

<論 文>

波形面に 衝突하는 二次元 噴流와 傳熱特性 및 流動構造

—충돌 분류의 전열특성—

崔 國 光* · 車 指 永**

(1985年 9月 23日 接受)

Heat Transfer Enhancement and the Flow Structure of a Two-Dimensional Jet Impinging on Wavy Wall

—Heat Transfer Enhancement Jet Impinging—

Gug Gwang Choi and Ji Young Cha

Key Words: Heat Transfer Enhancement(열전달 특성), 2-Dimension Impinging Jet(2차원 충돌 분류), Surface Floating Method(표면 부유법), Smoke-Wire Method(연기선 법) Flow Structures(유동구조)

Abstract

The average heat transfer coefficient of 2-D impinging jet has been augmented as much as 60% on the wall with large-scale wavy roughness. The mechanism of this heat transfer augmentation is studied with emphasis on two primary flow structures in the impinging flow region by using either the surface floating method or the smoke-wire technique. They are the stream-wise vortex-like structure, which is characteristic to the impinging jet, and the spanwise vortices associated with the flow separation around the roughness.

The combined effect of these structures can effectively augment the heat transfer particularly in the downstream region where the heat transfer usually deteriorates considerably.

1. 緒 論

衝突噴流는 높은 傳熱特性和 그 制御性이 좋으므로 製鐵, 製紙, 印刷工業等에서의 프로세스, 또는 高溫가스터어빈의 것과 電子機器의 冷却等に 이르기까지 工

業的으로 널리 應用되고 있다. 衝突噴流에서 壓力勾配가 存在하는 衝突領域에 관해서는 상당히 높은 熱傳達率을 얻을 수 있기 때문에 지금까지 많은 研究가 進行되어 왔다.

本 研究에서는 二次元 衝突噴流에 있어서 傳熱面上에 比較的 큰 스케일을 가진 트랜스버스 리브(transverse rib)形의 波形돌기를 만들고 衝突領域을 包含하여 通常 熱傳達率이 顯著하게 낮아지는 下流域까지의 넓은 領

* 正會員, 仁川大學 機械工學科

** 正會員, 仁荷工業專門大學 機械工學科

域에 걸쳐 傳達增進을 目的으로 傳熱特性을 實驗의 으로 調査하고 前報⁽¹⁾에서 다른 矩形의 트랜스버스 리브를 갖는 傳熱面에서의 結果와 比較 檢討하였다. 한편 돌기面上의 流動형태의 詳細를 (i) smoke-wire法에 의해 衝突噴流 特有의 縱渦流와 그 伸張에 對하여 調査하고 (ii) 表面浮遊法(surface floating method)에 의해 比較의 큰 스케일의 돌기에 따른 흐름의 剝離 및 再附着에 關해서 調査하여 이들과 傳熱機構와의 關係를 定性的으로 檢討하였다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

實驗裝置를 Fig. 1에 그 座標系를 Fig. 2에 表示한다. 作動流體는 空氣이며, 送風機에 의해 幅 $B=50\text{mm}$

Table 1 Dimensions of wavy roughness

R5P5		$P/\lambda = 5$ $e = 5\text{ mm}$
R5P10		$P/\lambda = 10$ $e = 5\text{ mm}$
R10P5		$P/\lambda = 5$ $e = 10\text{ mm}$

길이 500 mm 인 二次元노즐로 一定流量을 보낸다. 實驗은 모두 噴流 Reynolds 數 $Re=2.42 \times 10^4$ 로 一定하게 하고 噴流의 初期亂流세기는 約 0.8%, 噴流과 周圍空氣와의 溫度差는 冷却器를 調節하여 0.5°C 이내로 하였다. 傳熱面의 形狀은 平滑面과 더불어 R5P, 5R5P10, R10P5 라 칭하는 3 種類의 供試傳熱面을 使用했다. 波形傳熱面의 形狀 및 寸數를 Table 1에 表示했으며, 波形은 正弦波(sine wave)이고 R은

