

<論 文>

人工粗도가 二重同心圓管의 亂流 熱傳達에 미치는 影響에 관한 研究

姜 貞 錫* · 崔 英 惇**

(1985年 1月 31日 接受)

Study on the Effects of Artificial Roughness on the Turbulent Heat Transfer of Concentric Annular Pipes

Jeong Seok Kang and Young Don Choi

Key Words: Turbulence(난류), Artificial Roughness(인공조도), Heat Transfer(열전달), Spiral Roughness(나선형조도)

Abstract

Experimental results for the variation of flow characteristics and heat transfer coefficients in the entry region of annular pipes with artificial roughness are compared with the theoretical results by numerical analysis.

In the experiments, velocity profiles were measured with variation of pitch to height ratio for the ringed roughness of rectangular cross section and spiralled roughness of circular cross section at the hydrodynamic entry region. Local heat transfer coefficients of inner heated pipes with constant heat flux were measured at the thermal entry region.

Numerical predictions of ringed roughness agree well with the experimental results of the velocity profiles and Nusselts numbers. Nusselt numbers of annular pipes with roughness are much higher than those of smooth pipes. Moreover Nusselt numbers of annular pipes with spiralled roughness are higher than those with ringed roughness.

記 號 說 明

B : 速度分布의 粗度函數

C_p : 空氣의 定壓比熱

D_e : 二重同心管의 等價直徑

G : 溫度分布의 粗度函數

H : ($=h$)粗度의 높이

h_x : 局所熱傳達係數

h^+ : 無次元 人工粗度 높이 ($= \frac{u_\tau h}{\nu}$)

k : 空氣의 熱傳導係數

l : 混合距離

N_u : 누셀트수 ($= h_x \cdot D_e / k$)

$N_{u_{\infty}}$: 溫度分布가 完全確立된 곳에서의 누셀트수

P_r : 프란틀수

$P_{r,t}$: 亂流 프란틀수

\bar{p} : 氣體의 局所平均壓力

P : 人工粗度의 間隔

Q_w : 壁面의 熱流動率 ($= q_w$)

R_s : 二重同心管의 레이놀즈수 ($= \frac{U_m D_e}{\nu}$)

* 高麗大學校 大學院

** 正會員, 高麗大學校 工科大學 機械工學科

- r : 內管의 中心軸으로 부터의 距離
 l : 局所平均溫度
 t_w : 壁面의 溫度
 t_b : 空氣의 混合均溫度
 t_h : 管壁直上의 空氣溫度
 \bar{u} : 軸方向 局所平均速度
 \bar{u}' : 軸方向 無次元 局所平均速度 $\left(\frac{\bar{u}}{u_\tau}\right)$
 u_τ : 摩擦速度 $\left(= \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}\right)$
 u' : 軸方向 渦動速度
 u_m : 管의 平均速度
 \bar{v} : 半徑方向 局所平均速度
 v' : 半徑方向 渦動速度
 x : 軸方向 座標
 X_m : 管入口로 부터의 距離
 X_h : 加熱部 入口로 부터의 距離
 y : 內管外壁으로부터 半徑方向으로의 距離
 y^* : 無次元 距離 $\left(= \frac{u_\tau y}{\nu}\right)$

그리아스 文字

- κ : Von Karman 常數
 δy_c : 人工粗度에 의해서 添加되는 混合距離
 δt_0 : 人工粗度에 의한 壁面溫度 上昇
 μ : 粘性係數
 ν : 動粘性係數
 ρ : 氣體의 密度
 τ_w : 壁面의 剪斷應力

1. 緒 論

人工粗度가 있는 熱傳達面은 火力發電所의 熱交換器나 空冷式 原子爐의 燃料棒 또는 콘덴서 등에서 熱傳達을 促進시켜 熱交換器의 크기를 縮小시키고 運轉費用을 減小시키고 運轉費用을 減少시키며 燃料棒의 溫度를 低下시킬수 있어서 이에 대한 연구가 요구되어 왔다.

人工的인 粗度가 應用되는 곳의 流動은 대부분 亂流 流動이어서 亂流 流動에서 人工粗度가 熱傳達 特性에 미치는 影響에 관한 많은 연구가 推進되어 왔으며, 특히 實驗의 便宜상 二重同心圓管의 內管外壁部에 人工粗度を 附着시킨 形度의 管流動에 대한 熱傳達 特性을 實驗的方法 혹은 理論的方法으로 구하는 연구가 많이 되어 왔다. 그러나 過去의 研究들은 대부분 完全히 確立된 流動(fully developed flow)에 대한 研究이고 確立

되지 않은 流動에 대한 研究는 적은 편이어서 그 特性이 잘 알려져 있지 않다.

따라서 本 研究에서는 人工粗度가 있는 壁面 위의 確立되지 않은 亂流 流動과 熱傳達을 混合距離모형을 使用하여 數值解析하고 그 結果를 實驗結果와 比較하였다.

洪鎮官等⁽¹⁾은 역시 이와 같은 研究를 하였는데 그의 연구는 피치비가 10.8인 직사각형 人工粗度を 二重同心圓管의 內管 外壁에 부착하고 레이놀즈수를 변화시키며 유동특성과 열전달특성을 해석하고 測定한 연구이었다. 그러나 本 研究는 레이놀즈수를 一定하게 하고 人工粗度の 피치비를 變化시킬 때의 流動特性과 熱傳達特性을 解析하고 그 結果를 實驗結果와 比較한 것이다.

直四角形 斷面의 人工粗度を 부착시킨 二重同心圓管에서 流動이 管入口에서 加熱部前까지 進行하는 동안 速度分布의 變化를 數值解析하여 實驗結果와 比較하였으며, 速度分布가 完全確立되어 加熱部에 流入되면 內管壁에서 一定率의 熱을 가하며 確立되어 가는 溫度分布를 數值解析하고 熱傳達係數를 計算하여 역시 實驗結果와 比較하였다.

直四角形 斷面의 링形 人工粗度는 과거의 研究모형으로 많이 使用되어 왔으나 製作과 設置가 대단히 어려워 實用性이 적다. 따라서 本 研究에서는 製作과 設置가 보다 쉬운 圓形 斷面의 螺旋形 人工粗度を 製作하여 二重同心圓管의 內管에 부착하고 流動特性과 熱傳達特性을 測定하여 링形 人工粗度에서의 實驗結果와 比較하는 研究도 하였다.

