

<論 文> / 2

Ribbed 管의 管傾斜角의 热傳達에 미치는 影響

朴 成 燦* · 金 鍾 輔**

(1986년 9월 20일 접수)

The Effect of Inclined Ribbed Tubes on Heat Transfer and Friction Loss

Sung Chan Park and Chong Bo Kim

Key Words: Ribbed Tube(ribbed 管), Smoothed Tube(平滑管), Helix Angle(螺旋角), Free Convection(自然對流), Forced Convection(強制對流)

Abstract

Artificial roughness as a means of improving heat transfer gains more interest, especially for application to various heat exchanger. This study presents experimental information for single-phase free and forced convection heat transfer in a circular tube containing a internal spiral ribs.

To examine the effect of inclined angle of tube, it was varied from 0 deg to 90 deg(0° , 22.5° , 45° , 90°) with horizontal. Length of tube is 1.6m, and width, height and helix angle of rib are 4.2mm, 1.5mm, and 60 deg respectively. Water was used as a working fluid and test piece was heated with a constant heat flux by electric heater. Experiments have been performed with the range of modified Grashof number from 2×10^6 to 15×10^6 for free convection and with the range of Reynolds number from 3,000 to 40,000 for forced convection.

Since the increase in heat transfer coefficients influence directly to the friction coefficient of the tube, the changes of the friction factors are also presented for several different cases considered in this investigation.

記 號 設 明

A : 管斷面積(m^2)

h : 對流熱傳達係數($W/m^2\text{C}$)

A_h : 热傳達面積(m^2)

k : 热傳達係數($W/m^2\text{C}$)

D_h : 等價直徑(m)

L : 管길이 (m)

f : 摩擦係數

m : 流量(kg/s)

H : Rib 높이 (m)

n : Rib 數

P : 接水길이 (m)

* 인하대학교 대학원

q : 热傳達量(W)

** 정회원, 인하대학교 공과대학 기계공학과

T_b : 混合平均 물 溫度($^\circ C$)

T_i : 물 입구溫度($^{\circ}\text{C}$)

T_o : 물 出口溫度($^{\circ}\text{C}$)

T_w : 管壁溫度($^{\circ}\text{C}$)

w : Rib 幅(m)

α : 螺旋角(Deg.)

η : 效率指數

θ : 管 傾斜角(Deg.)

1. 緒論

強制流動系의 전열판의 열전달효과를 向上시키기 위한 연구에서 S.V. Patankar⁽¹⁾는 二重同心圓管에 직선형 fin 을 설치하여 热傳達係數와 摩擦係數에 대하여 수치해석 방법으로 다루었으며 人工粗度에 의한 열전달촉진 및 壓力損失에 관한 연구에서는 R.L. Webb⁽²⁾가 作動流體의 流動方向과 직각이 되게 rib를 가공한 전열판을 사용하였고 K. Manbach⁽³⁾는 二重同心圓管內에서의 壓力降下와 열전달특성을, J.C. Han⁽⁴⁾은 平行板에 성형된 단면이 직사각형 rib 및 그밖의 형태의 rib에 대하여 해석하였다.

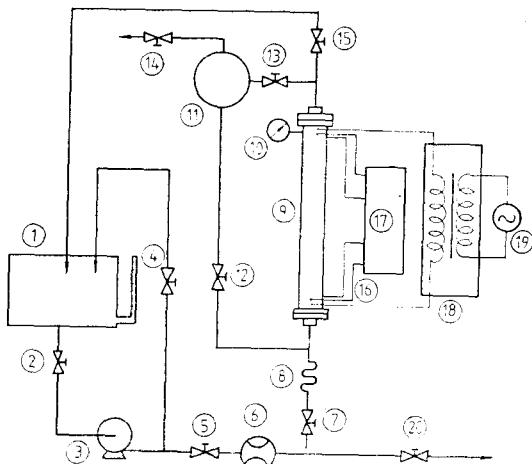
일반적으로 流動方向과 직각이 되게 rib가 가공된 전열판은 摩擦로 인한 압력손실이 크기 때문에 이것의 완화책으로螺旋形의 rib를 갖는 전열판을 사용한 연구가 시작되게 되었다. G.L. Gee, R.L. Webb⁽⁵⁾는 특히 最適나선각, rib의 크기 갯수 등에 대하여 많은 연구가 있었다.