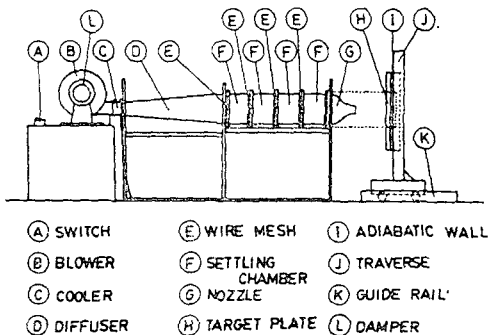


Fig. 1 Experimental apparatus

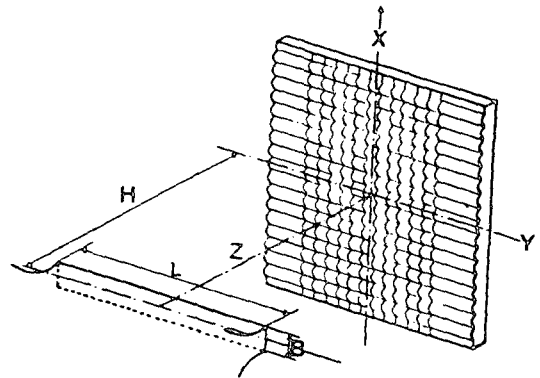


Fig. 2 Coordinate system

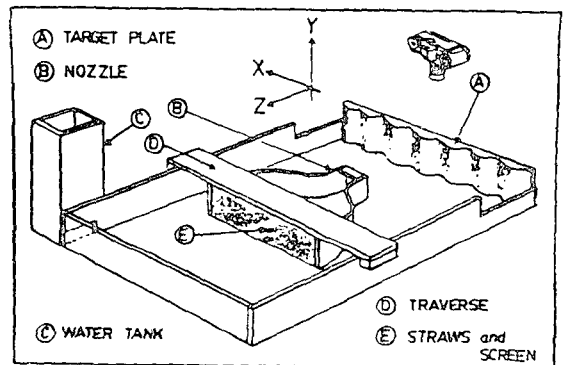


Fig. 3 Schematic of the setup for surface floating technique

돌기의 높이(mm), P는 定點間距離를 돌기의 높이로 나눈 無次元값이다. 傳熱面은 이러한 形狀을 갖는 베크라이트板위에 두께 $30\ \mu\text{m}$, 幅 24 mm의 스테레스 鋼箔을 11매 붙여서 直接 通電하고 波流束이 一定한 加熱條件으로 했다. 傳熱面의 溫度는 스테인리스鋼箔面에 납땀한 113개의 $\phi 70\ \mu\text{m}$, Cu-10 熱電對에 의해 測定되었다. 本報에서 熱傳達의 데이터에 對해서는 對流이외의 熱損失을 補償한후 데이터의 不正確度를 評價한 結果, 平面壁의 경에는 $\pm 5.7 \sim 9.5\%$ (20:1)이었다.

흐름의 可視化 實驗中 剝離 및 再附着現象은 Fig. 3에 表示한 開水路 水噴流裝置를 使用하여 $10\ \mu\text{m}$ 의 알루미늄粉을 트레이서로 한 表面浮遊法에 의해 觀察하였다. 水噴流의 레이놀즈數는 $Re=8,500$ 이다. 또 衝突領域에서 smoke-wire法을 利用하여 下流側으로부터 본 흐름方向에 直角인 面과, 흐름方向에 垂直方向에서 본 壁面과 平行面에서의 現象을 同時에 撮影하였다.

3. 實驗結果 및 考察

Fig. 4에는 平面上的 熱傳達率($N_{OF}=hB/\lambda$)의 測定

結果를 表示하였다. 熱傳達率은 Gardon⁽³⁾ 을 始初로한 從來의 研究와 같이 岐點(stagnation point)에서 最大 值를 나타내고, 兩下流域에서 낮은 값을 갖는 左右對稱의 分布形을 이루고 있다. 또 모든 領域에서 H/B 의 增加와 더불어 熱傳達이 增加하고 있다.