人工粗度の 피치비 變化에 따른 流動과 熱傳達에 관한 本 解析結果는 實驗結果와 잘 一致하였고, 螺旋形 人工粗度を 부착시킨 경우의 實驗結果는 링形 人工粗度を 부착시킨 경우와 거의 비슷한 變化의 傾向을 보여 주었으나 같은 레이놀즈수와 피치비에서 熱傳達係數가 링形 人工粗度を 使用한 경우보다 약간 增加 되었다.

2. 理論解析

本 研究에서 實驗하고 解析한 人工粗度가 附着된 二重同心圓管에서의 流動과 熱傳達을 나타내는 概略圖는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1a는 直四角形 斷面의 링形 人工粗度가 부착된 管이고, Fig. 1b는 圓形 斷面의 螺旋形 人工粗度가 부착된 管을 나타낸다. 이 그림은 管의 入口에서 均一한 速度分布와 溫度分布의 空氣가 흘러 들어와 速度分布

가 完全確立된 후 二重同心圓管의 內管에서 一定率의 熱이 가해져서 溫度分布가 確立되어 가는 過程을 나타낸다. 本 解析에서는 管入口로부터 溫度分布가 完全確立되는 加熱部 出口까지 流動과 熱傳達을 解析하였다.

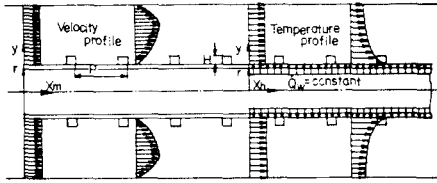


Fig. 1a Schematic diagram of fluid flow and heat transfer of annular pipes with ringed roughness of rectangular cross section

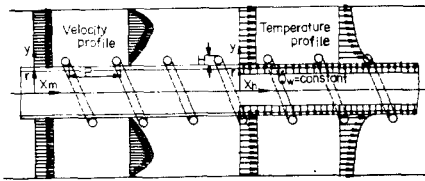


Fig. 1b Schematic diagram of fluid flow and heat transfer of annular pipes with spiralled roughness of circular cross section

2.1. 基本方程式

人工粗도가 있는 二重同心圓管의 確立되지 않은 流動區域에서 레이놀즈의 方法에 의해서 平均된 亂流流動의 連續方程式, 運動方程式, 에너지方程式은 다음과 같다.

連續方程式

$$\frac{\partial(r\rho\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(r\rho\bar{v})}{\partial r} = 0 \tag{1}$$

運動方程式

$$\rho\bar{u}\frac{\partial\bar{u}}{\partial x} + \rho\bar{v}\frac{\partial\bar{u}}{\partial r} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left\{r\left(\mu\frac{\partial\bar{u}}{\partial r} - \rho\bar{u}'v'\right)\right\} - \frac{d\bar{p}}{dx} \tag{2}$$

에너지方程式

$$\rho C_p \bar{u} \frac{\partial \bar{t}}{\partial x} + \rho C_p \bar{v} \frac{\partial \bar{t}}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \left(k \frac{\partial \bar{t}}{\partial r} - \rho C_p \bar{v}'t' \right) \right\} + \bar{u} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right)^2 - \rho \bar{u}'v' \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \tag{3}$$

이 基本方程式들을 洪鎮官⁽¹⁾의 研究에서와 같이 Von Mises 變換과 Patankar-Spalding 變換⁽²⁻⁴⁾을 하여 有限差分法으로 數值解析하였다.

2.2. 亂流모델

本 論文에서 使用한 亂流모델은 洪鎮官⁽¹⁾이 使用한 混合距離모델을 使用하였다. 이 모델의 特異한 點은 人工粗도가 부착된 壁面附近에서 一般的으로 使用되는 混合距離 κy 에 人工粗도에 의해서 發生한 混合距離 $\kappa \delta y_0$ 을 합하여 混合距離를

$$l = \kappa(y + \delta y_0) \tag{4}$$

로 하는 것이다. 洪鎮官⁽¹⁾은 이 式에서 δy_0 의 값으로 $\delta y_0 = h e^{-\kappa \delta}$

를 提案하였고 本 解析에서도 이 式을 使用하였다.

人工粗도가 附着된 壁面위의 熱傳達解析에서 또한 의 특별히 考慮해야 할 點은 人工粗도에 의해서 起因된 壁面 隣接部에서의 流體의 停滯現象으로 인하여 生기는 壁面 溫度上昇이다. 이 溫度上昇의 크기도 洪鎮官⁽¹⁾등이 提案한

$$\delta t_0 = \frac{(G - B P_{r,t}) q_w}{\rho C_p \mu_t} \tag{6}$$

을 使用하였다. 여기서 G 는 溫度分布에 關한 粗度函數로 h^+ 와 프란틀수(P_r)에 따라 變하는 函數이다.

本 四角斷面의 링형 人工粗도가 부착된 二重同心圓管의 解析에서는 B 函數로 Han, Clicksman 과 Rohsenow⁽¹⁰⁾가 推薦한 關係式

$$\frac{P}{H} \geq 10, h^+ \geq 35 \quad B = 0.97 \left(\frac{P}{H} \right)^{0.53} \tag{7}$$

$$\frac{P}{H} \leq 10, h^+ \geq 35 \quad B = 4.45 \left(\frac{P}{H} \right)^{-0.13} \tag{8}$$

을 使用하였고 G 函數는 Han 등⁽¹⁰⁾의 關係式을 本 實驗結果에 의해서 修正한^(1,11)

$$G = 5.0(h^+)^{0.2} P_r^{0.57} \tag{9}$$

을 使用하였다. Fig. 2는 四角斷面의 링형 人工粗도가 부착된 壁의 G 函數에 대한 本 實驗結果이다. 洪鎮官⁽¹⁾의 解析에서는 式 (9)와 Han 등⁽¹⁰⁾의 關係式

$$G = 4.5h^{+0.28} P_r^{0.57} \tag{10}$$

을 결정한

$$G = 6.02 h^{+0.2} P_r^{0.57} \tag{11}$$

을 使用하였으나 本 解析에서는 本 實驗에서 얻은 關係式을 그대로 使用하였다.