本研究는 热交換器의 설치 및 사용목적에 따라 傳熱管內流動이 傾斜流가 될 때 특히 自然循環($2 \times 10^6 < Gr^* < 15 \times 10^6$)의 경우와 強制循環($3,000 < Re < 40,000$)의 경우에 대해서 热傳達特性과 流動摩擦에 의한 損失을 규명하는데 있다. 사용되는 管은 平滑管과 ribbed 管이며 管傾斜角을 水平面에 대하여 $0^{\circ}, 22.5^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}$ 로 변화시켰다.

2. 實驗裝置 및 方法

2.1 實驗裝置

본 實驗에 사용된 實驗裝置의 概略圖는 Fig. 1 과 같다. 貯水槽 ①의 물은 給水泵 ③에 의해 送出되어 流量計 ⑥을 지나다. 이때 유량은 流量調節밸브 ⑤로 調節되어 實驗部 ⑨에 供給된다. 實驗部에서 加熱된 물은 送出밸브(Discharge valve) ⑯를 통하여 貯水槽로 회수된다. 管傾斜角을 자유로이 조절하기 위해 供給밸브(Supply valve) ⑦과 實驗部 入口사이에는 고무호



- | | |
|----------------------|----------------------|
| ① Water tank | ② Water supply valve |
| ③ Water feed pump | ④ By-Pass valve |
| ⑤ Flow control valve | ⑥ Flowmeter |
| ⑦ Supply valve | ⑧ Flexible hose |
| ⑨ Test section | ⑩ Pressure gage |
| ⑪ Drum | ⑫ Circulation valve |
| ⑬ D/M inlet valve | ⑭ Vent valve |
| ⑯ Discharge valve | ⑮ Thermocouple (C-C) |
| ⑰ Data logger | ⑯ Slidac |
| ⑱ Slidac | ⑰ Drain valve |
| ⑲ A.C. Power | ⑲ |

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus (temperature measurement)

스로 연결하였고 自然循環 實驗時 水頸를 주기 위하여 Drum ⑪을 설치했다. 溫度는 热電對(Copper-Consta-
tan)를 Data Logger ⑯에 연결하여 測定하였다. 實驗管入口와 出口의 壓力差를 測定하기 위해 液柱計를 設置하였으며 液柱計에는 20°C 에서 比重이 약 1.6인 四鹽化炭素(C_2Cl_4)를 사용하였다.

2.2 實驗部

實驗에는 外徑 63.5mm 內徑 49.0mm 的 平滑管과
이 管의 內面에 幅, 높이, 螺旋角이 각각 4.2mm, 1.5
mm, 60° 인 rib를 12줄 가공한 ribbed 管을 使用하였다.
實驗管의 加熱은 個當 400W 容量의 電氣加熱器
(Band Heater) 14個를 管外部에 장착하여 가열하였으
며 热損失을 최소화하기 위하여 Glass Wool로 피복하
였다. Fig. 2는 管의 溫度와 물의 溫度 測定을 위해
實驗管入口와 出口에 热電對를 설치한 경우를 나타내
며 물의 平均溫度는 $1/4 D_i$ (D_i : 內徑) 지점에 热電對
를 設置하여 實驗管 출구의 管壁溫度와 물의 溫度差가
일정해졌을 때를 기준으로 측정하였다.

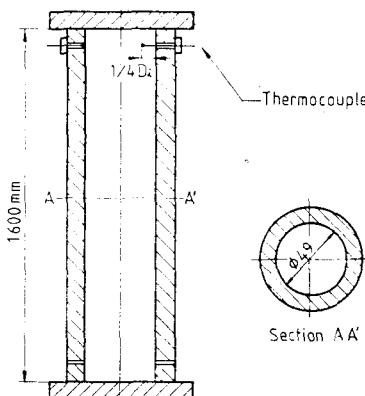


Fig. 2 Location of thermocouples

2.3 無次元數 및 摩擦係數의 計算

Ribbed 管의 Nusselt 數 계산에 사용되는 代表길이 (characteristic Length)에는 等價直徑을 사용하였으며 平滑管의 內徑을 D_i , rib 的 幅, 높이, 갯수 및 螺旋角을 각자 w , H , n , α 로 표시하면 等價直徑 D_H 는 다음과 같다.

$$D_H = \frac{4A}{P} = \frac{4(\pi D_i^2/4 - nwH)}{(\pi D_i + 2nH)} \quad (1)$$

여기서 A 는 管의 斷面積, P 는 接水길이 (Wetted Perimetr)이다. Fig. 3은 ribbed 管의 모양을 나타낸 그림이다.