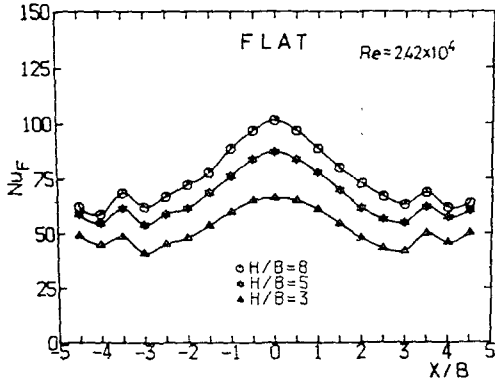


Fig. 4 Heat transfer coefficient on the flat wall

이것은 前報⁽¹⁾에서 發表된 바와같이 自由噴流中の 亂流크기의 增加 및 $H/B > 5$ 에서의 衝突領域에서 큰 스케일의 非定常인 亂流의 縱渦流⁽⁴⁾의 發生에 起因한 것이라 생각된다. 또 下流域 $X/B = \pm 3.5$ 의 位置에는 약한 第二의 피크(peak)가 各 H/B 에서 나타나고 있다.

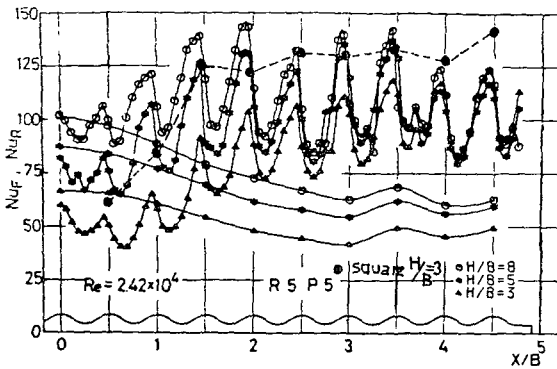


Fig. 5 Heat transfer coefficient on the wavy wall of R5 P5

Fig. 5에 表示한 R5P5의 경우, X/B 가 增加함에 따라서 熱傳達率이 岐點으로부터 일단 낮아져서 各 H/B 에 있어서 最初리브(rib)의 下流面($X/B = \pm 1.9$)까지 變動하면서 增加한다. 그후 下流域으로 갈에 따라 各 H/B 에 대한 熱傳達率의 差가 적어지며, 리브(rib)의 頂上 上流側에서 높고 下流側에서 낮은 거의 周期的인 熱傳達率의 變化가 反復된다. 이는 平板에 비해 最大 約 3.7倍~最小, 約 1.2倍의 增加率을 보여주고 있다. 이들 結果로부터 下流域에서는 縱渦流의

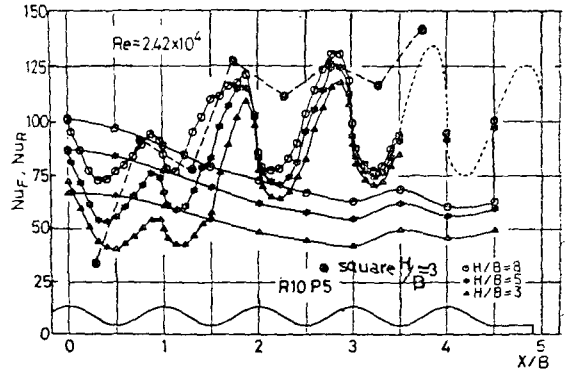


Fig. 6 Heat transfer coefficient on the wavy wall of R10 P5

影響보다도 波形에 의한 흐름의 剝離 및 再附着의 效果가 卓越한 것으로 생각된다.

Fig. 6의 R10 P5인 波形面上的의 熱傳達率分布는 앞에서 表示한 R5 P5와 同一한 傾向임을 알 수 있으며 특히 各 리브(rib) 주위의 分布는 R5 P5와 거의 同一하다. (그림中 $X/B = 3.5$ 이상의 點線은 前報⁽¹⁾의 R5 P5 結果를 參考하여 推定한 것임)