式 (7)~(11)의 B 函數와 G 函數에 나타나 있는 各係數들은 人工粗度の 斷面形狀, 人工粗도가 管壁에 附着된 形態(링형, 나선형 등)에 따라 變하는 값들이므로 다른 斷面形狀과 附着形態의 人工粗도에 대해서는 이 式들을 使用할 수 없다. 그러나 人工粗度の 附着形態가 링형이면 斷面形狀이 四角形이 아니라도 斷面

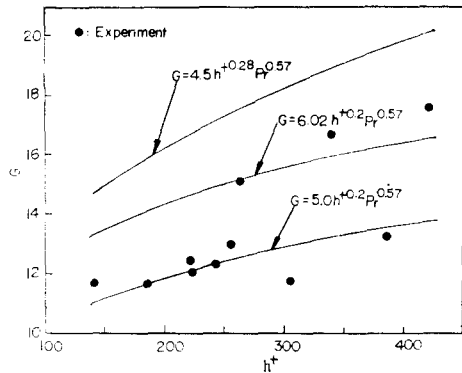


Fig. 2 Gfunction for wall with rectangular roughness vs. h^+

을 等價四斷面으로 變換시키면⁽¹²⁾ 위의 式들을 使用할 수 있다.

人工粗度가 附着된 壁面위의 流動의 熱傳達解析에서 G 函數의 크기는 熱傳達係數의 크기에 큰 影響을 미친다. 따라서 精確한 熱傳達係數의 豫測을 爲해서는 精確한 G 函數의 設定이 가장 重要한 問題의 하나이다. Fig. 2에 의하면 G 函數에 대한 Han 등의 實驗式과 本 研究에서의 實驗結果가 큰 差異가 있음을 알 수 있다.

Han 등은 G 函數를 式 (10)과 같이 단순히 h^+ 와 Pr 만의 函數로 나타내었다. 그러나 Dalle Donne and Meyer⁽⁹⁾에 의하면 G 函數는 h^+ 와 Pr 뿐만 아니라 二重同心圓管의 內外徑比, 流體의 平均溫度 등에 따라서

도 變한다고 하였다. 따라서 實驗條件이 變하면 式 (10)의 係數들은 變할 수 있다고 생각된다. Han 등의 實驗은 二壁이 平行한 四角채널에서 행하였는데 반하여 本 實驗은 二重同心圓管에서 행하였기 때문에 Fig. 2에서와 같이 G 函數에 큰 차이가 난 것으로 생각된다.

最近 이병곤⁽¹⁴⁾은 $k-\epsilon$ 2方程式 모델을 使用하여 再循環流動이 있는 二重同心圓管의 熱傳達을 解析하여 G 函數를 理論적으로 구하였는데 그의 解析結果에 의하면 피치비가 대략 7以下에서는 G 函數의 計算値가 Han 등의 關係式 (10)보다 컸으며, 7以上에서는 약간 작게 나타났다. 그러나 그의 熱傳達解析에서는 亂流 프란틀수를 너무 크게 잡아준 관계로 完全確立된 곳에서의 熱傳達係數가 實驗값보다 약 20% 낮게 豫測되었는데, 만약 그가 난류 프란틀수의 設定을 더 精確히 하여 熱傳達係數의 計算値가 實驗값에 一致되도록 하였더라면 그가 豫測한 G 函數는 위에서 論한 式 (13)에 의해서 더 멀어지게 되어 Fig. 2의 本 實驗値들의 범위에 들어갈 것으로 생각된다. 이와 같은 事實은 本 解析에서 使用한 G 函數의 關係式 (9)의 타당성을 간접적으로 나타내주었다.

3. 實 驗

本 解析에서 使用한 亂流모델과 數值解析方法의 適合性を 檢討하기 爲해서 人工粗度가 附着된 二重同心圓管流動의 流動特性과 熱傳達特性을 測定하는 實驗을

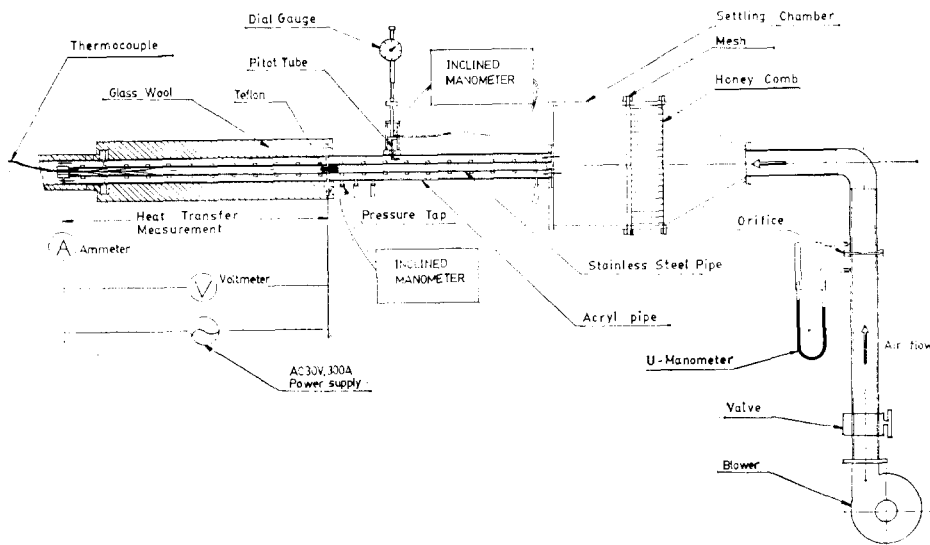


Fig. 3 Experimental apparatus

하였다.

3.1. 實驗裝置와 實驗方法

Fig. 3은 實驗裝置의 概略圖이다. 送風機에서 加壓된 空氣는 流量測定用 오리피스와 整流箱子(settling chamber)를 거쳐서 二重同心圓管으로 流入되어 前半部에서 速度分布가 完全確立된 후 加熱部인 後半部로 流入된다. 二重同心圓管의 前半部에서는 速度分布와 壓力의 變化를 測定하였고, 後半部에서는 管壁溫度分布를 測定하였으며 加熱部 出口에서는 空氣의 速度分布와 溫度分布를 測定하여 그 結果를 利用하여 內管壁의 熱傳達係數를 計算하였다. 二重同心圓管의 前半部의 長이는 2430 mm 이었고 後半部의 長이는 2495 mm 이었다.

