

傾斜面에 衝突 하는 水噴流의 熱傳達 特性에 關한 研究

최국광* · 나기대** · 김은영*** · 전성택*** · 이종수****

*인천대학교 교수

**조선대학교 교수

***인천전문대 교수

****안동공업전문대 전임강사

Heat Transfer Characteristics of Water Jet Impinging on Oblique Surface

Choi, Guk-Gwang* · Na, Gi-Dae** · Kim, Yeun-Young*** · Jeon, Sung-Taek***

Lee, Jong-Su****

*Incheon Univ. Professor

**Choseun Univ. Professor

***Incheon Junior College Professor

****Andong Tech. College Full Time Ingtrecter

요 약

下向의 軸對稱自由噴流가 等熱流束 條件의 傾斜傳熱面에 衝突하는 軸對稱 衝突水 噴流系를 構成하였다. 實驗變數로는 노즐-전열면간 距離, 레이놀즈수, 無次元傾斜角으로 하였으며, 노즐-전열면간 거리의 범위는 15~105, 레이놀즈수의 範圍는 $1 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4$, 무차원 경사각의 범위는 0.5, 0.67, 0.83, 1.00으로 하였다.

이와같은 實驗的 研究에서 국소누셀트수는 $Re^{0.7}$ 에 比例하여 增加되었으며 또한 停滯點으로부터 局所距離가 8배되는 下向勾配傳熱面의 局所位置에 第2의 極大 熱傳達 現像이 나타났다. 국소누셀트수는 분류속도가 低速의 경우 傳熱面의 경사각의 영향이 작게 나타나고 있으나, 高速領域이 됨에 따라 경사각의 영향이 增加되었으며, 특히 국소위치의 $X/D \leq -4$ 는 壁面噴流領域에서 경사각에 대한 영향이 明確하게 나타나고 있다.

停滯點熱傳達은 噴流速度와 노즐-전열면간 거리에 比例해서 增加되며 層流理論解에 比하여 最少 2.4배 이상 높은 熱傳達效果를 나타내었으며, 停滯點누셀트수는 레이놀즈수, 프란틀수, 노즐-전열면간 거리 그리고 無次元 傾斜角을 包含하는 無次元 實驗式으로 나타내었다.

ABSTRACT

The purpose of this research is to investigate the characteristics of heat transfer in the

downward axisymmetric free water jet system impinged on a flat oblique plate which has the uniform heat flux. Experimental conditions considered were Reynolds number, distance between nozzle and flat plate, inclination angle of heater surface and nozzle exit velocity.

Local Nusselt number was subjected to the influence of Re number, Pr number, oblique angle of heating surface and local position of flat plate. In the wall region of downward surface, The secondary peak point of heat transfer appeared at the local point of $X/D = -8$ from the stagnation point. The stagnation heat transfer rate of this experimental study augments 2.4 times than that of laminar theoretical solution. The stagnation nusselt number is function of Reynolds number, nozzle-plate spacing, Prandtl number and oblique angle of impinging plate.

Nomenclature

- D, D_n : 노즐입구, 출구직경 [m]
- H : 노즐-전열면간 거리 [m]
- H_i : i등분재 노즐직경 [m]
- L_i : 노즐입구에서 i번째까지의 길이 [m]
- L_n : 노즐입구에서 출구까지 길이 [m]
- T_c, T_w : 냉각수와 傳熱面 表面의 溫度[°C]
- ρ : 냉각수의 密度[kg/m³]
- γ : 比重量 [kg/m³-s²]
- Deg : 전열면의 경사각 [°]
- h, h_0 : 局所 및 停滯點熱傳達係數[W/m²°C]
- K_s, K_c : 冷却液과 試片의 熱傳導度[W/m°C]
- q : 熱流束 [W/m²]
- X : 반경방향 위치 [m]
- V_0 : 노즐출구 速度 [m/s]
- ν : 動粘性係數 [m²/s]

Dimensionless Parameters

- $B_i = h \cdot s / K_s$ Biot Number
- $Nu = h \cdot D / K_c$ Nusselt number
- $Pr = \mu \cdot C_p / K$ Prandtl number
- $Dn = Deg / 90^\circ$: Nondimensional oblique angle
- $Nu_0 = h_0 \cdot D / K_c$: Stagnation Nusselt number
- $Re = V_0 \cdot D / \nu$: Reynolds number

I. 緒 論

衝突噴流 냉각계는 熱傳達 特性이 다양하며 工業的 應用例로서는 製鐵, 製紙, 織物, 유리산업 高溫金屬, 개스터어빈깃, 急速深冷却 外科療法, VLSI 高密度 電了部品 冷却등의 응용이 있다.

工業的 應用이 廣範圍한 自由衝突水噴流(Free impinging water jet)의 流動場의 構造는 Fig.1과 같으며, 1)自由噴流領域, 2)停滯點領域 3)平板領域 4)遷移領域, 5)相似領域, 6)水力跳躍領域등으로 구분된다. 이와같은 衝突噴流에 關한 研究는 永井¹⁾등은 노즐-전열면간 거리를 노즐내경(D)와

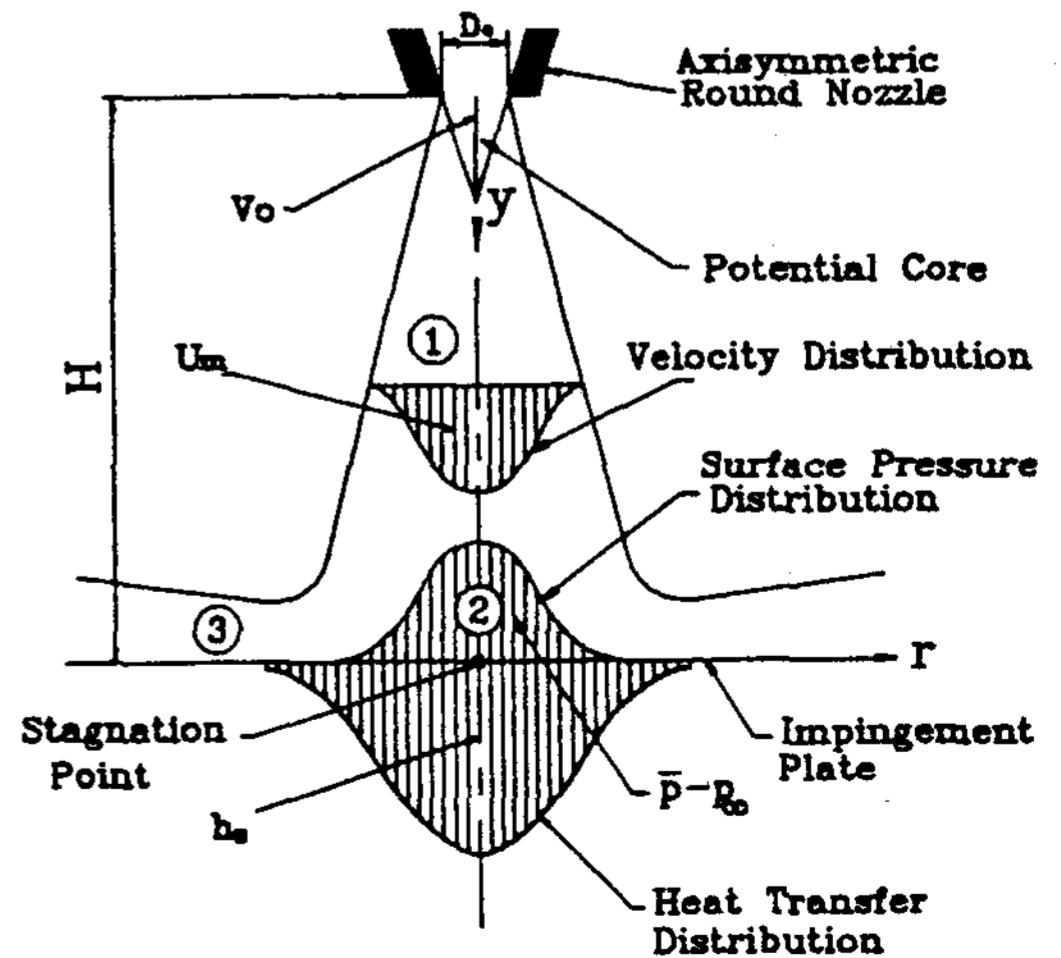


Fig. 1 Configuration of axisymmetric round free impinging jet.

같이 했을때 平面上의 임의점에서의 平均流速 두께 및 遷移點에 대한 實驗式을 提示하였으며, R. Gardon 등²⁾의 일련의 研究에서는 停滯點 熱傳達에 대해서 노즐크기와, 레이놀즈수, 노즐-전열면간 거리(H/D)의 函數로 나타내고 있으며, 層流噴流의 낮은 레이놀즈수 ($Re < 2000$) 범위의 포텐셜코어(Potential Core) 領域內($0.5 < H/D < 5$)에서의 衝突噴流의 停滯點 熱傳達은 노즐-전열면간 거리(H/D)와는 無關係하며 레이놀즈수에만 의존하고, 포텐셜코어 領域($H/D > 5$)에서의 정체점누셀트수(Nu_c)는 $(H/D)^{0.5}$ 에 비례하는 것으로 나타나고 있다. 또한 亂流噴流($Re > 2000$)에서는 $H/D = 8 \sim 10$ 에서 熱傳達效果가 最大로 나타나고 있는데, 이는 上流에서의 亂流強度 增加에 기인한다고 하였다.