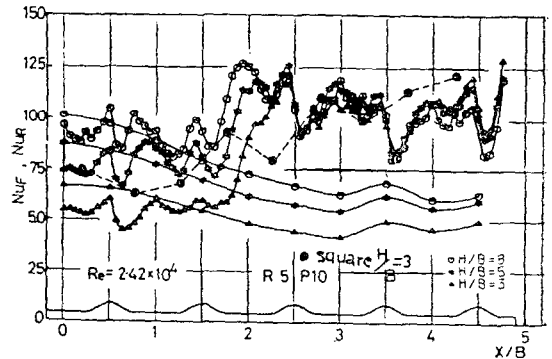


Fig. 7 Heat transfer coefficient on the wavy

Fig. 7에는 波形面의 代表的인 例로서 R5 P10의 熱傳達率($Nu_r = hB/\lambda$)分布를 平面에서의 結果와 함께 表示하였다. 岐點兩側에 대한 分布形의 對稱性은 充分히 確認되었기 때문에 여기에는 岐點 下流片側에서의 各 데이터를 表示하였다. 그림中的의 모든 데이터 點은 約 100個이고 한 리브의 頂上에서 다음 리브의 頂上까지의 距離 즉 한 피치사이에는 17個의 熱電對를 設置했으며 熱電對間의 距離는 約 3mm이다. 熱傳達率의 變化는 下流쪽만으로 갈에 따라 平面에서는 單調하게 減少하고 있지만 波形面의 경우 3번째의 리브($X/B = 2.5$)까지는 리브頂上 및 리브사이의 中央部에서 높은 값을 그 사이에서는 낮은 값을 갖는 規則的인 變化를 하면서 增加하고, 특히 2번째 리브 以下에서는 熱傳達率이 急激히 增加하고 있다. 여기에서 平面의 경우

에서 볼 수 있는 H/B 의 影響, 즉 後述하는 可視化寫眞에서의 縱渦流의 影響이 $X/B \leq 2.5$ 에서 顯著하게 나타난다. 3개의 리브로 부터는 한 罫치내에서의 熱傳達率 變化가 거의 類似하며 리브 頂上으로부터 兩側으로 存在하고, 리브의 中央部, 즉 $\Delta X/P = 0.5$ 에서 第2의 極大值가 또 다음 리브의 根元近方(top near of rib)인 $\Delta X/P = 0.7 \sim 0.8$ 에서 第2의 極小가 存在하는 規則的인 變化가 反復되고 있다. $X/B \geq 2.5$ 에서는 H/B 에 따른 (平板에서 본) 熱傳達率 分布의 차이를 거의 볼 수 없다. 이것은 Berger⁽⁴⁾ 등이 充分히 發達한 管内流에서 矩形리브를 使用한 경우의 物質傳達率을 測定한 結果와 大略 一致하고 있지만 Berger 등의 結果에서는 第2의 極大點이 $\Delta X/P$ 가 0.3~0.4에서 나타나고 있다. 그들에 의하면 第1의 極大值는 剝離에 의해 第2의 極大值再付着에 의해, 第1의 極小值는 剝離域에 의해 第2의 極小值는 境界層의 發達에 의한 것이라고 發表하였으며 本 實驗에서 나타난 바와 같이 本 研究의 結果도 거의 같은 모양의 流動패턴에 의한 것이라고 생각된다. 또한 矩形傳熱面과 波形傳熱面의 熱傳達率을 比較하기 위하여 Fig. 5, 6, 7에 點線으로 圖示하였다. R5 P5, R10 P5에서는 矩形面이 波形面보다 熱傳達率이 무수하게 나타났으나, R5 P10에서는 거의 비슷한 現象이 나타났다.

이상으로 리브 사이의 局所 熱傳達率 分布는 形狀에 의한 影響보다 罫치에 의한 影響이 뚜렷이 보여지며, $X/B \geq 2$ 에서는 H/B 에 따른 局所 熱傳達率의 差는 작지만 H/B 의 依存性이 있음을 보여주어 이는 下流域에서도 縱渦流의 間接的 影響이 있음을 나타낸다.