空氣의 流量測定은 ASME가 推薦한 $D-\frac{1}{2}D$ tap形式 오리피스와 U字形 마노미터로 한다. 二重同心圓管의 內管은 外徑이 31.8 mm 內徑이 30.4 mm 인 스테인레스鋼管으로 製作하였으며 厚이 2.5 mm, 폭 2 mm의 링形態의 人工粗度와 直徑 2.5 mm의 圓形 斷面을 갖는 螺旋形 人工粗度を 內管에 附着하였다.

二重同心圓管의 後半部는 加熱部로서 外管은 內徑이 81.2 mm 인 軟鋼管으로 製作하였고 內管에서 發生하는 熱이 밖으로 流出되는 것을 防止하기 위해서 外管의 外壁을 石棉, 폴리스티렌폼, 글라스울로 斷熱하였다.

後半部의 內管에서 一定率의 熱을 空氣流動에 供給하기 위해서 內管에 약 200 A의 電流를 直接 흘려 보내어 5,100 Watt/m²의 熱을 發生시켰다.

內管壁面溫度의 測定은 36番 Chromel-Alumel 熱傳對를 管壁에 예폭시로 接着시켜서 精度 0.1°C의 data logger로 測定하였다.

3.2. 實驗內容

流動의 速度分布 測定과 管壁溫度, 流動溫度의 測定은 레이놀즈수가 30,000, 39,000 인 경우에 대해서 행하였으며 링形人工粗度を 부착한 경우에는 P/H를 5, 10, 8, 15, 20으로 變化시키며 실험하였고, 나선형 人工粗度を 부착한 경우에는 P/H를 5, 10, 8, 15인 경우에 대해서 실험하였다.

4. 解析結果와 實驗結果 및 考察

4.1. 速度分布

Fig. 4는 링形 人工粗度を 부착한 管에서 레이놀즈수가 30,000이고 人工粗度の 厚이에 대한 피치의 比 ($\frac{P}{H}$)가 15일 때 管入口로부터의 距離에 따른 速度分布의 變化를 測定한 結果와 解析結果를 比較한 것이다. 實驗結果와 解析結果는 管入口에서 가장 가까운

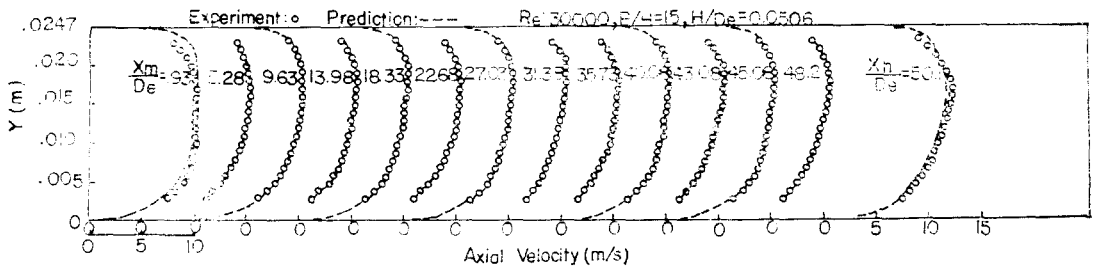


Fig. 4 Variation of velocity profiles in hydrodynamic entry region of annular pipe with ringed roughness

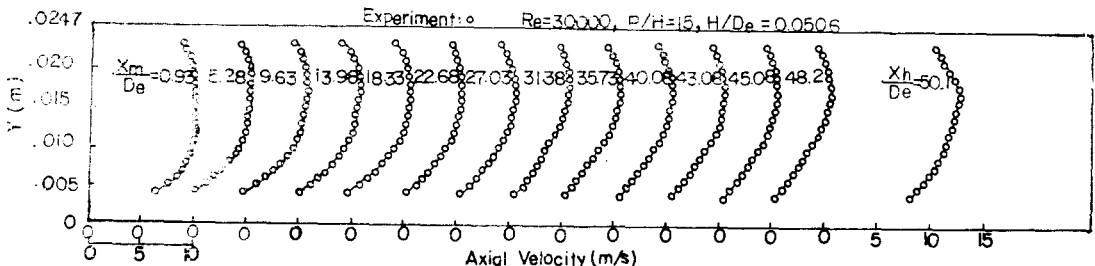


Fig. 5 Variation of velocity profiles in hydrodynamic entry region of annular pipe with spiralled roughness

$\frac{X_n}{D_c} = 0.93$ 을 除外하고는 매우 잘 一致함을 알 수 있다.

Fig. 5 는 螺旋形 人工粗度를 부착한 管에서 레이놀즈수가 30,000 이고 $\frac{P}{H} = 15$ 일 때 管入口로부터의 거리에 따른 速分布의 變化를 測定한 結果이다. 速度分布의 變化 傾向은 Fig. 4 와 비슷하나 Fig. 4 에 비하여 內管쪽의 速度는 더 減少되었고 外管쪽의 速度는 약간 增加되었음을 알 수 있다. 이와 같은 現象의 原因으로 생각될 수 있는 것의 하나는 螺旋形 人工粗度が 링形 人工粗度보다 流動에 더 큰 抵抗을 주어서 內管쪽의 速度가 더 많이 減少되었다고 생각할 수 있고 또 하나는 螺旋形 人工粗도에 의해 發生한 回轉流動이 半徑方向으로 遠心力을 發生시키고 이 遠心力에 의해 空氣가 半徑方向으로 移動된데 기인하였다고 생각할 수 있다. 이 論文에는 수록되어 있지 않지만 本 研究에서의 實驗結果⁽¹¹⁾에 의하면 같은 레이놀즈수와 피치비에서 螺旋形 人工粗度を 부착한 管에서의 壓力勾配의 절댓치가 링形 人工粗度を 부착한 管에서의 壓力勾配의 절댓치보다 약간 낮았다. 이것은 링形 人工粗도가 流動에 더 큰 抵抗을 주었다는 것을 나타내준다. 따라서 Fig. 5 에서 螺旋形 人工粗度を 부착한 경우 外管쪽의 流速이 增加한 것은 回轉運動에 의한 遠心力에 起因되었다고 解析된다.