C.D. Donaldson 등³⁾은 傾斜衝突空氣噴流의 實驗的 研究에서 노즐-전열면간 거리(Z/d) = 1.96에서 平板上의 最大壓力 위치는 傾斜角의 영향이 크다고 보고했으며, R.J. Goldstein 등⁴⁾은 液晶(Liquid crystal)測定技法을 사용한 軸對稱 空氣噴流의 固定平板에 대한 噴流의 傾斜角의 영향을 考察한 바에 따르면 熱傳達이 最大로 되는 無次元傳熱面上의 位置(X/D)는 노즐경사각(α)이 90° (垂直噴流)에서 감소함에 따라 平板傳熱面의 圖心($X/D = 0$)으로부터 최대 $X/D = 1.9$ 까지는 단순히 증가한다고 하였으며, E. M. Sparrow 등⁵⁾은 固定된 노즐에 대하여 傳熱面의 傾斜角을 90° (垂直噴流)에서 30° 까지 변화하였을때, R. J. Goldstein 등⁴⁾의 結果와 마찬가지로 最大 熱傳達點의 遷移가 발생하였으며, 傳熱面에서의 熱傳達係數 分布는 下流域보다 上流에서 훨씬 급경사를 이루고 있다. 이와 類似한 研究로서 J. Stevens 등⁶⁾은 自由衝突水噴流에서 水平傳熱面에 衝突하는 경사노즐각의 영향을 考察한 바 空氣噴流에서와 마찬가지로 最大熱傳達이 나타나는 위치가 상류쪽으로 平行移動하면 그 위치가 移動量은 空氣噴流보다는 작은것으로 나타났다.

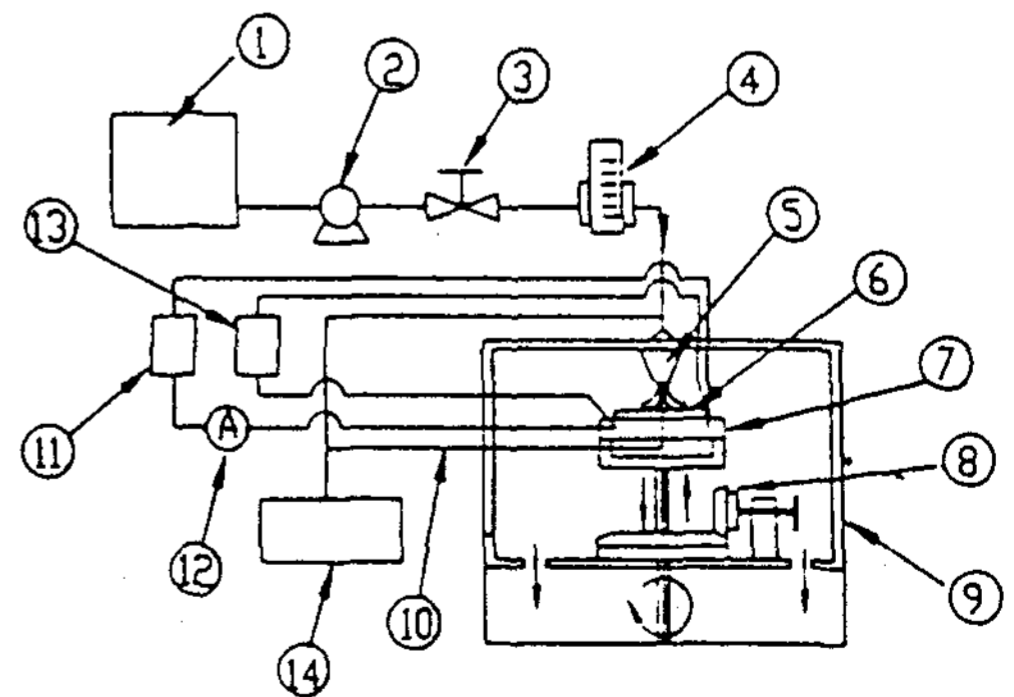
이와같은 衝突噴流系의 實驗은 噴流液은 주로 空氣, 傳熱面과 노즐의 배치는 수직인 경우이며, 또는 고정평판에 노즐이 경사각을 이루는 경우가 대부분이다. 이러한 관점에서 本 研究는

下向自由水噴流가 경사진 전열면에 대한 自由 衝突水噴流에 관한 實驗적 研究는 매우 중요하다고 생각된다. 이와같은 중요성의 요구에 의하여 本 實驗은 傳熱面의 溫度가 冷却水의 飽和 溫度 이하인 等熱流束 條件에서 鉛置下向의 분류가 傾斜傳熱面에 충돌할때 충돌수분류의 熱傳達 特性을 究明하기 위하여 노즐-전열면간 거리(H), 수직분류에 대한 전열면의 경사각(Deg), 분류속도(V_0)에 대하여 국소누셀트수의 分布를 각각 구하고, 本 研究의 實驗式을 도출하였다.

II. 實驗裝置 및 實驗方法

1. 實驗裝置

傾斜衝突水噴流에 관한 實驗裝置의 구성은 Fig.2와 같다. 냉각액은 물을 사용하였으며, 傳熱面은 $10^5 W/m^2$ 等熱流束의 加熱條件으로 한 單相 強制對流系이다. 水槽 ①의 冷却水는 가압펌프 (0.5HP, 5400l/h) ②에 의해 가압되어 유량조절 밸브 ③에 의하여 유량계(Flowcell) ④에서 분류유량이 검출된다. 이 유량은 축대칭 원형노즐의 ⑤에서 일정한 速度로 분출된다. 원형노즐의 ⑤의 형상은 노즐 軸구직경(D)가 4mm, 노즐입구에서



- | | | |
|--------------------|-----------------|------------------------|
| 1. Water tank | 2. Pump | 3. Valve |
| 4. Flowmeter | 5. Nozzle | 6. Heated surface |
| 7. Impinging plate | 8. Bebel gear | 9. Recovery water tank |
| 10. Thermocouple | 11. Slidac | 12. Ammeter |
| 13. Voltmeter | 14. Data logger | |

Fig. 2 Drawings of experimental apparatus.

출구까지 길이(L_N)을 50mm로 하였을때 다음과 같은 정현곡선식을 사용하여 노즐을 제작하였다.

$$H_i = \frac{D_i + D}{2} + \frac{D_i - D}{2} \sin\left(0.5\pi - \pi \frac{L_i}{L_N}\right)$$

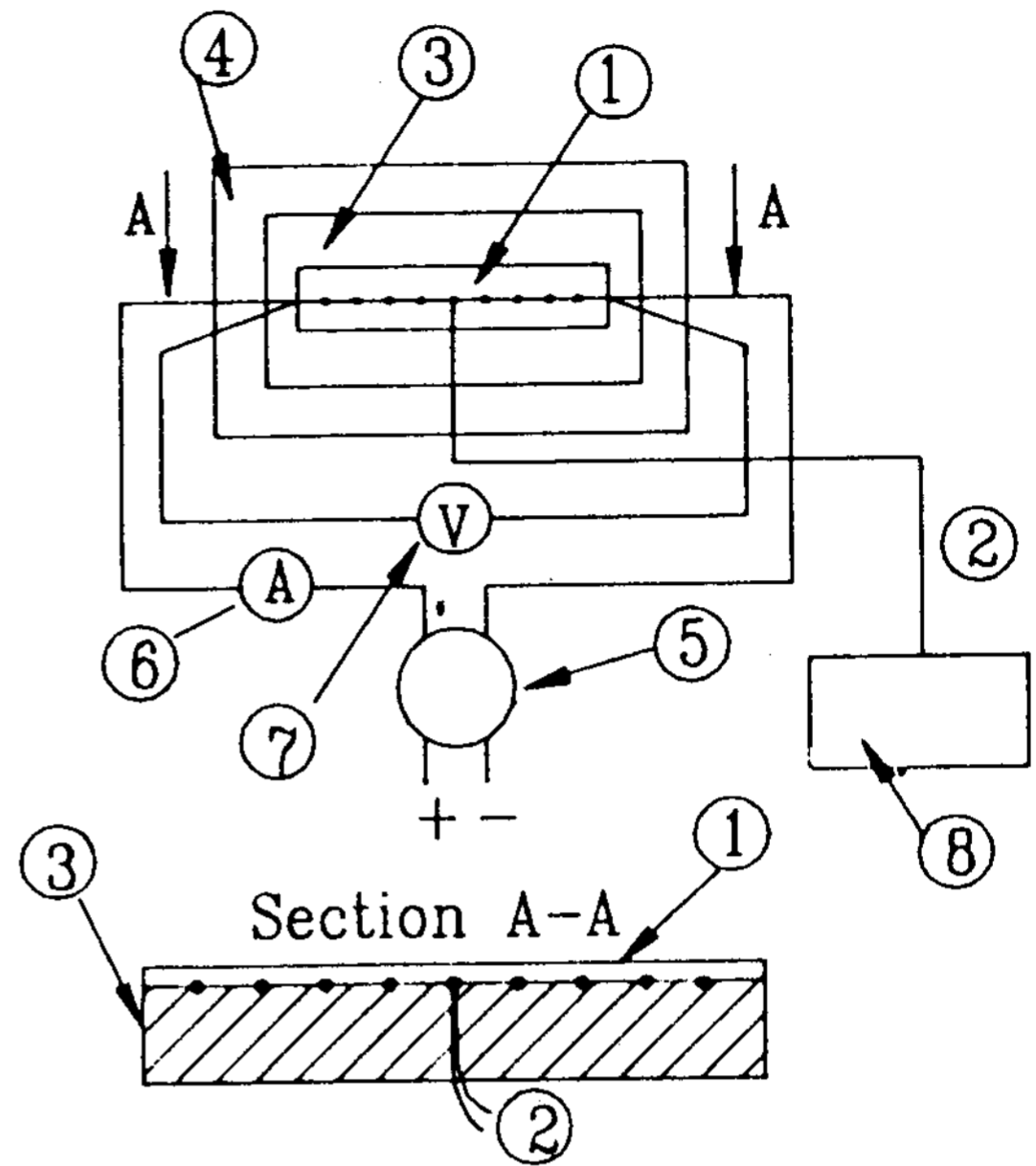
.....(1)