Fig. 8은 $h = hds/ds$ 에서 定義한 岐點으로부터의 距離 X 까지의 平均熱傳達率이 平板의 경우에 對한 傳熱增進比率을 Nusselt 數의 比로서 表示한 것이다. 단 S 는 平面距離 $X=0 \sim X$ 까지의 波形面 稜線距離이다. 또 여기에서는 前報⁽⁵⁾의 矩形돌기의 데이터와도 比較하기 위해서 함께 表示하였다. 全般的인 傾向으로서 X/B 가 增加할수록 Nus 가 서서히 增加하고 있다. 3種類의 波形面을 比較하면 큰 差는 없지만 단, H/B 가 큰 경우에서 差가 커진다. 또 各 傳熱面을 比較해 볼 때 $H/B=3$ 의 경우가 우수하다. 增進比率은 積分편차 (Nus/Nus_0)로 最高 約 1.6倍로 나타내지만 實際의 面積增加를 알아보면 R5 P5가 가장 우수하다. 또 矩形面인 경우와 比較해 보면 같은 式에서 面積增加率의 差에 의해 波形面보다 矩形面이 약간 有利하다고 할 수 있다.

Fig. 9는 平面 및 波形面, Fig. 10은 矩形面上에서의 表面浮遊法에 의한 흐름의 可視化寫眞을 表示한다.

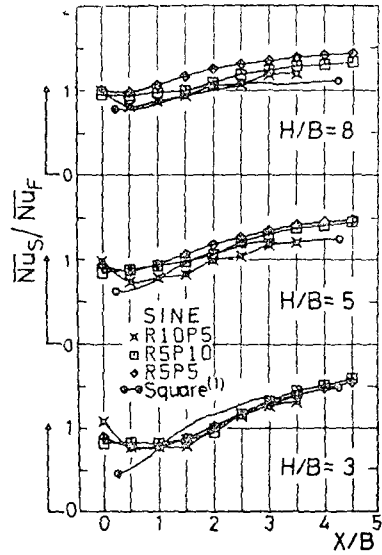


Fig. 8 Comparison of average heat transfer coefficients on the wavy and the flat walls

리브 近方의 剝離 및 再付着 흐름은

非正常性이 강하며 더우기 表面浮遊法의 制約이 따르기 때문에 解析하기가 약간 困難하지만 여기서는 여러 記錄寫眞中 代表的인 寫眞을 提示하였다. 또 實驗의 結果 H/B 에 따른 流動構造의 큰變化를 볼 수 없

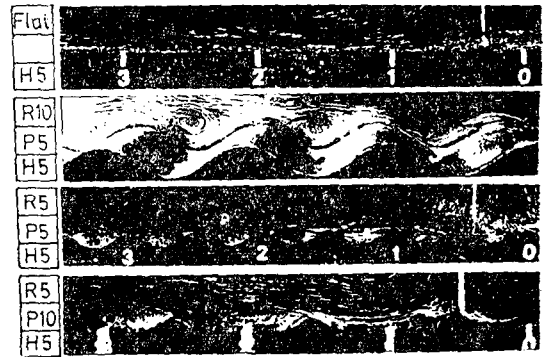


Fig. 9 Impinging jet flow on the flat and the wavy walls at $H/B=5$. (flow from the right)

었기 때문에 $H/B=5$ 의 경우만을 나타냈다. 단 露出時間은 1/60 초이다. 먼저 Fig. 9의 波形面에서는 平板과 달라서 剝離와 二次渦流가 形成됨을 觀察할 수 있다. P5의 경우 岐點下流쪽으로 2번째 以下의 리브의 低面에 非正常的인 渦流의 形成과 放出을 觀察할 수 있는데 R5의 渦流의 當然하나 R10의 경우에 비해서 徑보기 外徑이 작다. 剝離 및 再付着點에 대해서는 近年 Buckles⁽⁶⁾ 등이 二次元 流路의 片側波形面上에서 實驗을 하여 P5에 대해서 剝離 및 再付着點이 各各

$\Delta X/P=0.14, 0.69$ 라는 결과를 얻고 있다. 本實驗에서의 傳熱實驗結果를 통해서 觀察한 P5에서의 結果는 剝離點에 대해서는 $\Delta X/P=0.136$ 으로 Buckles⁽⁶⁾, Berger⁽⁵⁾와 一致하고 있지만 再附着點에 대해서는 $\Delta X/P=0.86$ 으로 Berger의 結果와는 一致하고 있으나 Buckles의 結果와는 약간 다르다. R5 P10에서는 平均的으로 再附着點이 거의 리브와 리브사이의 中央部에서 觀察할 수 있지만 寫眞에서는 再附着點의 位置變動이 크고 剝離渦流가 壁面에 따라서 非定常的으로 放出된다는 것과 또 리브의 上流側에서도 작은 剝離域이 存在한다는 것을 알 수 있다.