Fig. 4, Fig. 5 의 右便에 $\frac{X_h}{D_c} = 50.1$ 은 加熱部 出口의 位置이다. 이곳의 速度는 前半部の 速度보다 增加된 것을 알 수 있다. 이것은 流動이 熱을 받아 溫度가

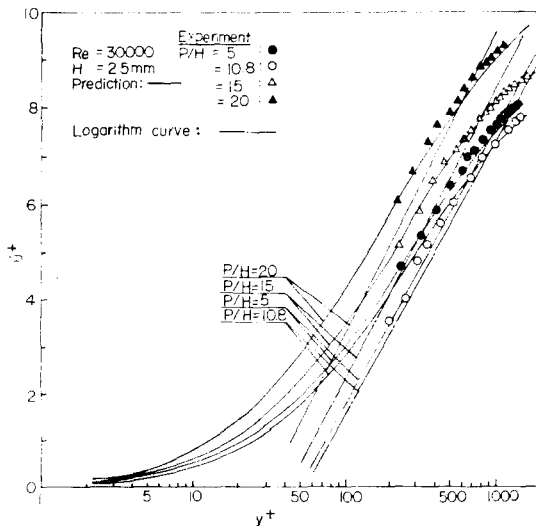


Fig. 6 Dimensionless velocity with respect to P/H for ringed roughness

上昇되어 密度가 낮아졌기 때문이다.

Fig. 6 은 速度分布가 完全히 確立된 곳에서의 無次元速度 (\bar{u}^+)를 無次元距離 (y^+)의 函數로 나타낸 것이다. \bar{u}^+ 와 y^+ 를 구하기 위해서 필요한 摩擦速度 u_* 는 本 數值解析에서 얻어진 값을 使用하였다.

一點鎖線은 人工粗도가 있는 流動에서 一般的으로 速度分布로 使用되고 있는 對數式이다. 피치비에 따른 變化의 傾向은 實驗値와 一致하나 그 形狀이 다르다. 따라서 人工粗도가 있는 二重同心圓管의 流動에서 速度分布를 正確히 구하려면 對數式을 使用해서는 안되고 本 解析과 같은 數值解析 方法을 使用하여야 한다.

4.2. 加熱部 出口의 空氣溫度 分析

Fig. 7 은 링형 人工粗度を 부착한 二重同心圓管에서 流動이 $Re = 30,000$ 으로 흐를 때 人工粗度の 피치비를 變化시키며 加熱部의 出口에서 測定한 空氣의 溫度分布와 本 解析結果를 比較한 것이다. 解析結果는 實驗結果와 잘 一致함을 알 수 있다.

이 그림에서 特異한 점은 管內部에서는 空氣溫度가 線形的으로 變하다가 人工粗度 上端 下部에서부터 溫度勾配가 커지기 시작하여 內管壁 隣接部에서 갑자기 커지는 것이다. 이것은 人工粗도에 의해서 內管壁 隣接部에 停滯된 空氣層이 發生하여 熱傳達抵抗을 크게 하였기 때문에 생긴 것으로 생각된다.

피치비에 따른 溫度分布의 測定結果 중에서 $\frac{P}{H} = 10.8$ 일 때의 溫度分布는 外管쪽에서는 가장 높고 內管쪽에서는 가장 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 本 實驗에서 使用한 피치비 중 $\frac{P}{H}$ 가 10.8일 때 管內部에서 熱

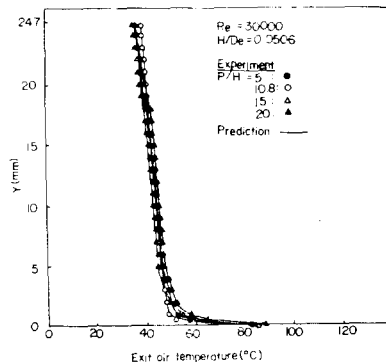


Fig. 7 Measured exit air temperature with respect to radial distance from inner wall for $R_s = 30,000$ (ringed roughness)

傳達이 가장 잘 되는 것을 意味한다. 그 原因은 $\frac{P}{H}$ 가 10 부근에서 單位 管長이當의 人工粗度에 의한 亂流에 에너지生成率이 가장 크기 爲므로 생각된다.

洪鎮官⁽¹³⁾에 의하면 $\frac{P}{H}$ 가 10以下로 되면 人工粗度 사이의 간섭효과에 의해서 停滯된 流體層이 增加하게 되며 $\frac{P}{H}$ 가 5以下로 되면 人工粗度 사이에 完全히 獨立된 再循環流動이 發生한다고 하였다.

이와 같은 現象이 $\frac{P}{H}$ 가 10.8以下일 때 亂流에 에너지生成率을 減少시켜 熱傳達을 低下시킨 것으로 생각된다. 그리고 $\frac{P}{H}$ 가 10.8보다 큰 $\frac{P}{H}=15, 20$ 인 경우에는 人工粗度 사이의 간섭효과는 없어져서 1個의 人工粗度當 亂流에 에너지生成率은 最大로 되나 單位 管長이當 人工粗度の 數가 減少되어 亂流에 에너지生成率이 $\frac{P}{H}=10.8$ 일 때보다 減少되고 그에 따라 熱傳達이 減少된 것으로 생각된다.

Fig. 8은 螺旋形 人工粗度を 부착한 管의 加熱部 出口에서 測定한 空氣溫度分布이다. 피치비에 따른 溫度分布의 變化傾向은 Fig. 7의 링形 人工粗度を 부착한 경우와 비슷하나 壁面溫度가 약간 낮아졌음을 알 수 있다. 이것은 螺旋形 人工粗도가 링形 人工粗度보다 熱傳達促進을 더 크게 시켰다는 ことを 나타낸다.

앞에서 說明한 바와 같이 本 研究에서의 實驗結果에 의하면 같은 레이놀즈수와 피치비에서 링形 人工粗도가 螺旋形 人工粗度보다 流動에 더 큰 抵抗을 주었기 때문에 亂流에 에너지의 生成도 더 크게 시켰다고 豫測 된다.