노즐 ⑤에서 분출된 水噴流는 上向의 傳熱面 ⑥에 衝突하여 熱交換을 한 후 回水槽 ⑨에서 배출한다. 이때 전열면⑥은 전열면 지지프레임 ⑦로 고정되어 있고 이 지지프레임을 조절하여 전열면의 경사각을 변화 시켰다. 또한 베벨기어 ⑧를 이용하여 전열면을 상하로 이동하여 노즐-전열면간 거리(H)를 노즐직경(D)로 무차원화한 거리 H/D를 조절 하였다.

傳熱面上에서의 溫度分布는 傳熱面⑦의 裏面의 圖心에서 4mm 間隔으로 溶着된 熱電對(T-Type $\phi 70\mu m$)⑩에 의하여 측정하였다. 전열면의 등열유속 가열은 전원공급장치 ⑪에 의하여 가열되며 이때 암페어미터 12와 볼트미터 13에 의하여 열유속을 조절하였다. 水噴流의 온도는 노즐입구에 설치한 열전대(T-Type $\phi 70\mu m$) ⑩으로 측정하였으며, 傳熱面의 국소온도 및 冷却水의 溫度는 溫度測定用 계측기(Temperature logging System Fluke, USA) 14를 사용하였다.

2-3. 電熱面의 加熱 및 溫度測定

本 實驗의 傳熱面과 加熱裝置는 Fig. 3과 같다. 傳熱面 ①은 長方形 스테인레스박판(SUS304, $10mm \times 100mm \times 30\mu m$)이며 그 裏面의 圖心(停滯點)에서 X방향으로 4mm의 間隔으로 9개의 熱電對(T-type, $\phi 70\mu m$)②을 베이클라이트판③에 접착하였다. 충돌판은 지지프레임④에 의하여 일정한 경사각을 갖게 된다. 傳熱面에서의 등열유속조건의 加熱量은 傳熱面 兩端을 전력공급선에 연결시키고 電源供給裝置(Slidac) ⑤를 이용하여 傳熱面에 $10^6 W/m^2$ 에 해당하는 熱流束의 負荷가 걸리도록 하고, 電流計⑥과 電壓計⑦를 이용하여 熱流束을 조절하였다. $10^6 W/m^2$ 의 等熱



- | | |
|---------------------|-----------------|
| 1. Heated Surface | 5. Slidac |
| 2. C-C Thermocouple | 6. Ampere Meter |
| 3. Impinging Plate | 7. Volt Meter |
| 4. Bearing Plate | 8. Data Logger |

Fig. 3 Heating apparatus in the impingement jet system.

流束 條件에서 衝突噴流에 의하여 傳熱面이 冷却될때 각 側定點의 溫度는 熱電對 ②에 연결된 溫度計測시스템(Temperature logging system, Fluke, USA)⑧에 의하여 측정하였다. 이때 測定된 溫度는 傳熱面 裏面의 溫度지만 전열면으로 사용된 스테인레스호일은 높은 열전달계수가 나타남에도 불구하고 本 實驗範圍에서 가장 높은 열전달특성을 나타내는 정체점을 제외하면 Bi數의 範圍는 0.01~0.14이므로 噴流가 直接衝突하는 傳熱面 表面의 온도를 裏面의 溫度로 간주하고 熱傳達係數를 구하였다.

本 實驗에서 열유속과 누셀트수는 不確實性 해석⁷⁾에 의하면 각각 13%, 17% 誤差 範圍內에서 信賴할 수 있다.

III. 實驗結果 및 考察

경사전열면에 관한 自由衝突水噴流 冷却에 대한 熱傳達係數의 分布는 無次元化된 노즐-전열면간 거리(H/D), 레이놀즈수(Re), 프란틀수(Pr), 노즐반경 방향거리(X/D)와 無次元 傾斜角(Dn)의 영향을 받는다.

Fig.1의 自由噴流領域인 範圍에서 노즐-傳熱面간 距離(H/D)를 1.5~10.5의 範圍에서 變化시키면서 각각의 速度에 대하여 냉각효과가 가장높은 기하학적 停滯點을 기준으로 전열면을 경사시켰을때 상향구배를 갖는 半徑方向距離 X를 正(+)
의 方向으로 하고, 下向勾配를 갖는 半徑方向距離를 負(-)의 方向으로한 傳熱面에 대하여 停滯點으로부터 노즐출구직경(D)에 해당하는 4mm 間隔으로 X/D=22~12까지 측정하였으며, 임의의 H/D와 V₀에 대하여 18個所의 局所누셀트수를 구하여 實驗結果를 整理하였다.

3-1. 局所 熱傳達係數 分布

Fig. 4는 노즐-전열면간 거리 H/D=1.5, 傳熱面의 傾斜角(Deg)는 60°인 경우에 噴流速度(V₀)에 대한 국소누셀트수의 分布를 나타낸 것이다. 국소누셀트수는 동일한 速度에 대하여 停滯點에서 가장 높게 나타나고 있으며, 이 점을 中

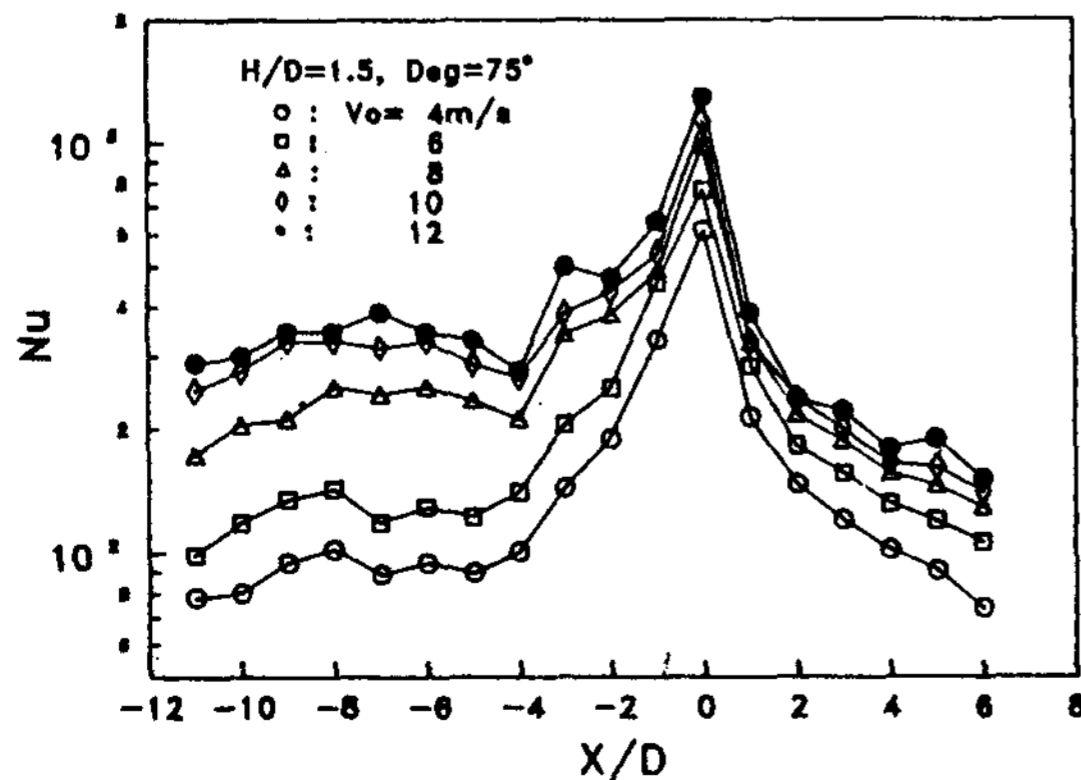


Fig. 4 Local Nu number profiles for various velocity studied, H/D=1.5, Deg=75°.

