

<論 文>

관의 入口區間에서 Tripping Wire의 效果
(第 2 報, 實驗的 研究)

朴 勝 德* · 文 明 局**

(1976. 8. 18 接受)

Effects of Tripping Wire on Entrance Regions of a Duct
(Part 2: Experimental Study)

Seung-Duk Park, Myung-Kuk Moon

Abstract

An analytical study on the effects of initial turbulence intensities and Reynolds Number on the transition flow of a circular tube is conducted in Part I; Analysis of Transition Flow. In this second report, however, the effects of tripping wire on the developing regions of a horizontal pipe are studied experimentally and the results of analytical and experimental studies are compared.

The agreements between the two results are relatively good. The diameter of the apparatus tube in the experimental works is 76.25mm. and the length is about 7m. The tripping wire diameters used in the experiments are 1.0, 1.5, 2.0, 2.5mm., etc. From the experimental works, the relations between tripping wire size; i. e., diameter and Reynolds Number are proposed for the given tube diameter.

1. 緒 論

관속 흐름에 있어서 Reynolds 수가 충분히 커서流動特性이 亂流인 경우에도 管의 入口部分에 있어서는 처음에는 層流의 境界層으로 시작하였다가 차츰 과도구역인 遷移區間을 거쳐서 亂流境界層으로 發展되면서 결국 管流動 特性이 確立되게 된다. 이와같이 管속 흐름에 있어서 流動特性이 確立된 部分의 흐름을 Fully Developed Flow라 하며 入口部分에서 流動特性이 層流에서 遷移區間을 거쳐 亂流로 옮겨지고 있는 區間을 入口區間(Entrance Region 또는 Developing Flow)이

라고한다.

Compact 熱交換器의 경우와 같이 流動特性이 아직 確立되지 않은 入口區間에서 流體 및 溫度의 境界층이 同時에 發展되고 있을 때에는 그의 熱交換 效率에 있어서 특히 入口部分에 생기는 層流境界層이 크게 영향을 미치게 된다.

그러나 적당한 굵기의 Tripping wire를 管入口點에 부착시켜줌으로서 管의 入口部分에서 생기는 層流境界層을 제거시키고 管의 入口로부터 亂流境界層으로 바꾸어줌으로서 보다 많은 熱傳達效果를 얻을 수 있게된다. 이러한 Tripping Wire의 理論的 高찰을 第1報에서 검토하였다.¹⁾ 本研究에서는 이와같은 理論的 結果를 뒷받침하기 위하여 實驗的인 方法으로 Tripping wire의 效果를 測定하였다. 즉 여러 Reynolds 수에 대하여 Tripping wire의 굵기를 변경시키면서 實驗을 하였다.

* 正會員, 陸軍士官學校

** 陸軍士官學校

2. 實驗裝置

本實驗에서 이용한 主實驗裝置는 英國 Print and Partners 會社가 製作한 Pipe Flow and Nozzle Apparatus 이다. 이 管流動裝置는 內徑이 76.25 mm 인 알루미늄 合金으로된 琿은 pipe 로 되어있으며 其의 有效 길이는 6 m 12 cm 로서 無次元 길이로 表示한 x/D 는 약 80으로 流動狀態가 變化되고 있는 入口區間의 實驗에는 充分한 길이이다. Table 1에는 主實驗裝置의 主要치수를 나타내고 있고 Fig. 2에는 入口에서본 實驗裝置의 寫眞이다.

Table 1. Essential dimensions of main apparatus

Pipe diameter: 76.25 mm			
Fan flow rate: 0.24 m ³ /s			
Fan pressure: 13 cm water gauge			
Distance from Inlet			
Tapping No.	Distance (mm)	Tapping No.	Distance (mm)
1	25	7	700
2	55	8	900
3	100	9	1100
4	200	10	2100
5	300	11	3100
6	600	12	4100

本實驗에서 사용한 流體는 空氣로서 遠心送風機로 管의 끝에서 空氣를 吸入하도록 되어있으며 管의 入口에서 良好한 入口條件을 주기위하여 잘 다듬어진 nozzle

을 先端에 부착시켜 좁으로서 入口點에서의 速度分布를 均一하게 하였다.