이 現象은 Fig. 7과 Fig. 8에서 人工粗度 위의 管內部 溫度分布을 比較해보면 확인될 수 있다. 두 그림을 比較해 보면 人工粗度 위에서는 링形 人工粗度を 부착한 管流動에서의 溫度勾配가 螺旋形 人工粗度を 부착한 管에서 보다 작은데 人工粗度 아래에서는 더 큼을 알 수 있다. 이것은 人工粗度 위의 流動에서는 링形 人工粗度を 부착한 管이 熱傳達이 더 잘 되고 人工粗度 밑에서는 螺旋形 人工粗度を 부착한 管이 熱傳達이 더 잘된다는 ことを 뜻한다. 그 原因은 링形 人工粗度は 螺旋形 人工粗度보다 亂流에 에너지를 더 많이 生成시켜 人工粗度 위의 亂流熱擴散을 더 크게 促進시켰으며 螺旋形 人工粗度は 링形 人工粗度보다 人工粗度 사이에 停滯流體層을 작게 形成시켜 이 부분의 熱傳達을 더 크게 하였다고 解析될 수 있다. 그러나 이 두가지 效果를 複合하면 螺旋形 人工粗도에 의한 熱傳達促進이 약간 큰 ことを 알 수 있다.

4.3. 管壁溫度와 空氣의 混合平均溫度

管壁의 熱傳達係數를 計算하기 위해서는 空氣의 混合平均溫도와 管壁溫도를 알아야 한다. 管壁에서 一定率의 熱이 加해질 때 流動方向에 따른 空氣의 混合平均溫도는 直線的으로 增加하므로 加熱部入口와 出口의 混合平均溫도를 測定하여 直線으로 이으면 그 中間區域의 混合平均溫도를 구할 수 있다.

Fig. 9는 링形 人工粗度を 부착한 管에서 레이놀즈수를 30,000으로 一定하게 하고 피치비를 變化시키며 測定한 管壁溫도와 空氣의 混合平均溫도를 解析結果와 比較한 것이다. 解析結果는 實驗結果와 比較의 잘 一致함을 알 수 있다.

管壁에서 一定率의 熱이 供給되고 레이놀즈수가 一定하므로 混合平均溫도는 피치비에 무관하게 一定하였으나 管壁溫도는 피치비에 따라 變하는 ことを 알 수 있다. 이것은 피치비 變化에 따라 流動의 熱傳達率이 달라지기 때문이다. 이 그림에서 $\frac{P}{H}=10.8$ 일 때 管壁溫度가 가장 낮은데 이것은 $\frac{P}{H}=10.8$ 일 때 管壁의 熱傳達係數가 가장 크다는 ことを 나타내 준다.

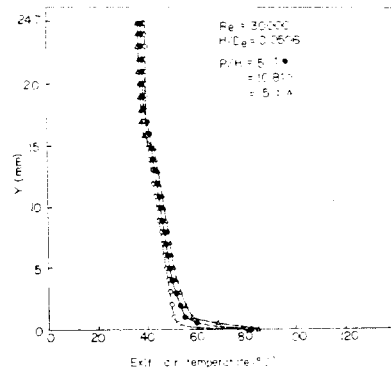


Fig. 8 Measured exit air temperature with respect to radial distance from inner wall for $Re=30,000$ (spiralled roughness)

Fig. 10은 Fig. 9의 溫度測定結果로부터 計算한 누셀트수를 圖示한 것이다. 入口에 매우 가까운 부분을 제외하면 解析結果는 實驗結果에 잘 一致함을 알 수 있다.

Fig. 11은 螺旋形 人工粗度を 부착한 管에서 測定한 누셀트수이다. 피치비의 變化에 따른 누셀트수의 變化의 傾向은 Fig. 10과 같으나 같은 피치비에서 누셀트수의 크기가 Fig. 10보다 약간씩 상승하였다.

Fig. 10과 Fig. 11에 의하면 本 實驗과 解析에 사용된 人工粗도가 있는 二重同心圓管에서의 溫度入口區間

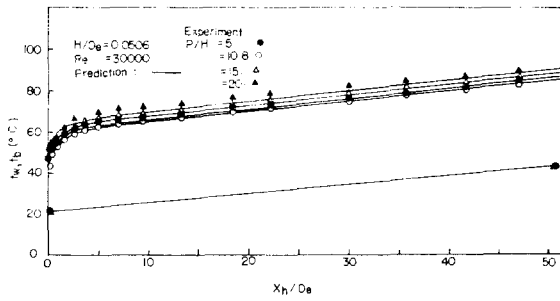


Fig. 9 Measured and predicted inner wall temperature and bulk mean temperature of air flow for $R_s=30,000$ (ringed roughness)

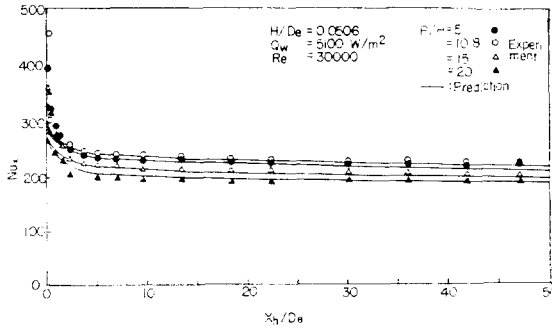


Fig. 10 Measured and predicted Nusselt numbers with respect to P/H for $R_s=30,000$ (ringed roughness)

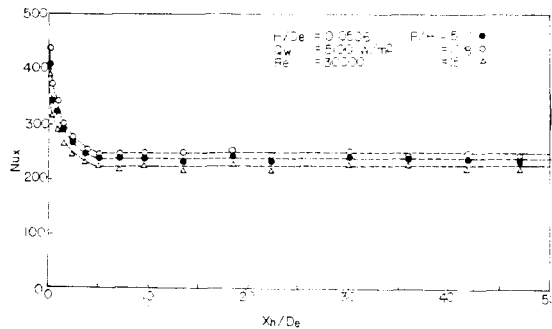


Fig. 11 Measured and predicted Nusselt numbers with respect to P/H for $R_s=30,000$ (spiralized roughness)

(thermal entry length)은 $6\sim 8D_e$ 로 생각된다. 엄밀한 의미에서 온도입구區間은 온도分布의 形態가 변화하는 區間이고, 完全確立區間은 온도分布의 形態가 변화하지 않는 區間이다.