心으로 반경방향거리(X/D)가 증가함에 따라 누셀트수는 감소하고 있다. 上向勾配 傳熱面의 국소누셀트수는 감소 후에 X/D=2 근방에서 다소 감소구배가 둔화되고 있다. 반면 下向勾配 傳熱面에서는 감소후 X/D=-4인 壁面領域 近方에서 국소누셀트수가 재차 증가하여 X/D=-8 근방에서 第2極大值 현상이 나타나는데, 이와 같은 현상은 噴流가 衝突하는 停滯點에서 層流境界層이 형성된 후 X/D=-4에서 亂流境界層으로 遷移가 發生하여 X/D=-4 以後에 亂流强度의 增加로 말미암아서 국소누셀트수가 증가하고 있다. 또한 동일한 局所位置에서 噴流速度가 증가함에 따라 국소누셀트수가 增加하고 있으며, 噴流速度가 국소 누셀트수에 미치는 영향이 明確하게 나타나고 있다. 여기서 停滯點을 기준으로 국소누셀트수의 對稱性을 살펴보면, 噴流速度가 增加하면 下向勾配 傳熱面의 국소위치가 停滯點으로부터 上향면의 對稱點의 국소위치가 비하여 보다 높은 熱傳達 特性을 나타내고 있다. 이러한 現狀은 上向勾配의 경우 壁面噴流의 速度成分이 重力方向의 反對方向을, 下向勾配를 갖는 지점은 重力方向의 速度成分을 갖게되므로, 下向方向의 壁面噴流는 相對적으로 높은 速度에너지를 갖기 때문이라고 생각된다.

Fig.5는 노즐-전열면간 거리 H/D=4.5이고, 분류속도 V₀가 10m/s로 일정한 경우에 傳熱面의 傾斜角의 영향을 나타낸 것이다. 이 그림에서 X/

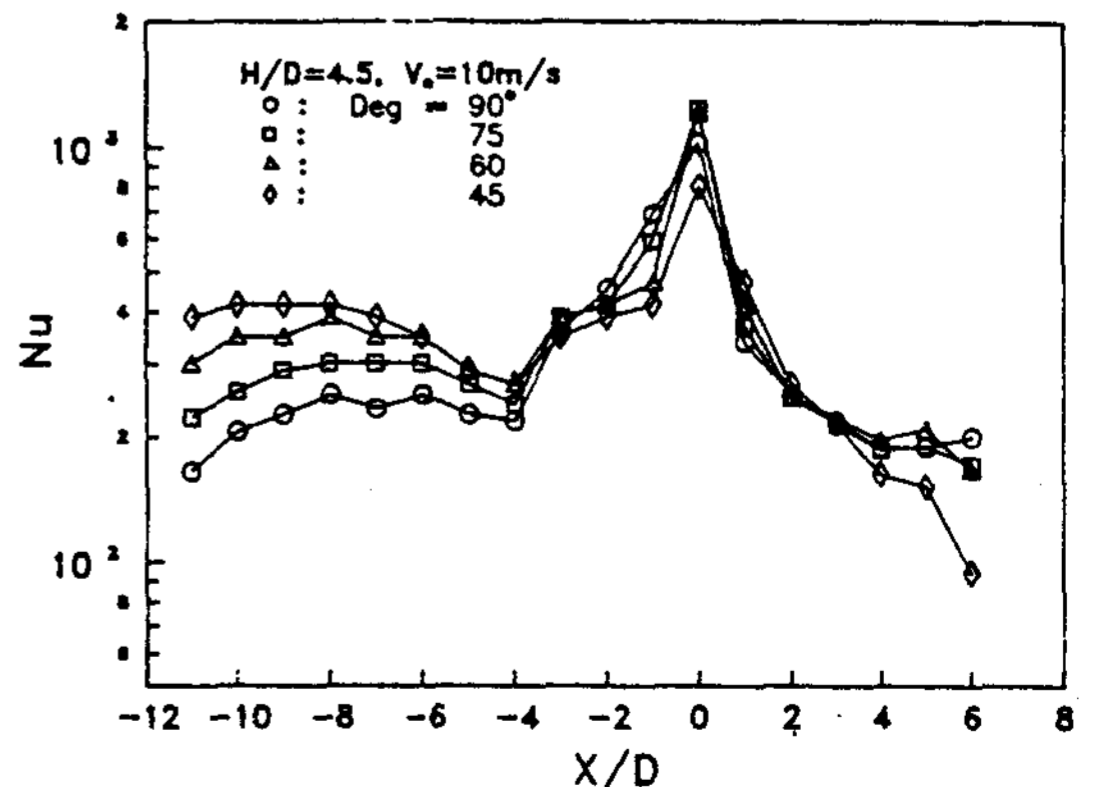


Fig. 5 Local Nu number profiles for various oblique angle of heating plate, H/D=4.5, V₀=10m/s.

D=0의 정체점에서는 동일한 분류속도의 경우에 경사각의 영향이 나타나고 있으며 Deg=60°와 75° 水平平板(Deg=90)에 비하여 相對적으로 높게 나타나고 있다. X/D가 증가하여 壁面噴流 領域으로 됨에 따라 傾斜角의 영향은 점점 작게 나타나고 있다. 하향구배 傳熱面의 X/D=-4인 영역까지는 傾斜角의 變化가 국소누셀트수에 주는 영향이 明確하지 않고 있다. 그러나 X/D=-4의 變曲點 以後에서는 동일한 噴流速度에 대하여 경사각의 영향이 明確하게 나타나고 있다. 여기서 경사각 Deg=90°인 水平平板에 대한 垂直噴流가 가장 낮게 나타나고, 傾斜角이 감소함에 따라 국소누셀트수는 增加하는 것으로 나타나고 있어 壁面噴流 領域에서는 傳熱面의 傾斜度에 의한 영향이 크게 나타남을 알 수 있다.

또한 경사각이 감소함에 따라 하향구배의 전열면은 噴流의 속도성분이 重力方向성분을 갖기 때문에 相對적으로 運動量이 증가되어 국소누셀트수가 증가되리라고 생각된다. 이와같은 국소누셀트수의 分布는 本 實驗의 경우는 H/D와, Deg의 變化에 關係없이 $Nu \propto Re^{0.71}$ 에 비례하는 것으로 나타나고 있어 Goldstein⁴⁾의 연구결과인 $Nu \propto Re^{0.71}$ 과 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig.6, Fig.7은, 傳熱面의 傾斜角 Deg=60°인 경우에 速度가 각각 4m/s, 12m/s인 조건에서 노즐-전열면간 거리 H/D의 영향을 나타낸 것이다. Fig.6에서 $V_0=4.0m/s$ 으로 比較的 低速의 경우는

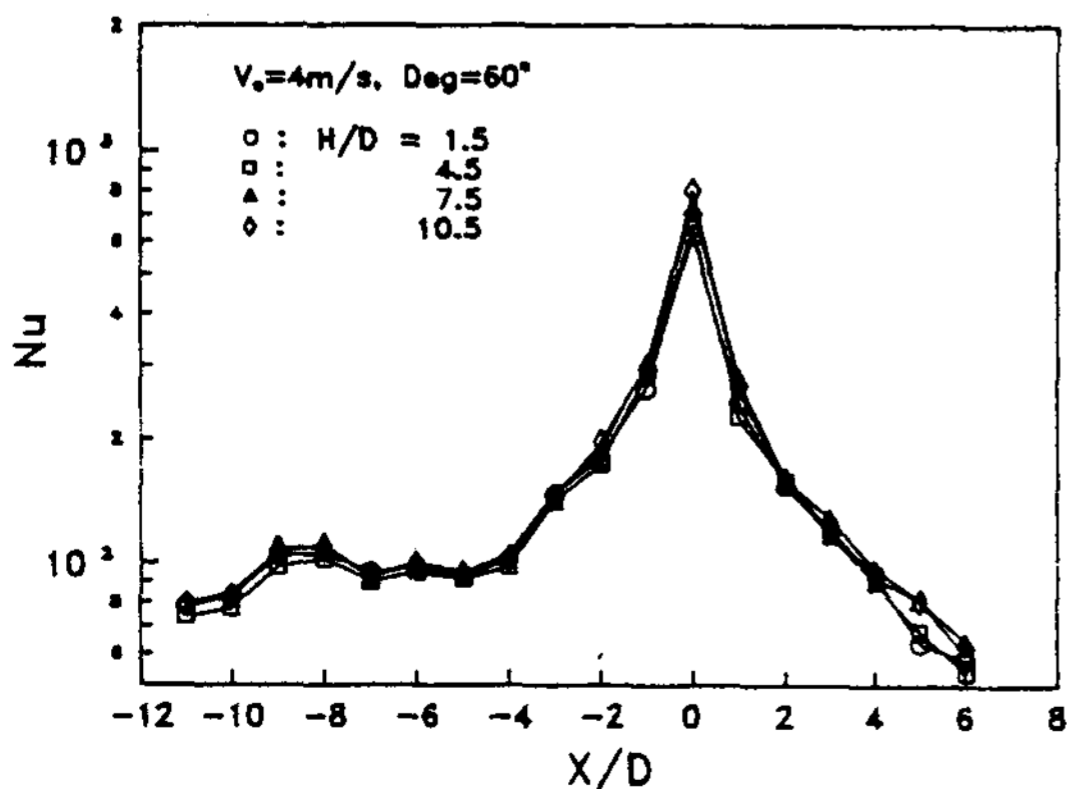


Fig. 6 Local Nu number profiles for various nozzle-plate spacing, $V_0=4m/s$, $Deg=60^\circ$.