管의 길이를 L 이라 할 때 ribbed 管의 總傳熱面積 A_H 는 다음과 같이 표시된다.

$$A_H = (\pi D_i + 2nH/\sin \alpha) \cdot L \quad (2)$$

管壁을 통하여 물로 전달된 總熱流量은 $\dot{q} = hA_H(T_w - T_b)$ 이므로, Nusselt 數는 다음과 같다.

$$N_u = \frac{hD_H}{k} = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{A_H(T_w - T_b)} \cdot \frac{D_H}{k} \quad (3)$$

Reynold 數는 $Re = eVD_H/\mu$ 로 정의되며 自然循環 热傳達에서 사용되는 無次元數는 加熱條件의 一定한 热流束이므로 다음과 같이 정의된 Modified Grashof 數를 사용한다.

$$G_r^* = \frac{g\beta\dot{q}(D_H/2)^4}{k\nu^2} \quad (4)$$

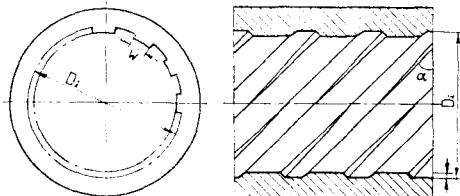


Fig. 3 Cross section of ribbed tube

試驗管內의 摩擦係數는 다음의 式

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D_H} \rho \cdot \frac{V^2}{2} \quad (5)$$

이 되며 摩擦係數 f 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$f = \frac{2D_H \Delta P}{\rho L V^2} = \frac{2D_H \rho g \Delta h}{\rho L V^2} \quad (6)$$

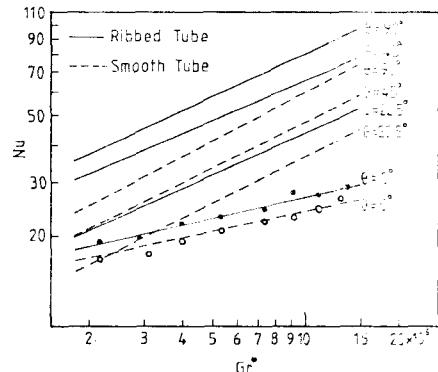
여기서 ρ 와 Δh 는 液柱計에 사용된 四鹽化炭素의 密度와 液柱計의 높이 差이다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 自然循環의 热傳達

Fig. 4은 自然循環의 實驗結果를 나타낸다. 이 때 $N_u = c \cdot G_r^*$ 으로 表示되며 最小自乘法(Least Square Method)을 사용하여 c, m 을 計算한 것이 實線과 點線으로 표시되어 있으며, 0° 에서의 實驗자료는 비교를 위하여 함께 표시되어 있다. 管傾斜角이 0° 인 경우 平滑管 및 ribbed 管에서는 热流束이 증가할수록 Nusselt 數가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 增加率은 완만하게 나타나고 있는데 이것은 自然對流 热傳達의 驅動力인 浮力의 수직성분이 없기 때문이며 또 축방향 유동이 없음에도 불구하고 Nusselt 數가 증가하는 것은 热流束이 증가함에 따라 管斷面內에서의 自然對流가 局部的으로 일어나고 있기 때문이라고 생각된다.