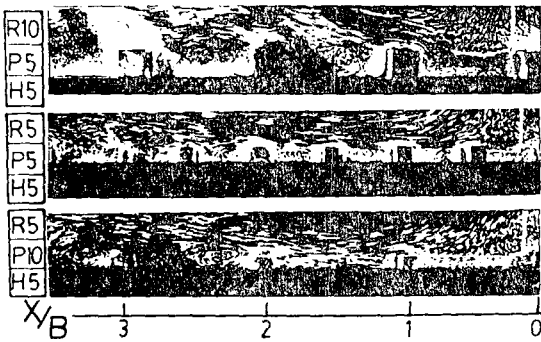


Fig. 10 Impinging jet flow on the wall with square transverse ribs

Fig. 10의 矩形돌기의 경우는 波形面에서의 現象과 全般的으로 큰 差가 없고 矩形쪽에서 再附着點이 약간 下流에 存在하며 渦流의 三次元性이 波形面의 경우보다 강한 것으로 觀察되었다. 또 渦流가 壁面에 따라서 非定常的으로 放出되는것도 顯著하며 R10 P5의 경우는 리브와 리브사이에 2개의 渦流가 存在하는 것도 觀察할 수 있다. 矩形, 波形이 共に 첫번째의 谷間에서는 渦流가 보이지 않고 또한 거기에서는 돌기에 의한 흐름의 停滯現象을 觀察할 수 있는데 이 現象은 矩形쪽이 더 顯著하다. 이것이 Fig. 5에 보여진 停滯領域에서 熱傳達率의 減少를 가져오는 原因이라 생각된다.

Fig. 11은 R10 P5에서 $H/B=8$ 인 경우에 岐點으로부터 下流쪽으로의 距離 X/B 가 1, 2.5, 3인 位置에서 壁面近方에 와이어(wire)를 設置한 경우, smoke-wire 法에 의한 可視化의 例이다. $X/B=1, 3$ 은 두번째 및 네번째의 리브頂上, 2.5다 3번째, 4번째의 리브低面이다. $X/B=1$ 에서는 縱渦流가 岐類에서 觀察된것보다 약간 크며 3次元性도 강하고 또 보다 작은 스케일의 渦流를 同伴하고 있는 것을 알 수 있는데 縱渦流의 形狀이 그대로 維持되고 있음을 觀察할 수 있다. 이것은 Fig. 9, 10의 첫번째의 리브低面에서 剝離渦流

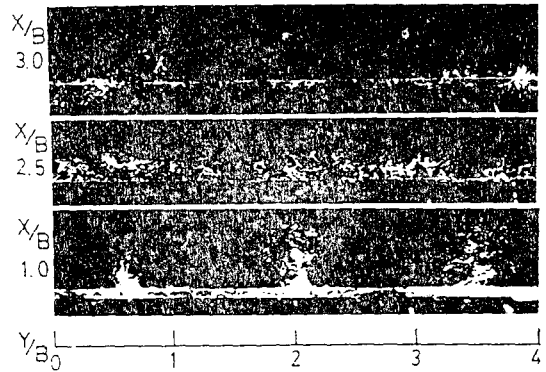


Fig. 11 Smoke-wire flow-visualization with various streamwise wire position (R10 P5, $H/B=8$)

를 볼 수 없었던 事實과 부합하고 있다. $X/B=2.5$ 인 경우의 寫眞에 있어서는 縱渦流側面을 볼 수 있다. $X/B=3$ 에서는 三次元性이 강하게 나타나고 顯著하게 흐트러진 渦動構造임을 確認할 수 있으며 剝離渦流와 縱渦流의 강한 干涉이 일어나는 것으로 觀察된다.