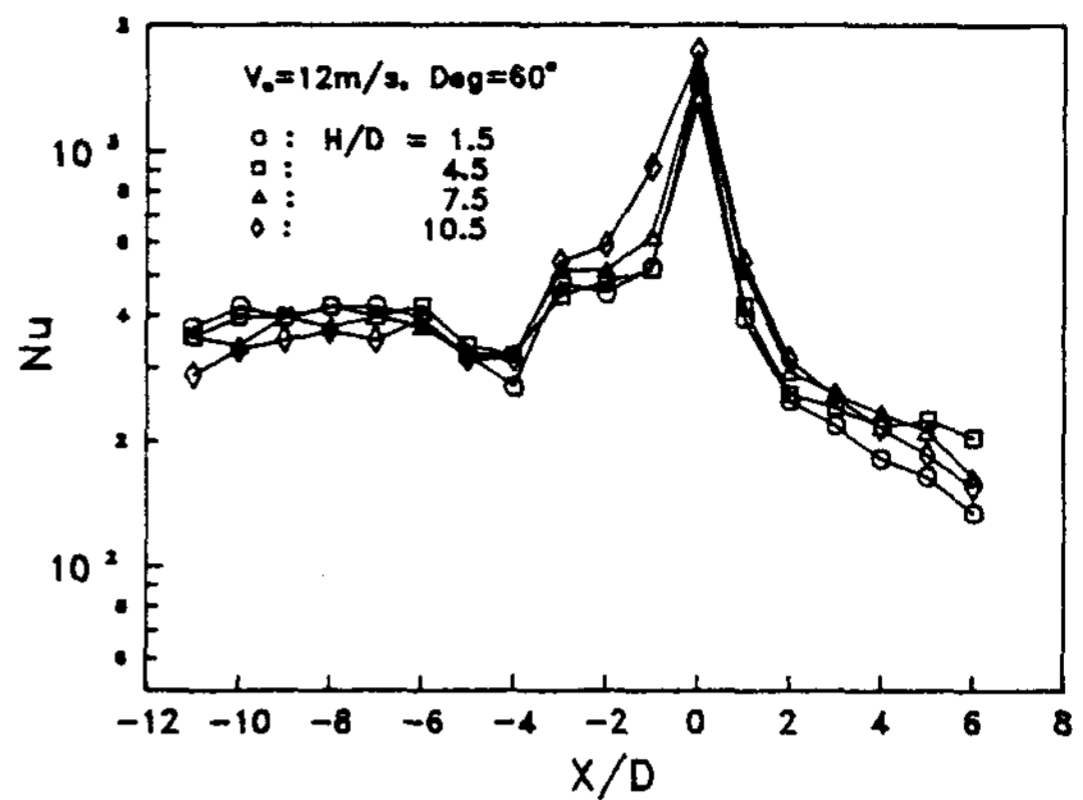


Fig. 7 Local Nu number profiles for various nozzle-plate spacing, $V_0=12m/s$, $Deg=60^\circ$.

H/D의 增加에 대하여 국소누셀트수는 停滯點 領域을 벗어난 壁面噴流 領域에서는 그 영향이 작게 나타나고 있으며, 또한 정체점을 기준으로 상향구배와 하향구배 전열면에서의 국소누셀트수는 對稱性이 나타나고 있다. 그러나 Fig.7과 같이 노즐출구속도가 增加되어 $V_0=12m/s$ 의 速度 條件에서는 저속의 경우에 比하여 국소누셀트수는 相對적으로 H/D의 영향이 增加되었으므로 局所位置의 누셀트수는 H/D가 增加함에 따라 增加하는 경향을 나타내고 있으며, 停滯點을 基準으로 하향구배 전열면의 누셀트수가 대칭되는 상향구배 전열면에 比하여 높게 나타났다.

3-2. 停滯點 熱傳達

本 實驗은 노즐-전열면간 거리 噴流速度, 傳熱面의 傾斜角에 대한 停滯點 熱傳達 特性은 다음과 같은 函數로 表示된다.

$$Nu_0 = F(Re, Pr, H/D, Dn) \dots\dots\dots (2)$$

噴流레이놀즈수의 範圍는 $1 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$ 이며 프란틀수는 指數 n은 프란틀수가 7.32~7.91로 매우 작은 값의 범위를 나타내기 때문에 프란틀수는 本 實驗範圍에서 결정적인 영향을 나타내지 못하고 있다. 또한 單相의 衝突噴流實驗式에서 냉

각액이 물인 경우는 경험적으로 Pr수의 지수 n은 0.4를 취하고 있으므로^{6, 10, 11)} 본 研究에서도 n=0.4를 취하면 식(2)를 單相強制對流 實驗式의 형태로 나타내면 다음과 같게 된다.

$$Nu_0 = a \cdot Re^m \cdot Pr^{0.4} \cdot (H/D)^p \cdot Dn^r \dots\dots\dots (3)$$

식 (3)에서 停滯點누셀트수(Nu₀)와 레이놀즈수의 關係를 나타내기 위하여 Fig.8, Fig.9에 나타낸 바와같이 각 傳熱面의 傾斜角에 대하여 縱軸에는 Nu₀ Pr^{-0.4}을, 橫軸에는 레이놀즈수를 취하여 나타낸 결과 전열면경사각(Deg)과 H/D가 일정한 조건에서 레이놀즈수의 增加는 정체점 누셀트수(Nu₀)를 증가시키고 있으며, 또한 동일한 레이놀즈수에서 H/D가 증가하면 정체점 누셀트수가 增加하는 傾向을 나타낸다. 레이놀즈수의 증가에 따른 정체점 누셀트수의 증가율은 Fig.8, Fig.9에서 나타낸 바와 마찬가지로 본 實驗範圍의 모든 條件에서 유사한 증가율을 나타내고 있으며 Nu₀ ∝ Re^{0.73}의 關係가 있음을 알았다. 따라서 식(3)은 다음과 같이 표시된다.

$$Nu_0 = F(H/D) \cdot Re^{0.73} \cdot Pr^{0.4} \cdot Dn^r \dots\dots\dots (4)$$

그러나 레이놀즈수의 指數m은 層流衝突液體噴流의 研究結果에 의하면 Nu₀는 Re^{0.5}에 比例하는 것으로 나타나고 있다^{8, 9)}. 亂流噴流의 경우에

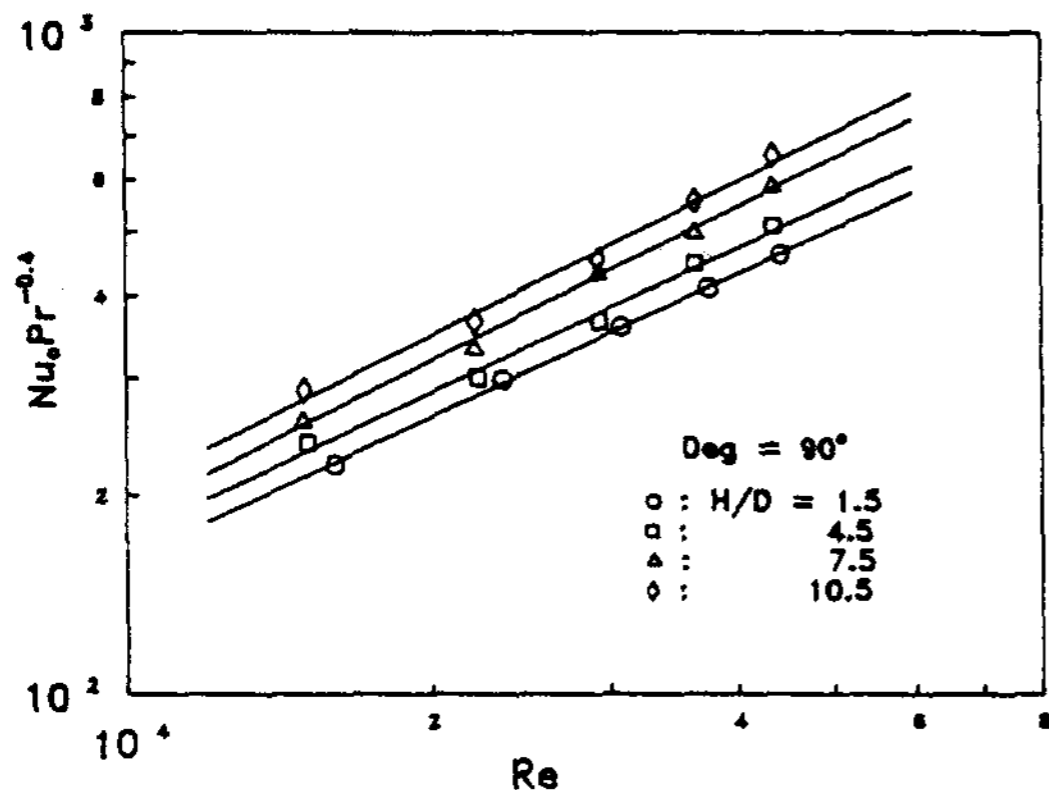


Fig. 8 Correlation of stagnation Nu number for various nozzle-plate spacing, Deg=90°.