傾斜角이 0° 일 때 平滑管 및 ribbed 管의 Nusselt 數를 비교해 보면 ribbed 管의 Nusselt 數가 平滑管보다 증가는 하지만 그 증가의 幅은 적다. 이것은 管壁에서의 Swirl 效果보다는 傳熱面積의 증대에 원인이 있는 것으로 생각된다. 傾斜角이 22.5° 인 경우는 $\theta=0^\circ$ 인 경우보다 平滑管과 ribbed 管의 Nusselt 數가 상당히 증



(●, ○ : Experimental data for ribbed and Smooth tubes respectively)

Fig. 4 Relative position of curves for free convection

가하였으며, 그 차이도 크게 나타나고 있다. 이것은水平管에서作用하지 않았던浮力成分이 작용하기 때문인 것으로 생각된다.

管傾斜角이增加할수록平滑管보다ribbed管에서熱傳達이 활발한 것은平滑管內의流體는오직浮力에의한軸方向流動만이존재하지만ribbed管內의流體는浮力效果外에螺旋形의rib에의한管壁附近에서圓周方向으로의流動으로인한亂流및傳熱面積의증대효과가있기때문이다.

管傾斜角이 0° 인경우와 90° 인경우의Nusselt數를비교해보면ribbed管은약166%증가하며平滑管은약112%증가하였다.

3.2 強制循環의 热傳達

強制循環時實驗結果는Fig. 5에나타냈으며 $N_u = c \cdot R_e^{m}$ 으로表示하여最小自乘法을 사용하여 c, m 을 구했다. 強制循環의 경우 모든管傾斜角에서ribbed管의Nusselt數는平滑管보다약2.5倍증가하였다. 이와같이平滑管보다ribbed管에서熱傳達이활발히해지는것은螺旋形의rib에의한傳熱面積의증대효과외에rib에의한亂流effect가복합적으로열전달에영향을미치고있기때문이다.

強制循環의경우에도管傾斜角이증가할수록두管의Nusselt數는적은幅으로증가하고있으며各管에대

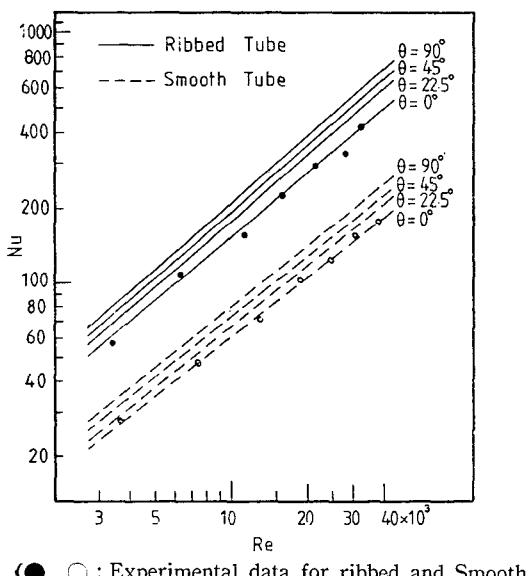


Fig. 5 Relative position of curves for forced convection

하여 $\theta=0^{\circ}$ 와 $\theta=90^{\circ}$ 의경우를비교해보면,ribbed管에서는약36%,平滑管에서는약33%증가한다. 이것은管傾斜角이커짐에따라서自然對流와混合對流(Combined Free-and Forced Convection)에원인이있는것으로생각된다.

3.3 摩擦係數

Fig. 6은平滑管 및ribbed管의摩擦係數 f 를Reynolds數에대해나타낸것이다. Ribbed管의摩擦係數 f_R 은平滑管의마찰계수 f_s 보다평균86%증가했으며 f_R 에대한直線의기울기는 -0.19 로서 f_s 의기울기 -0.25 보다완만하다. 이것은ribbed管內의流動狀態가平滑管보다完全亂流動(Complete Turbulent Flow)에가까워졌음을의미한다.

