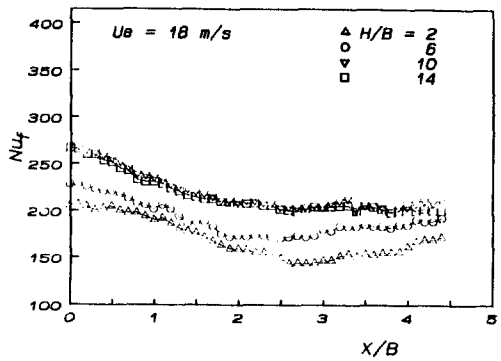


Fig.10 Distribution of local Nusselt number along the flat plate at various impinging distance. (Ue=18 m/s)

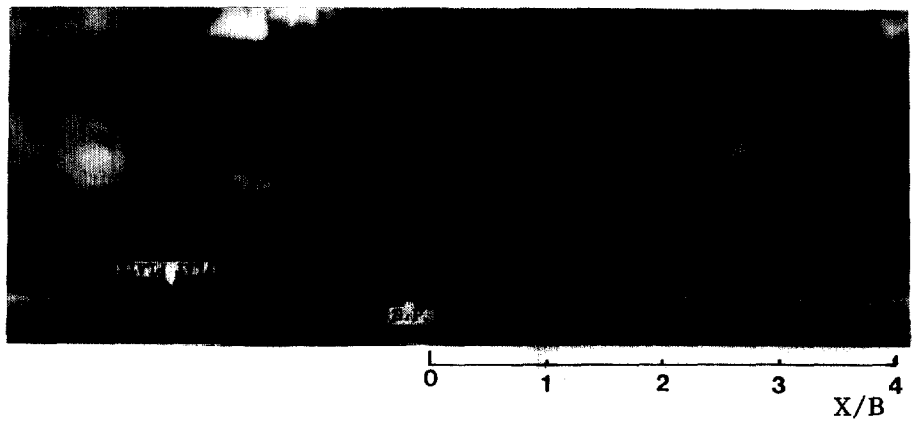


Photo.2 Flow-visualization for flat plate (Red= 16, H/B=2)

Fig.11, Fig.12는 노즐出口 流速을 變化시켰을 때 $H/B=2$와 10에 대한 局部 Nusselt 數 分布를 나타낸 것이다. 그런데 流速을 變化시켜도 Nu 의 분포형상은 거의 동일한 형상으로 나타나며 Fig.11 의 $H/B=2$ 의 경우에는 $U_e=12$m/s 에서도 層流에서 亂流로의 遷移가 일어난다. 그렇지만 Reynolds 數가 아주 작으면 이러한 遷移는 일어나지않을 것이라고 생각된다.[6,12]

Fig.13 은 局部平均 Nusselt 數의 分布를 $U_e=18$m/s 의 경우에 대해 나타낸 것이다. 局部平均 Nusselt 數의 分布는 $H/B=10$의 경우가 X/B 全領域에서 最大가 된다. $H/B=2$의 경우에는 $X/B=2.5$ 근방에서 局部平均 Nusselt 數가 最少가 되며, 이후 下流域에서 다시 增加하는 경향이 거의 나타나지 않고 있다. 그리고 局部平均 熱傳達係數는 H/B의 變化에 관계없이 停滯點의 근방에서, 즉 $X/B=0.5$에서 最大가 된다.

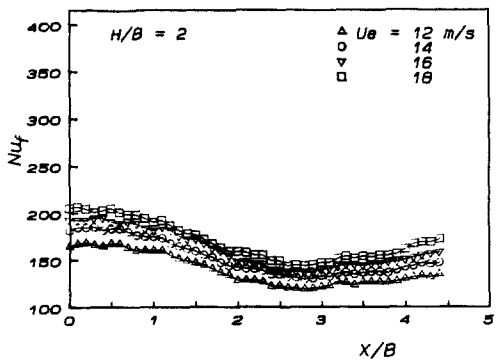


Fig.11 Distribution of local Nusselt number along the flat plate at various impinging distance. (H/B=2)