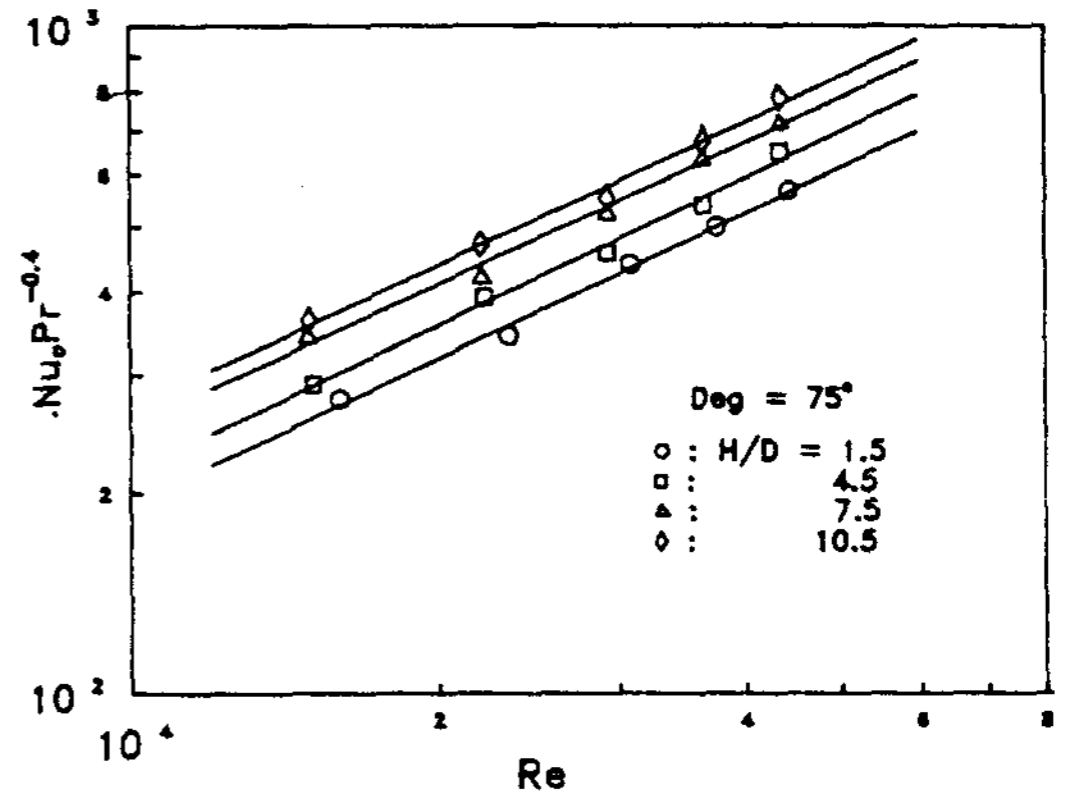


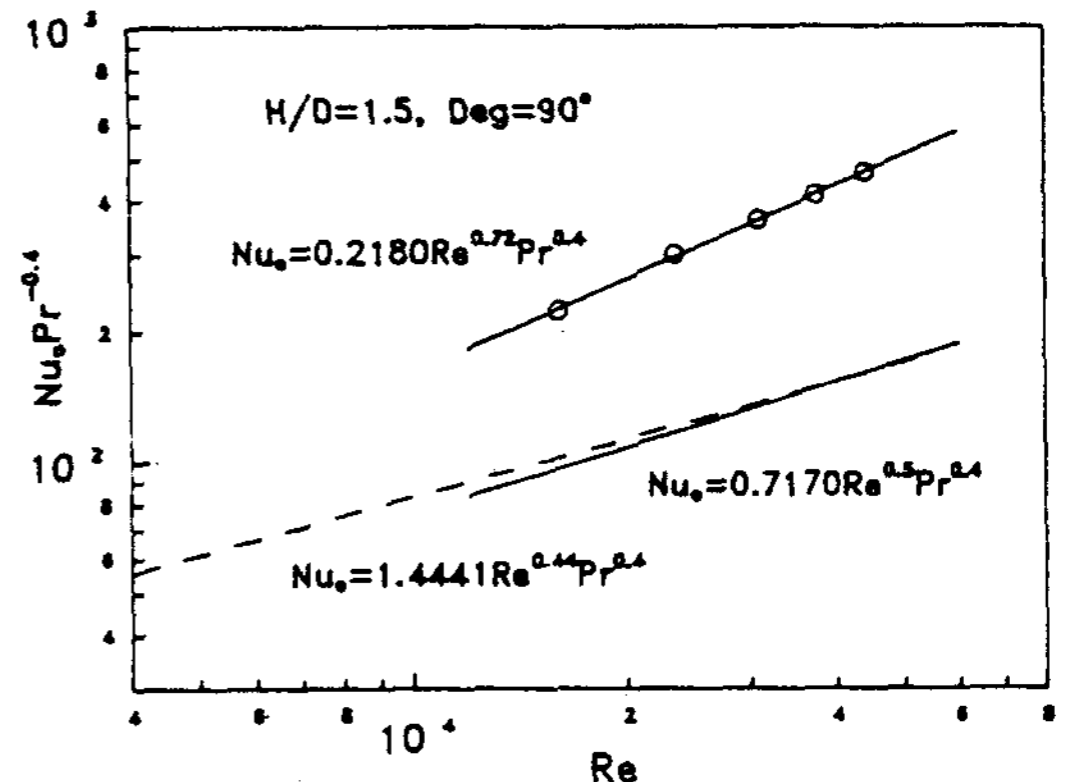
Fig. 9 Correlation of stagnation Nu number for various nozzle-plate spacing, DegNo.75°.

서는 D.H.Wolf¹⁰⁾은 Re^{0.71}으로 제시했으며, D.T.Vander등¹¹⁾은 Re^{0.8}을 나타내었다. 본 實驗의 경우는 층류의 레이놀즈수의 指數 0.5보다도 더 큰 값을 나타내고 있으며 난류분류에 가까운 값을 나타내고 있다.

Fig.10에서는 본 研究의 H/D=1.5의 垂直噴流 (Deg=90°)조건과 比較하기 위하여 X.S.Wang⁹⁾의 層流理論解와 Steven⁸⁾의 實驗結果式을 引用하여 나타내었으며 引用된 式은 다음과 같다.

Wang의 층류이론식 : $Nu_0 = 0.7170 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.4} \dots\dots\dots (5)$

Stenen의 실험식 : $Nu_0 = 1.4441 \cdot Re^{0.44} \cdot Pr^{0.4} \dots\dots\dots (6)$

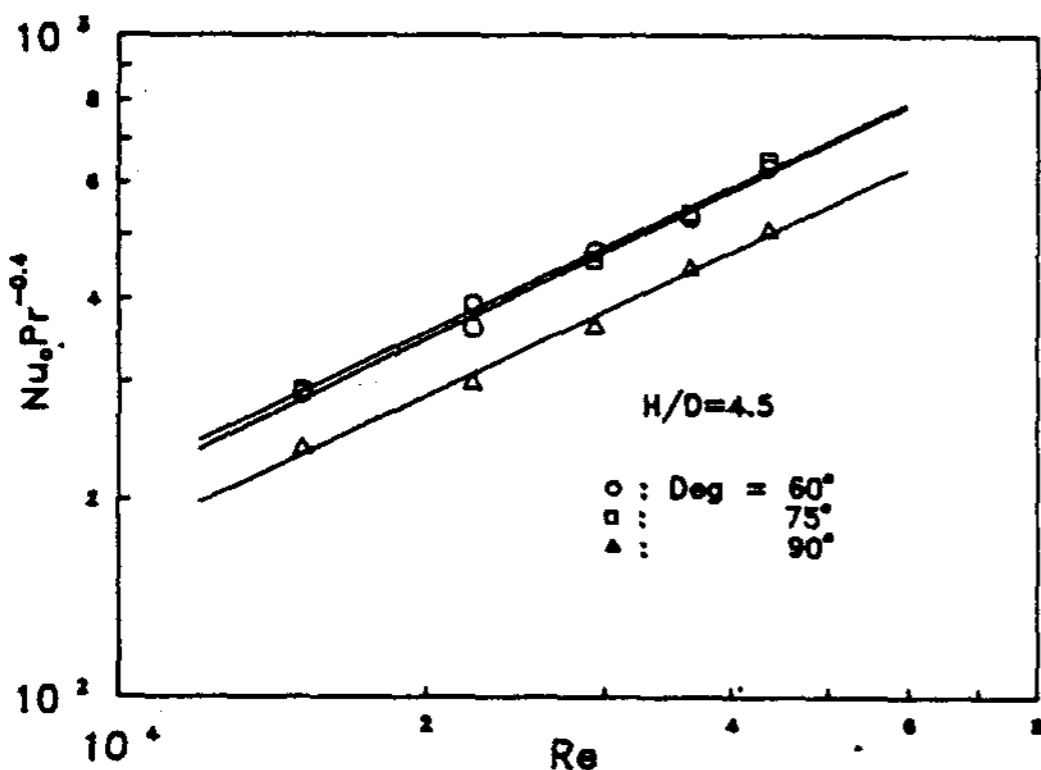


Fi. 10 Comparison of stagnation Nu number using Steven' Eq. and laminar flow analysis.