Fig. 12는 R5 P5, $H/B=5$ 에서 觀察된 典型的인 縱渦流의 伸張象을 可視化한 例이다. $H/B \geq 5$ 에서는 平面壁에 생기는 흐름을 方向으로 軸을 갖는 노즐幅오더(order)에 相當하는 스케일 亂流가 波形渦上에서도 마찬가지로 增幅되어 흐름방향으로 그것이 길게 存在함을 確認할 수 있다. Fig. 9, 11의 結果와 結付시켜 생각하면 停滯點 下流 2번째의 리브 以下에서는 돌기에 의한 縱渦流의 伸張과 剝離渦流와의 干涉이 생긴다. 흐름방향으로 縱渦流의 伸張은 R5 P5, R10 P5의 罫치 5인 경우에 顯著하게 나타나고 이 現象은 罫치 5의 熱傳達率分布가 下流域에서도 H/B 에 따라 영향을 적게 받는 것으로부터 確認할 수 있다.

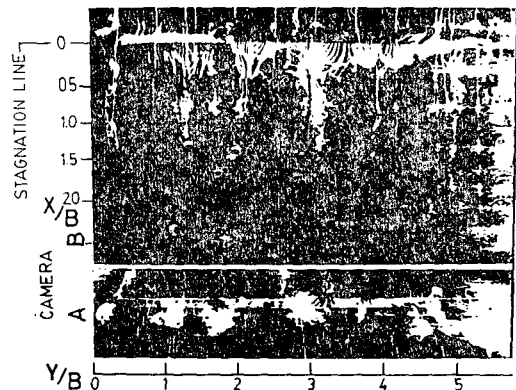


Fig. 12 Large-scale vortex-like structure in the 2-D jet impinging on the wavy wall (R5 P5, $H/B=5$)

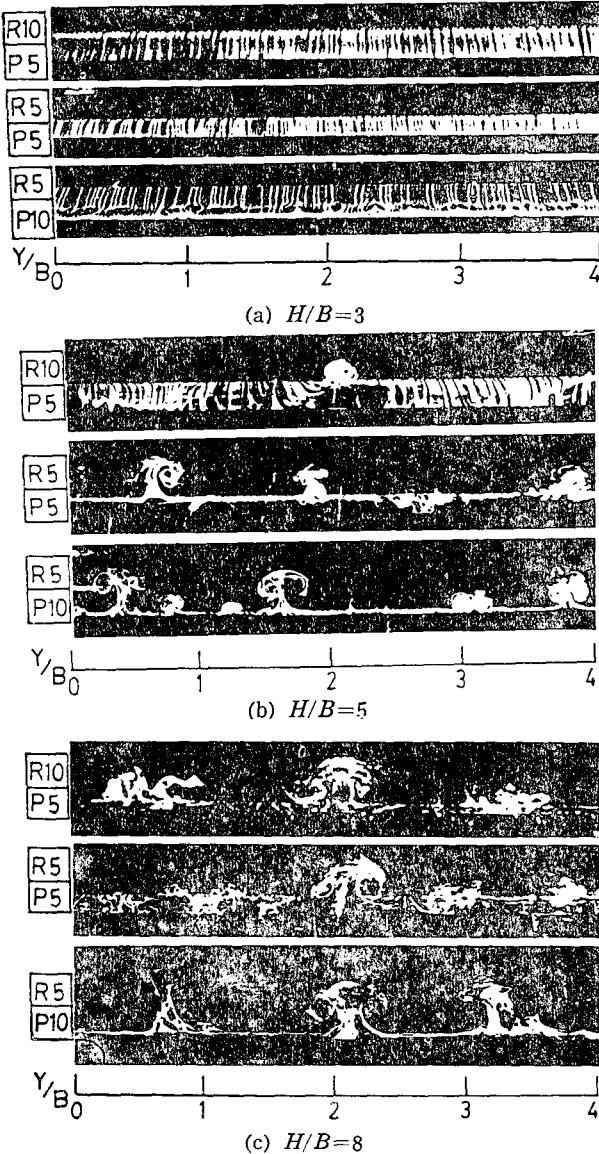


Fig. 13 Flow visualizations in the stagnation region on the wavy walls at various nozzle-to-wall distances

Fig. 13(a)는 $H/B=3$ 인 경우 각 waveform에 대한 停滯領域에서의 可視化 例이다. 모든 面上에서 縱渦流의 形成은 觀察할 수 없으며 H/B 의 條件이 縱渦流發生에 強하게 使用하는 條件이 된다는 것을 알았다.