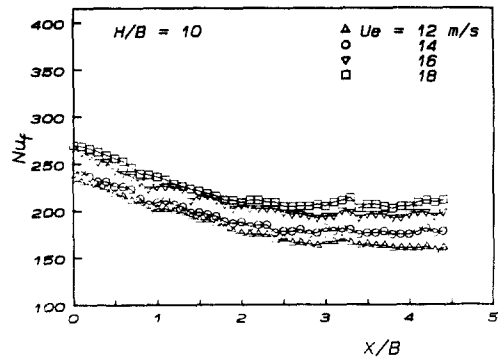


Fig.12 Distribution of local Nusselt number along the flat plate at various impinging distance. (H/B = 10)

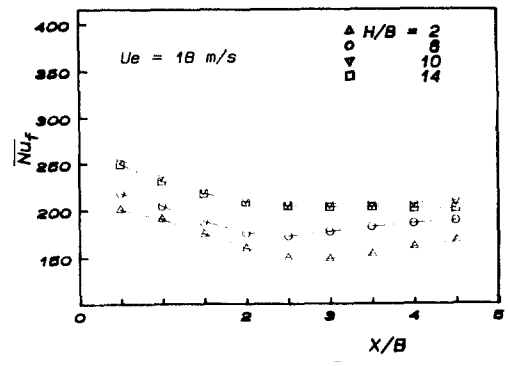


Fig.13 Distribution of local average Nusselt number along the flat plate at various impinging distance. (Ue = 18 m/s)

이상과 같이 平板에 衝突하는 衝突噴流는 噴流自體의 特性에 의해 노즐가까이에서 (potential core 內) 衝突시켰을 때 보다 自由噴流의 遷移領域內에 傳熱面을 設置함으로써 높은 傳熱增進 效果를 볼 수 있다. 즉, 噴流의 特性을 이용하여 傳熱面을 遷移領域內에 設置하면 傳熱增進效果는 向上된다.

4. 結 論

本 硏究는 平板에 衝突하는 2次元噴流系에서 노즐出口 - 傳熱面間 距離 (H/B=2-14) 노즐出口流速 (U_e=12m/s -18m/s) 을 매개변수(Parameter) 로 하여 流動의 可視化 및 熱傳達 實驗을 한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 流體流動의 可視化에 의하면 停滯點近傍에서의 渦流의 規模는 H/B=6 의 경우보다 H/B=10 의 경우가 더 크며, 熱傳達係數도自由噴流의 遷移領域인 H/B=10 의 조건에서 最大가 된다.

2) 傳熱面이 自由噴流의 potential core 領域 (H/B=2) 內에 設置되는 경우 X/B = 3 근방에서 大規模의 渦流가 형성되며, 熱傳達係數도 이 근방에서부터 다시 增加하기 시작한다.

3) 熱傳達係數의 分布는 流速變化에 관계없이 동일한 분포형상을 갖는다.

4) 局部平均熱傳達係數는 H/B의 변화에 관계없이 停滯點近傍 (X/B=0.5) 에서 最大가 된다.

參 考 文 獻

1. Advances in Heat Transfer, Vol. 13, Academic Press, pp. 1-60, 1977.
2. R.J. Goldstein and A.I. Behbahani, "Impingement of a Circular Jet With and Without Cross Flow", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 25, No. 9, pp. 1377-1382, 1982.
3. E.M. Sparrow, C.A.C. Altemani and A. Chaboki, "Jet-Impingement Heat Transfer

for a Circular Jet Impinging in Crossflow on a Cylinder", J. of Heat Transfer, Trans. of the ASME, Vol. 106 pp. 570-577, 1984.

4. W.D. Baines, "Shear Stress and Heat Transfer at a Stagnation Point", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 19, pp. 21-26, 1976.
5. D.A. Dawson and O. Trass, "Mass Transfer in a Turbulent Radial Wall Jet", The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 44, pp. 121-129, 1966.
6. 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.
7. R. Gardon and 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.
8. W.J. Yang, "Flow Visualization III", Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1985.
9. M. Gad-el-Hak, "Visualization Techniques for Unsteady Flows: An Overview", J. of Fluids Engineering, Trans. of the ASME, Vol. 110, pp. 231-243, 1988.
10. 淺沼強, "流れの可視化ヘンドブック", 朝倉書店, 1977.
11. S. Yokobori, N. Kasaki and M. Hirata, "Characteristics Behavior of Turbulence in the Stagnation Region of a Two-Dimensional Submerged Jet Impinging Noramally on a Flat Plate", The 1st International Symposium on Turbulent Shear Flows, Univ. PARK PENNSYLVANIA, pp. 3.17-3.24, 1977.
12. 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, FC 1.4, pp. 15-19, 1974.