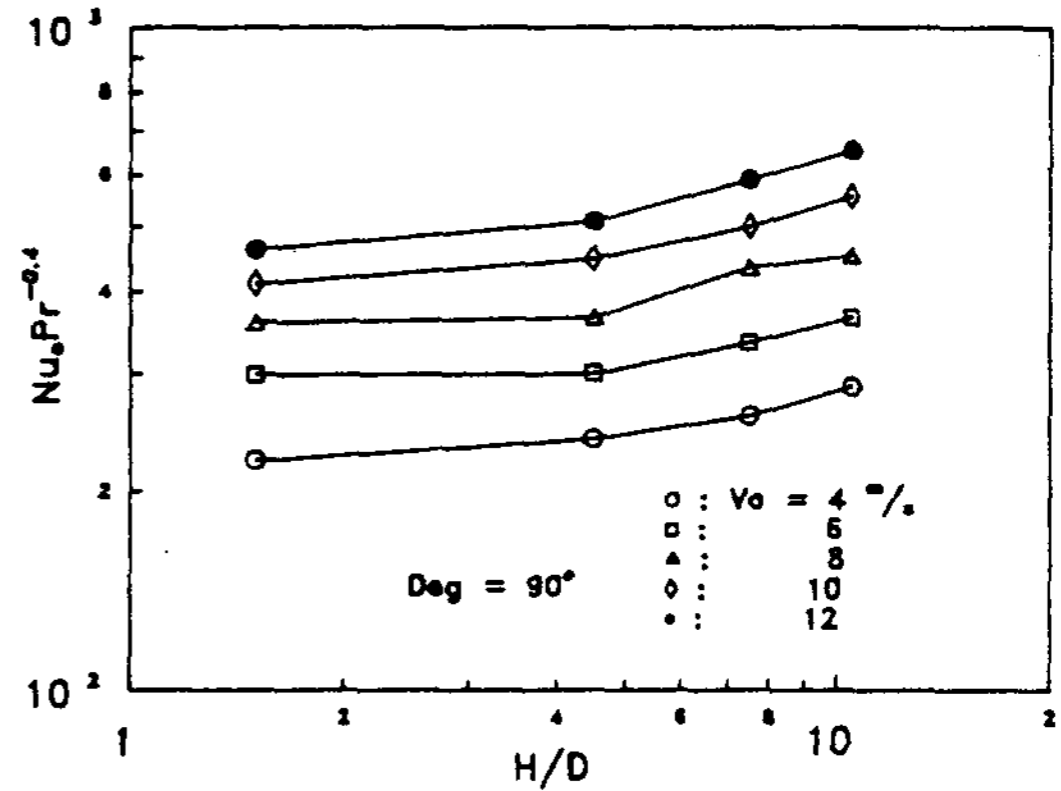
본 연구의 실험식 : $Nu_o = 0.2180 \cdot Re^{0.72} \cdot Pr^{0.4}$ (7)

여기서 Steven⁸⁾의 연구는 노즐直徑 D=4.1mm이며 形象은 길이 38mm의 圓管을 使用하였으며 노즐직경(D)을 대표길이로 하였을때 레이놀즈수의 범위는 4,000~52,000이다. 식(7)에서 나타난 레이놀즈수 指數m=0.72가 Steven의 實驗式에 나타난 레이놀즈수 指數 m=0.44보다 더 크게 나타나고 있어 본 실험의 경우 噴流速度의 影響이 더 크게 나타나고 있다. 이와같은 비교에 의하면 停滯點 熱傳達(Nu_o)은 層流噴流 理論式에 比하여 최소 2.2배 높은 熱傳達 特性을 나타내고 있어 相對적으로 상당히 높은 熱傳達 效果를 나타내고 있는데 이는 동일한 無次元 實驗 條件이라는 관점에서 볼때 노즐내면형상이 정현곡선인축대칭의 원형노즐(D=4mm)이라는 점을 감안한다면 노즐의 특성에 기인한 효과라고 생각한다.

Fig.11은 H/D=4.5인 조건에서 전열면의 경사각의 영향들 나타낸것으로서 Deg=90° 즉 水平 平板에 垂直으로 衝突하는 분류의 정체점 열전달이 경사전열면에 比하여 낮은 冷却效果를 나타내고 있다. Fig.12는 전열면의 경사각 Deg=90°인 경우에 노즐-전열면간 거리 H/D의 영향을 나타낸것이다. 여기서 H/D가 증가하면 모든 速度條件에서 정체점 열전달이 增加하고 있는데, 이와 같은 현상은 Steven⁸⁾과 Vader¹¹⁾은 下向圓



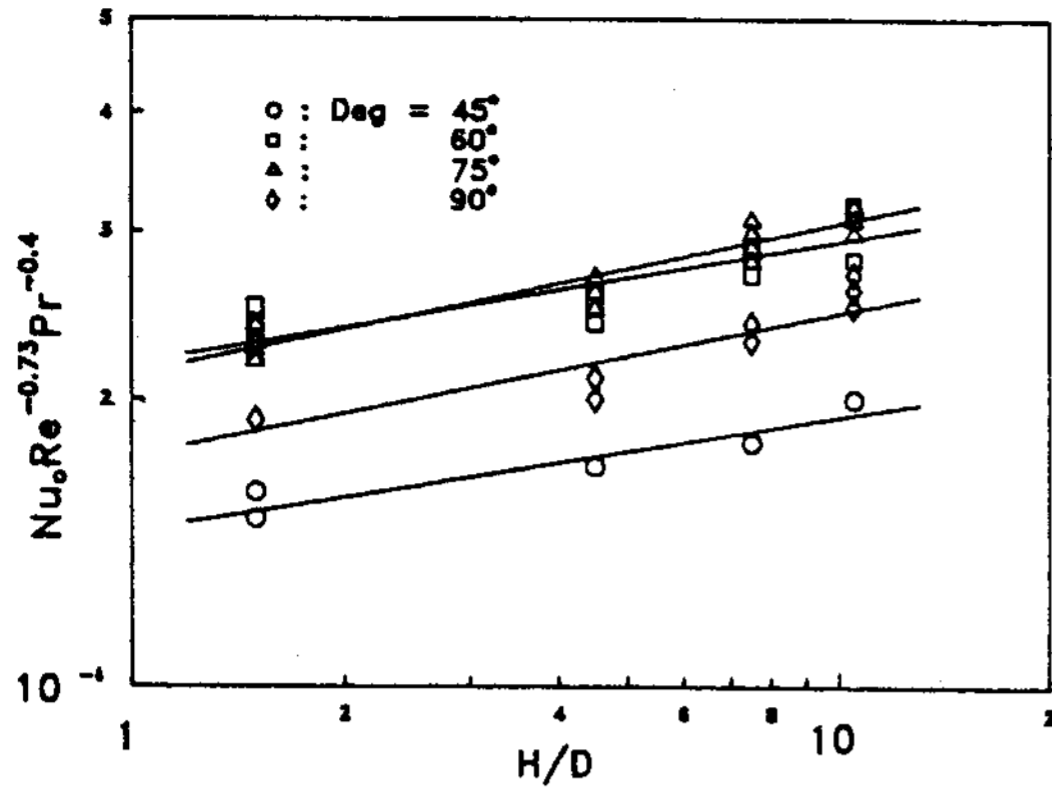
Fi. 11 Correlation of stagnation Nu number for various oblique angle of impinging plate, H/D = 4.5.



Fi. 12 Correlation of stagnation Nu and H/D for various velocity, Deg=90°.

形水噴流 實驗에서 H/D가 증가하면 정체점 열전달이 단순히 감소한다고 하였으나 Gardon¹²⁾에 의한 二次元空氣噴流의 研究에서는 停滯點의 熱傳達을 最大로하는 노즐-傳熱面間的 無次元距離가 8~10으로 나타내고 있다. 본 實驗의 경우는 노즐-전열면간 거리가 H/D=10 이상의 영역에서는 정체점열전달이 감소되리라 생각되며 Gardon²⁾의 경우와 定性的으로 一致를 나타내고 있다. 단지 最大熱傳達을 나타내는 H/D가 10이후의 領域에 나타나는 이유는 축대칭의 정현곡선형식의 원형노즐이 下向噴流로 되어 있고, 空氣보다 粘性이 큰 물을 사용하였기 때문에 自由噴流의 遷移領域이 下流로 移動되어 最大熱傳達을 나타내는 노즐-전열면간 거리가 增加되었다고 생각된다.

Fig.13은 노즐-傳熱面간 거리(H/D)의 增加에 의한 停滯點누셀트수의 關係를 나타낸것으로서 縱軸에는 $Nu_o \cdot Pr^{0.4} \cdot Re^{0.73}$ 의 값을 橫軸에는 H/D의 값을 各各의 전열면의 경사각에 대하여 圖式化한 것이다. 모든 경사각에 대하여 H/D가 增加함에 따라 Nu_o는 增加함을 나타내고 있으며, 수직분류(Deg=90°)를 基準으로 傳熱面의 경사각이 60, 75°인 경우는 熱傳達效果가 증진되고 있다. 반면 Deg=45°인 경우는 Deg=90°인 경우에 比하여 상대적으로 낮은 정체점열전달 效果를 나타내고 있다. 이 結果에서 식(4)로부터 노즐-전열면간 거리(H/D)의 影響을 나타내는 無次元 實驗式은 다음과 같다.



Fi. 13 Effect of non-dimensional oblique angle on nozzle-plate spacing in stagnation Nu number.

Deg=45° : $Nu_0 = 0.1453 Re^{0.73} Pr^{0.4} (H/D)^{0.41} \dots$ (8)

Deg=60° : $Nu_0 = 0.2173 Re^{0.73} Pr^{0.4} (H/D)^{0.14} \dots$ (9)

Deg=75° : $Nu_0 = 0.2169 Re^{0.73} Pr^{0.4} (H/D)^{0.14} \dots$ (10)

Deg=90° : $Nu_0 = 0.1740 Re^{0.73} Pr^{0.4} (H/D)^{0.14} \dots$ (11)

위의 식(8)~식(11)의 정체점열전달은 H/D의 0.14乘에 比例하며, 경사각과 係數와의 關係에서 傾斜角 Deg=90°로 無次元化한 無次元傾斜角(Dn)에 대하여 나타내면 다음과 같다.