Fig. 13(b), (c)는 $H/B=5, 8$ 에 있어서 3種類인 波形面上的의 停滯點에서의 可視化 例이다. 波形面上에서도 $H/B \geq 5$ 에서 縱渦流가 發生하고 前報⁽¹⁾의 平面, 矩形面의 경우와 마찬가지로 渦流의 構造는 $H/B=5$ 에 比較해서 $H/B=8$ 쪽이 스케일도 호트러짐도 強해지고

있다. 渦기의 높이에 대해서는 $R5$ 쪽이 $R10$ 보다 渦流發生數가 많으며 특히 $H/B=5$ 에서 顯著的한 差를 보여 준다. 渦기의 影響은 $P10$ 쪽이 $P5$ 보다 渦流가 크고 小스케일의 호트러짐이 적게 나타남을 明確하게 볼 수 있다. 以上の 可視化는 Fig. 4~8의 熱傳達率 測定에 의한 傳熱增進機構의 解析과 잘 一致하고 있다.

4. 結 論

(1) 傳熱增進效果는 $X/B=1 \sim 2$ 以上에서부터 나타나고 本實驗範圍에서 各 경우의 增進率에는 差가 거의 없으며 $H/B=3$ 인 경우 全積分平均値로 약 1.6 倍의 增進效果가 얻어졌다. 前報⁽¹⁾의 矩形面과 比較하면 傳熱增進率로서 큰 差는 없지만 面積擴大率은 矩形面이 우수하다.

(2) 表面浮遊法의 可視化에 의해서 剝離, 再附着 흐름의 特性은 渦기의 높이보다 渦기에 의해 강한 影響을 받는다는 것을 알았다.

(3) Smoke-Wire 法에 의해 停滯點에서의 亂流縱渦流構造는 衝突面 形狀에 關係없이 存在하는 것이 明確해졌다. 또 이들의 縱渦流는 $H/B=8$ 쪽이 $H/B=5$ 인 경우보다 스케일이 크고 또한 호트러짐이 강하다. 또 $R5$ 쪽이 $R10$ 보다 渦流發生數가 많고 $P10$ 쪽이 $P5$ 보다 渦流스케일이 크며 작은 스케일의 호트러짐이 적은 것을 觀察할 수 있었다. 이들 縱渦流의 下部에는 剝離에 隨伴되는 스핀方向의 渦流가 存在하고 서로 三次元的인 干涉을 일으켜 調和하고 있다.

參 考 文 獻

- (1) 車, 笠木, 平田; “矩形粗さを有する平板衝突するに二次元噴流の構造”, 流々の可視化, Vol. 3, No. 10, pp. 269~274, 1983
- (2) Kline, S.J. and McClintock; “Describing Uncertainties in Single Sample Experiments”, F.A., Mech. Engrg., Vol. 75, pp. 3~8, 1953
- (3) Gardon, R. and Akfirat, J.C.; “The Role of Turbulence in Determining the Heat-Transfer Characteristics of Impinging Jets”, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 8, pp. 1261~1272, 1965
- (4) 横堀, 笠木, 平田; “軸對稱衝突噴傳のよどみ域おける輸送機械にする研究”, 日本機械學會論文集, Vol. 49(B), No. 441, pp. 1029~1039, 1983
- (5) Berger, F.P. and Hau, K.F.L.; “Local Mass Heat Transfer Distribution on Surfaces Roughened with Small Square Ribs”, Int. J. Heat Mass, Transfer, Vol. 22, pp. 1645~1656, 1979
- (6) Buckles, J. Hanratty, T.J. and Adrian, R.J.; “Turbulent Flow over Large-Amplitude Wavy Surfaces”, J. Fluid Mech., Vol. 140, p. 27, 1984