따라서 온도分布가 完全確立된 區間에서는 管壁溫度는 空氣의 混合平均溫度와 平行하게 上昇해야 하고 누

셀트수는 一定해야 한다. 그러나 有限한 크기의 熱이 공급되는 管에서의 熱傳達實驗과 數值解析에서는 이와 같은 狀態를 얻기 어렵다. 왜냐하면 速度分布가 完全確立되어 流動이 加熱部로 流入된 후 管壁에서 一定率의 熱이 공급되면 空氣의 溫度가 上昇되어 流動의 平均速度와 粘性係數가 連續적으로 增加되어 結果적으로 레이놀즈수가 減少하기 때문이다.

本 數值解析結果에 의하면 $\frac{X_h}{D_e}$ 가 8 이상에서 레이놀즈수가 一定勾配로 降下하였는데 이 現象이 Fig. 10, Fig. 11에서 $\frac{X_h}{D_e}$ 가 8 이상일 때 누셀트수가 一定勾配로 降下하게 된 原因이 된 것으로 생각된다. 그러나 이 누셀트수의 降下勾配는 管壁의 熱供給率(Q_w)을 減少시키면 減少되며 極限에는 0이 될 수 있다. 따라서 有限한 크기의 熱을 供給하는 實際 熱傳達實驗의 結果로부터 溫度入口區間을 定할 때에는 管入口로부터 누셀트수가 一定하게 되는 곳까지의 區間으로 하지 말고 누셀트수가 一定勾配로 減少하기 시작하는 곳까지의 區間으로 하는 것이 더 타당하다고 생각된다. 앞에서 溫度入口間이 $6\sim 8D_e$ 라고 한 것은 이러한 觀點에서 定한 값이다.

Fig. 12와 Fig. 13은 流動이 熱적으로 完全確立된 $\frac{X_h}{D_e}=48.2$ 에서 測定한 누셀트수를 피치비를 變數로 하여 圖示한 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 것은 $\frac{P}{H}=10.8$ 에서 누셀트수가 가장 크다는 것과 實驗한 모든 피치비에서 螺旋形 人工粗度를 부착한 管의 누셀트수가 링形 人工粗度를 부착한 管의 누셀트수보다 크다는 것이다. 그리고 레이놀즈수가 39,000으로 增加될 경우 두 누셀트수의 차이가 커짐을 알 수 있다. 이것은 레이놀즈수가 커지면 링形 人工粗度를 부착한 管에서는 停滯流體層에 의한 熱傳達 混害效果가 더 커지는데 반하여 螺旋形 人工粗度를 부착한 管에서는 回轉運動이 빨라져 熱傳達促進이 더 크게되기 때문으로 생각된다.

本 解析結果와 實驗結果를 比較할 때 업무에 두어야 할 점의 하나는 流動의 速度分布와 溫度分布, 그리고 加熱部 入口로부터 流動이 進行함에 따른 누셀트수의 變化形態는 주로 解析에 使用된 亂流모델과 B函數의 크기에 影響을 받으며 누셀트수의 絕對의 크기 자체는 G函數의 크기에 影響을 더 크게 받는다는 것이다. 따라서 本 解析結果에서 流動의 速度分布와 溫度分布 그리고 누셀트수의 變化形態가 實驗結果와 比較的 잘 一致하는 것은 本 解析에 使用된 亂流모델과 B函數의 適合性を 나타내주며 누셀트수의 絕對의 크기가 잘 一致하는 것은 本 解析에서 使用된 G函數의 適合성을 나

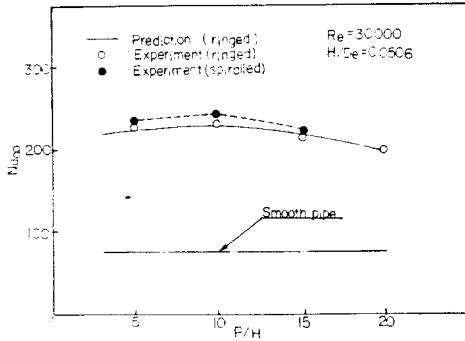


Fig. 12 Variation of Nusselt numbers with respect to P/H at thermally fully developed region

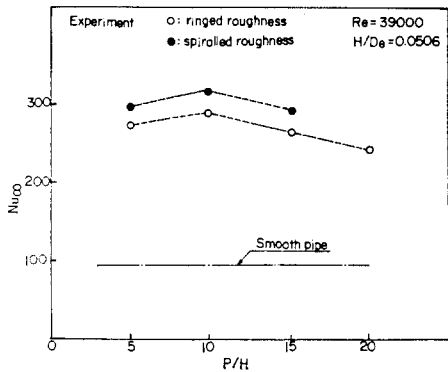


Fig. 13 Variation of Nusselt number with respect to P/H at thermally fully developed region

타내준다. 그러나 만약 G 函數가 本 解析에서 使用한 값보다 더 커지면 Fig. 10의 누셀트수의 豫測曲線은 平行으로 下降하게 되고 G 函數가 적어지면 누셀트수의 豫測曲線은 平行으로 위로 上昇하게 될 것이다. 그러면 G 函數의 變化에 따라서 누셀트수가 어느 정도 變할 것인가 하는 것이 問題가 되는데 이것은 流動條件에 따라서 變하여 一率의로 말할 수 없으나 다음의 式에 의하면 大體의로 그 크기를 추정할 수 있다.

$$\text{누셀트수} \propto \frac{1}{(t_h - t_b) + \delta t_0} \quad (12)$$

여기서 t_h 는 管壁 直上의 空氣溫度이고 δt_0 는 管壁溫度 上昇이다. 式 (12)에 式 (6)을 代入하면

$$\text{누셀트수} \propto \frac{1}{\underbrace{(t_h - t_b)}_{(a)} + \underbrace{\frac{(G - BP_{rr})q_w}{\rho C_p u_r}}_{(b)}} \quad (13)$$

이 된다. 本 解析에 의하면 式 (13)에서 (a)項과 (b)項은 같은 정도의 크기를 갖음을 알 수 있었고, 一般的으로 實驗에 많이 使用되고 있는 人工粗도가 부착된 壁

面 위의 流動에서 G 函數는 10~20의 값을 갖으며 BP_{rr} 는 2~4의 값을 갖는 것을 考慮하면 式 (13)에서 G 函數의 變化에 따른 누셀트수의 變化程度를 추정할 수 있다.