Fig. 7은 (N_{UR}/N_{US}) 와 (f_R/f_s) 의 η 를나타낸것이다. $\eta=(N_{UR}/N_{US})/(f_R/f_s)$ 로정의된efficiency index는摩擦損失增加에대한熱流量增加의比로서熱傳達量과摩擦損失의加重值를똑같이준다면이efficiency index는平滑管과ribbed管의性能을비교하는

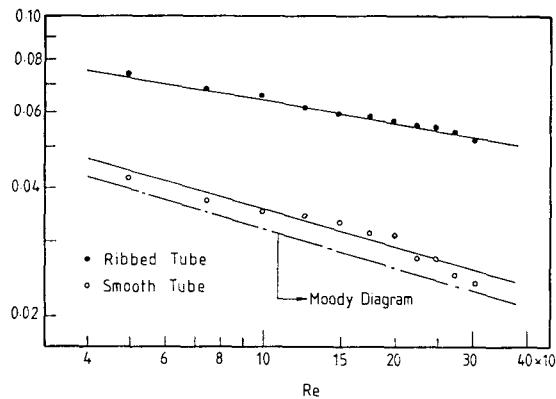


Fig. 6 Friction factor versus Reynolds No. for Smooth & ribbed tube

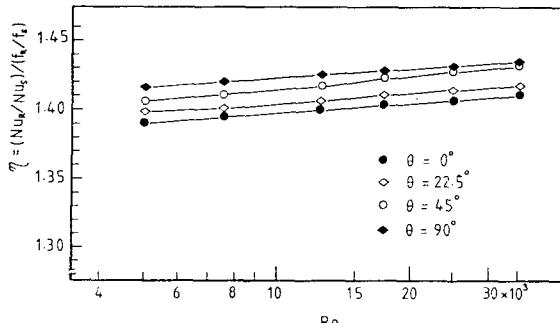


Fig. 7 Efficiency index versus Reynolds No. for various inclined angles

에 효과적으로 利用될 수 있다. 管傾斜角이 증가할수록 效率指數는 증가하였다. 또한 效率指數의 값은 항상 1보다 크며 本 實驗의 結果로서는 摩擦係數의 增加率보다 热傳達係數의 增加率이 약 1.4 배가 됨을 알 수 있다.

4. 結 論

平滑管과 ribbed 管을 사용하여 自然循環($2 \times 10^6 < G_r^* < 15 \times 10^6$)과 強制循環($3,000 < Re < 40,000$)에서 管傾斜角($0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 90^\circ$)이 傳熱特性에 미치는 影響과 摩擦損失에 관하여 實驗한 結果 다음의 結論을 얻었다.

(1) 自然循環의 경우 管傾斜角이 커질수록 浮力의 垂直成分이 증가하므로 热傳達係數는 증가한다. $\theta=90^\circ$ 인 경우 Nusselt 數는 $\theta=0^\circ$ 와 비교하면 ribbed 管에서는 166%, 平滑管에서는 112% 증가했으며, ribbed 管의 Nusselt 數는 平滑管에 비하여 $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$ 및 90° 일 때 각각 13%, 17%, 23%, 24% 증가한다.

(2) 強制循環에서 ribbed 管의 Nusselt 數는 $\theta=0^\circ$ 보다 $\theta=90^\circ$ 에서 36%, 平滑管의 경우는 33% 증가했으며 모든 倾斜角에 대해 ribbed 管의 Nusselt 數는 平滑管의 Nusselt 數보다 166% 증가한다.

(3) 強制循環에서 ribbed 管의 摩擦係數는 平滑管보

다 평균 86% 증가했으며 热傳達係數의 增加比는 摩擦係數의 增加比보다 약 1.4 배 크다.

參 考 文 獻

- (1) S.V. Patankar, M. Ivanovic, E.M. Sparrow, "Analysis of Turbulent Flow and Heat Transfer in Internally Finned Tubes and Annuli," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 101, pp. 29~37, 1979
- (2) R.L. Webb, E.R.G. Eckert, "Application of Rough Surfaces to Heat Exchanger Design," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 15, pp. 1647~1658, 1972
- (3) K. Manbach, "Rough Annulus Pressure Drop Interpretation of Experiments and Recalculation for Square Ribs," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 15, pp. 2489~2498, 1972
- (4) J.C. Han, L.R. Glicksman, W.M. Rohsenow, "An Investigation of Heat Transfer and Friction for Rib-Roughened Surfaces," Int. J. Heat Transfer, Vol. 21, pp. 1143~1156, 1978
- (5) D.L. Gee, R.L. Webb, "Forced Convection Heat Transfer in Helically Rib-Roughened Tubes," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 23, pp. 1127~1136, 1980