管의 入口區間에서의 摩擦係數의 變化를 測定하기 爲하여 管의 壁面에는 Fig. 1에서와 같이 여러개의 “피에조 미터” 구멍을 뚫었으며 여기에 6 mm 직경의 비닐호스를 연결시켜서 gauge cock를 거쳐서 micromanometer로 부터 正確한 壓力의 分布를 測定하였다. 여기서 壓力分布를 測定하기 爲하여 使用한 器具는 DISA Type 1346의 micromanometer로서 其의 測定의 正確度는 針눈금에 대하여 $\pm 5\%$ 이고 여기서 사용한 마노미터 液體는 比重이 0.8인 알콜이었다.

그리고 管의 入口條件에서의 空氣흐름의 初期 亂流強度를 測定하기 爲하여 DISA 55 M System의 定溫型熱線風速計를 使用하였다. 여기서 Sensor인 Probe는 直徑이 5 micron인 白金탕그스텐와이어로서 抵抗은 약 3.5 ohm의 것을 사용하였다. 그리고 熱線風速計는 測定에 앞서 calibration unit에 의거 充分한 시간을 두고 正確히 補正을 실시한 다음에 Anemometer, Linearizer, RMS Voltmeter, Digital Voltmeter 등을 연결시켜 직접 亂流強度를 읽을수 있도록 配置하여 測定하였다.

管의 入口區間(Entrance Region)에 생기는 層流境界層을 效果的으로 제거시켜주기 위하여 여러개의 Tripping Wire를 미리 製作하여 交代로 附着시키면서 實驗을 하였다. 이 Tripping Wire는 管의 內部에 꽂기 쉬 맞출수있게 제작한 한개의 Ring 모양의 wire로서 材料는 피야노線을 사용하였다. 本實驗에 使用한 Tripping Wire의 굵기 즉 직경은 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm의 5種類이다. Tripping Wire는 管의 入口地點의 內部에 잘끼여 맞추고 管의 壁面과 Wire 사이는 接着劑로서 固着시켰다.

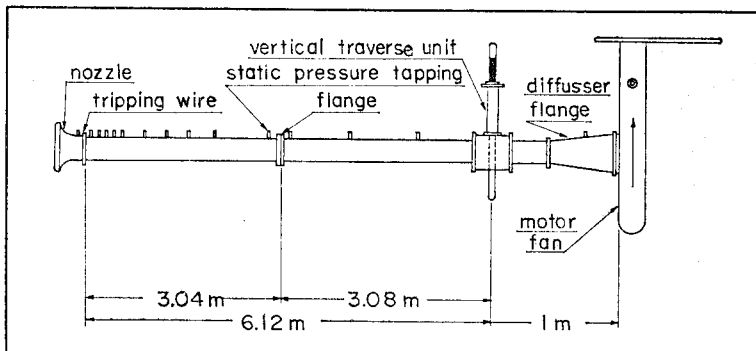


Fig. 1. General Arrangement of Pipe Flow Apparatus.

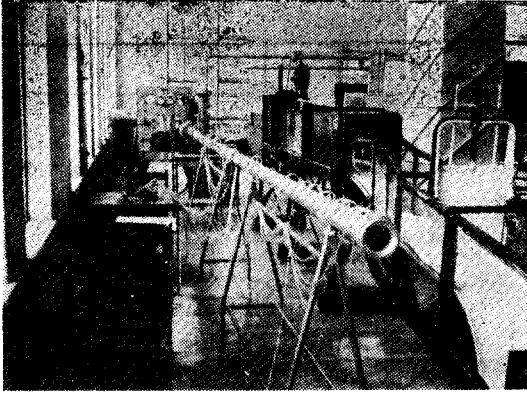


Fig. 2. Experimental Apparatus from Inlet.

3. 實驗方法

實驗은 流動條件을 定常狀態로 도달시켜 주기 위하여 充分한 시간이 경과된 다음에 測定하였다. 實驗에서 重要한 변수로는 Reynolds 數를 擇하였으며 이 Reynolds 數는 充分한 亂流條件을 유지시켜 주기 위하여 대략 20,000~200,000 사이의 어느 한 값으로 유지시킨 다음 다른 값들 즉 速度分布, 壓力分布, 入口에서의 亂流強度들을 차례로 測定하였다.

速度分布의 測定은 管의 入口로부터 充分히 떨어진 (6.12 m) 斷面에 設置된 Pitot tube 에 의하여 測定되었다. 이때 여기에 연결된 Vertical Traverse Unit 로서 Pitot tube 의 管壁으로부터의 相對의 位置를 1/100 mm 의 正確度로 定置시킬 수 있었다. 速度分布의 測定으로부터 얻어진 平均速度에 의하여 Reynolds 數를 決定하였고 無次元距離에 대한 速度 즉 y^+ , u^+ 를 計算하였다.