以上에서 本 實驗結果와 解析結果를 比較한 바에 의하면 本 解析에서 使用한 混合距離모델은 대체적으로 平均的인 流動特性과 熱傳達 特性을 잘 豫測해 주었다. 그러나 本 解析方法의 問題點의 하나는 實驗에서 測定된 粗度函數를 使用하여야 된다는 것이다. 그리고 B 函數는 正確한 測定이 과히 어렵지 않으며 주로 人工粗度の 斷面形狀과 피치비에 따라서 變하여 다른 實驗條件에 影響을 적게 받으나 G 函數는 正確한 測定이 어려울 뿐 아니라 人工粗度の 斷面形狀과 피치비 이외의 다른 實驗條件에 影響을 크게 받는다는 것은 또한 하나의 문제점이다. 그러나 만약 流動이 流體力學的으로 혹은 熱的으로 完全確立된 곳에서 再循環流動을 포함한 한 피치 사이의 流動과 熱傳達을 理論的으로 解析하여 얻어진 粗度函數를 本 解析에 使用한다면 人工粗도가 있는 確立되지 않은 管流動을 完全히 理論的으로 解析할 수 있다.

앞에서 論한 바와 같이 最近 이병곤⁽¹⁴⁾은 四角斷面의 링形 人工粗도가 있는 二重同心圓管의 再循環流動을 $k-\epsilon$ 2 方程式 모델로 解析하여 理論的으로 B 函數와 G 函數를 구하였는데 實驗的으로 얻어진 粗度函數와 比較의 잘 一致하였다. 따라서 이병곤의 解析方法과 本 解析方法을 조합하면 本 解析方法의 一般性이 더 커지게 된다.

本 研究의 結果로 밝혀진 또 하나의 重要한 事實은 螺旋形 人工粗度は 製作와 設置가 링形 人工粗度보다 편리할 뿐 아니라 熱傳達 促進도 더 크고 流動抵抗도 적어서 實用性이 매우 큰 人工粗度라는 것이다. 그러나 本 實驗에서 使用된 圓形斷面의 人工粗도가 最適의 斷面形態라고는 할 수 없고 이보다 流動特性과 熱傳達 特性을 더 改善시키는 斷面의 形狀이 存在하리라고 생각된다. 이에 대해서는 앞으로 더 研究가 要求된다.

5. 結 論

人工粗도가 있는 二重同心圓管에서 流動特性과 亂流 熱傳達 特性을 數值解析하고 實驗結果와 比較해본 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 링形 人工粗度나 螺旋形 人工粗도가 부착된 二重同心圓管은 共通的으로 人工粗度の 높이에 대한 피치비가 10 부근에서 熱傳達이 가장 잘 된다.

(2) 螺旋形 人工粗度を 부착한 管은 링形 人工粗度を 부착한 管보다 熱傳達係數는 크고 摩擦抵抗은 작아서 熱傳達特性和 摩擦特性이 더 좋다.

(3) 링形 人工粗度는 管의 中心部流動域에서 螺旋形 人工粗度보다 熱傳達을 크게 促進시키나 人工粗度들 사이에 停滯流體層을 크게 發生시켜 熱傳達 抵抗을 크게 한다.

(4) 螺旋形 人工粗度는 링形 人工粗度보다 製作과 設置가 쉬울 뿐아니라 流動特性和 熱傳達 特性이 우수하여 實用性이 크다.

後 記

本 研究는 1983 年度 韓國科學財團의 研究費 支援으로 遂行된 것이며, 이에 대해 深甚한 感謝의 뜻을 표합니다.

參 考 文 獻

- (1) 洪鎮官, 李起萬, 崔英惇, “人工粗도가 있는 二重同心圓管의 亂流熱傳達解析”, 大韓機械學會論文集, 第7卷 第3號, pp. 301~312, 1983
- (2) S.V. Patankar and D.B. Spalding, “*Heat and Mass Transfer in Boundary Layers*”, Inter text books, 2nd, 1970
- (3) M.E. Crawford and W.M. Kays, Report HMT-23, Stanford University, 1975
- (4) D.B. Spalding, “*A General Computer Program for Two Dimensional Parabolic Phenomena*”, Pergamon Press, 1977
- (5) J. Rotta, Ingr. Arch., Vol. 18, p. 277, 1960
- (6) W.M. Kays and M.E. Crawford, “*Convective Heat and Mass Transfer*”, McGraw-Hill, pp. 161~232, 1980
- (7) D.F. Dipprey and R.H. Saversky, “Heat and Momentum Transfer in Smooth and Rough Tubes at Various Prandtl Numbers”, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 6, pp. 329~352, 1962
- (8) K. Maubach, “Rough Annulus Pressure Drop Interpretation of Experiments and Recalculation for Square Ribs.”, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 15, pp. 2489~2498, 1972
- (9) M. Dalle Donne and L. Meyer, “Turbulent Convective Heat Transfer from Rough Surface with Two Dimensional Rectangular Ribs.”, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 20, pp. 583~620, 1976
- (10) J.C. Han, L.R. Clicksman and W.M. Rohsenow, “An Investigation of Heat Transfer and Friction for Rib Rough ened Surface”, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 21, pp. 1143~1156, 1978
- (11) 姜貞錫, “人工粗도가 二重同心圓管內의 亂流熱傳達에 미치는 影響에 관한 實驗”, 高麗大學校 大學院 碩士學位論文, 1983
- (12) M.J. Lewis, Optimising the Thermohydraulic Performance of Rough Surfaces, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, pp. 1243~1248, 1975
- (13) 洪鎮官, “人工粗도가 있는 二重同心圓管內에서 의 亂流熱傳達 解析”, 高麗大學校 大學院 碩士學位 論文, 1981
- (14) 李炳坤, “人工粗도를 갖는 二重同心圓管의 亂流再循環流動과 熱傳達 解析”, 高麗大學校 大學院 博士學位 論文, 1985