$F(Dn) = -0.410 + 1.601Dn - 0.025Dn^2 \dots$ (12)

Fig.14는 式(12)를 利用하여 縱軸에는 $Nu_0 Pr^{-0.4} (H/D)^{-0.14} F(Dn)^{-1}$ 값을 취하고 橫軸에는 Re數를

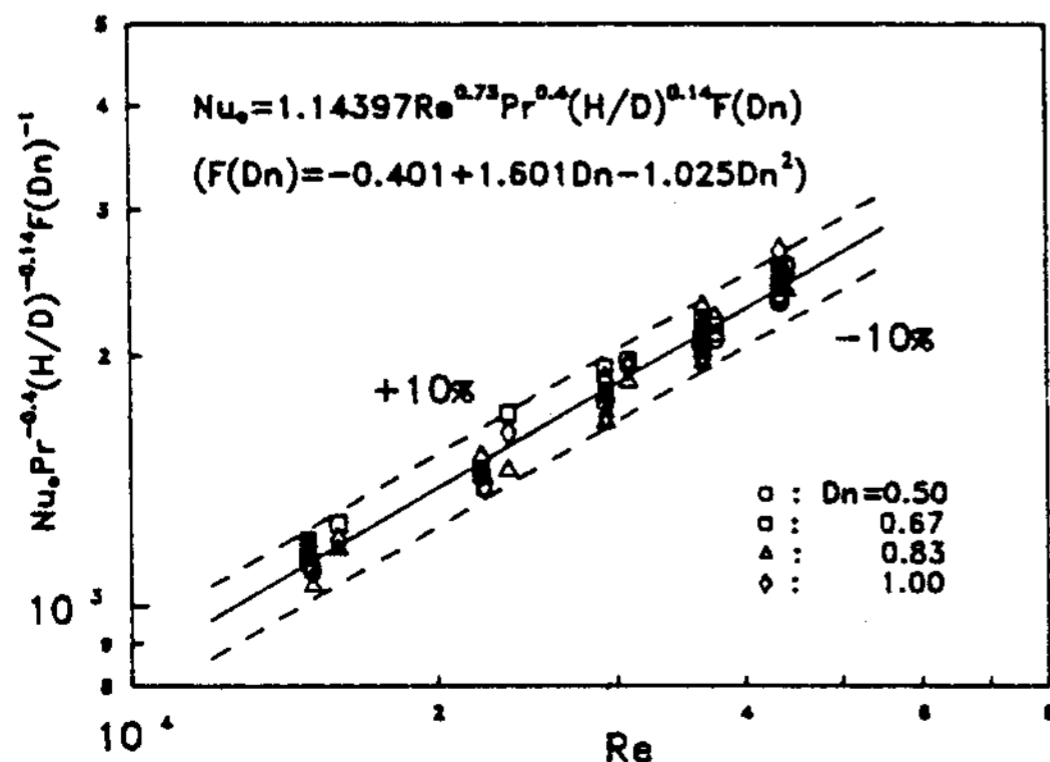


Fig. 14 Correlations of stagnation Nu, Prandtl, nozzle-plate spacing and non-dimensional oblique angle.

취하면 다음과 같은 結論式을 얻었다.

$Nu_0 = 1.1439 Re^{0.73} Pr^{0.4} (H/D)^{0.14} F(Dn) \dots$ (13)

式(12)는 本 實驗範圍의 모든 條件을 滿足하는 無次元 實驗式으로서 ± 10% 誤差範圍內에서 實驗式을 잘 만족하고 있다.

IV. 結 論

下向의 軸對稱 自由水噴流가 等熱流束 條件(10°W/m²)의 傾斜傳熱面에 衝突하는 衝突水噴流 流系를 橫成하였다. 實驗變數로는 노즐-전열면간 거리(H/D), 레이놀즈수(Re), 無次元傾斜角(Dn)으로 하였으며, 노즐-전열면간 거리 H/D의 범위는 1.5~10.5, 레이놀즈수의 범위는 1×10⁴~4×10⁴, Dn의 범위는 0.5, 0.67, 0.83, 1.00으로 하였다. 이와같은 實驗條件을 變數로하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 동일한 무차원 경사각에 대하여 국소누셀트수는 Re^{0.7}에 比例하여 增加하며, 停滯點으로부터 局所距離 X/D가 -8인 下向勾配傳熱面의 局所位置에 第2의 極大 熱傳達 현상이 나타났다.

(2) H/D가 일정한 條件에서 국소누셀트수는 噴流速度가 低速의 경우 전열면 경사각의 影響이 작게 나타나고 있으나, 高速領域이 됨에 따라 경사각의 影響이 增加되었으며, 특히 X/D < -4의 壁面噴流領域에서 경사각에 대한 影響이 명확하게 나타나고 있다.

(3) 동일한 流速條件에서 停滯點 熱傳達은 無次元傾斜角이 Dn=0.83과 0.67인 경우 수직분류인 Dn=0.5인 경우는 Dn=1.00인 경우에 比하여 熱傳達 效果가 낮아진다.

(4) 停滯點熱傳達은 분류속도와 노즐-전열면간 거리에 比例해서 增加하며, 層流理論解에 比하여 最少 2.4倍 이상 높은 熱傳達效果를 나타내었다.

(5) 정체점누셀트수는 Re수, Pr수, H/D 그리고 무차원경사각 Dn에 대하여 다음과 같은 無次元

實驗式으로 나타냈다.

$$Nu_o = 1.1439Re^{0.73}Pr^{0.4}(H/D)^{0.14}F(Dn)$$

(단 $F(Dn) = -0.401 + 1.601Dn - 1.025Dn^2$,
 $0.50 \leq Dn \leq 1.00$)

후기 : 이 연구는 1991년 학술진흥재단의 대학부설연구소 지원 학술연구조성비에 의하여 이루어 졌음을 밝혀두며 이에 감사합니다.

Reference

1. 永井四郎, 下合彌, 谷口薫, “水噴流による冷却について” 『日本機械學會論文集』 (第2部), 21卷 104號, pp.310-315, 1955
2. 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.
3. C. D. Donaldson and R. S. Snedeker, “A study of free jet impingement. Part I. mean properties of free and impinging jets,” *J. Fluid Mech*, Vol. 45, Part 2, pp. 281-319, 1971.
4. R. J. Goldstein and M. E. Franchett, “Heat transfer From a Flat Surface to an Oblique Impinging Jet,” *Transactions of the ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 84-90, 1988.
5. E. M. Sparrow and B. J. Lovell, “Heat Transfer Characteristics of an Obliquely Impinging Circular Jet,” *Transactions of the ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 102, pp. 202-209, 1980.
6. J. Stevens and B. AW. Webb, “The effect of inclination on local heat transfer under an axisymmetric, free liquid jet,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 1227-1991.
7. J. P. Holman, *Experimental Methods for Engineers, 4th Ed., McGraw Hill*, New York, pp. 41-49, 1989.
8. J. Stevens and B. W. Webb, “Local Heat Transfer Coefficients Under and Axisymmetric, Single Phase Liquid Jet” *Transactions of the ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 71-78, 1991.
9. X. S. Wang, Z. Dagan and L. m. Jiji, “Heat transfer between a circular free impinging jet, and a solid surface with nonuniform wall temperature or wall heat flux-1. Solution for the stagnation region,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 32, No. 7, pp. 1351-1360, 1989.
10. D. H. Wolf, R. Viskanta and F. P. Incropera, “Local Convective Heat Transfer From a Heated Surface to a Planar Jet of Water With a Nonuniform Velocity Profile,” *Transactions of the ASME Journal of heat Transfer*, Vol. 112, pp.899-905, 1990.
11. D. T. Vader, F. P. Incropera and R. Viskanta, “Local convective heat transfer from a heated surface to an impinging, planar jet of water,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 3, pp.611-623, 1990.

Heat Transfer Characteristics of Water Jet Impinging on Oblique Surface

Choi, Guk-Gwang* · Na, Gi-Dae** · Kim, Yeun-Young*** · Jeon, Sung-Taek***
Lee, Jong-Su****

**Incheon Univ. Professor*

***Choseun Univ. Professor*

****Incheon Junior College Professor*

*****Andong Tech. College Fall Time Instructer*

The purpose of this research is to investigate the characteristics of heat transfer in the downward axisymmetric free water jet system impinged on a flat oblique plate which has the uniform heat flux. Experimental conditions considered were Reynolds number, distance between nozzle and flat plate, inclination angle of heater surface and nozzle exit velocity.

Local Nusselt number was subjected to the influence of Re number, Pr number, oblique angle of heating surface and local position of flat plate. In the wall region of downward surface, The secondary peak point of heat transfer appeared at the local point of $X/D = -8$ from the stagnation point. The stagnation heat transfer rate of this experimental study augments 2.4 times than that of laminar theoretical solution. The stagnation nusselt number is function of Reynolds number, nozzle-plate spacing, Prandtl number and oblique angle of impinging plate.

Technique of Heat Transfer Augmentation in Impinging Air Jet System

Doo-seob, Choi · Seong-min, Kum · Yong-hwa Lee · Jeong-yun, Seo

* *Inha University, Graduate School*

** *Yuhan Technical College*

*** *Inha University*

The purpose of this study was to investigate the enhancement of heat transfer without additional external power in the case of rectangular impingement air jet vertically on the flat heating surface. The technique used in the present study was placement of square rod bundles as a turbulence promoter in front of the heat transfer surface.

The results obtained through this study were summerized as follws. High heat transfer enhancement