入口區間에서의 管摩擦係數의 變化를 測定하기 위하여 管의 軸心에 뚫어진 피에조미터 구멍에 연결된 비닐 호스를 통하여 micromanometer 로서 靜壓의 變化를 Reynolds 數를 변경시키면서 각각의 Tripping wire 를 附屬시켰을 경우에 대하여 測定하였다. 이때 管摩擦係數 f_x 는 管에서의 一般의 損失에 대한 定義 즉 剪斷應力과 壓力損失과의 힘의 平衡으로부터 쉽게 計算될 수 있다. 즉,

$$f_x = -\frac{D \left(\frac{dp}{dx} \right)_x}{2\delta u_b^2} \quad (1)$$

여기서 D는 管의 直徑, $\left(\frac{dp}{dx} \right)_x$ 는 入口로부터 x인 地點에서의 測定된 壓力勾配, δ 는 공기 的 밀도, u_b 는

공기 的 平均 速度이다.

管의 入口에서의 初期亂流強度는 管流의 入口特性에 크게 영향^{2,3)}을 미치게 된다. 따라서 本 實驗에서는 實驗마다 우선 初期亂流強度를 測定하였다. 測定裝置의 구성은 앞의 實驗裝置에서 설명된 바와 같고 作動方法과 補正方法은 DISA 의 operation manual 을 따랐다.

4. 實驗結果 및 計議

各 實驗으로부터 測定된 速度分布와 壓力分布로 부터 平均速度를 구하고 이것으로부터 Reynolds 數를 計算한 다음 式(1)의 定義로부터 入口의 지점에 대한 摩擦係數 f_x 를 計算한다. 이러한 일련의 計算은 모두 實驗 Data 를 미리 짜여진 電算 프로그램에 넣음으로서 自動的으로 處理되도록 하였다. 이러한 一連의 實驗은 總 70여회에 걸쳐 實施되었으며 그의 代表的인 計算結果는 參考文獻(4)에 수록되어 있다.

4.1 Tripping Wire 의 效果

管의 入口部分의 流動特性에 미치는 Tripping Wire

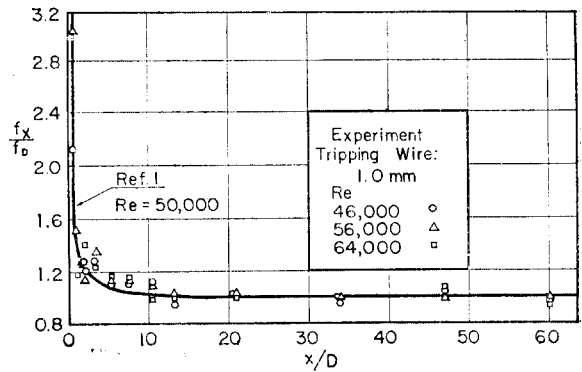


Fig. 3. Friction Factors, Entrance Region

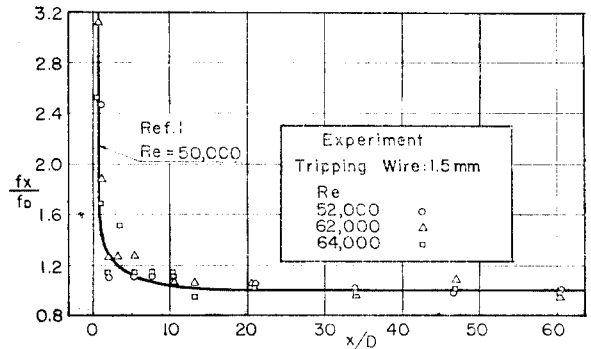


Fig. 4 Friction Factors, Entrance Regnoi

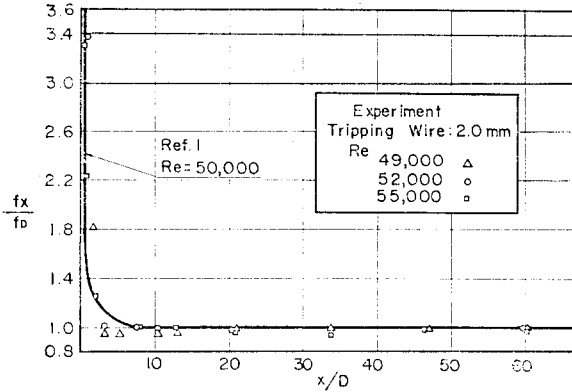


Fig. 5. Friction Factors, Entrance Region.

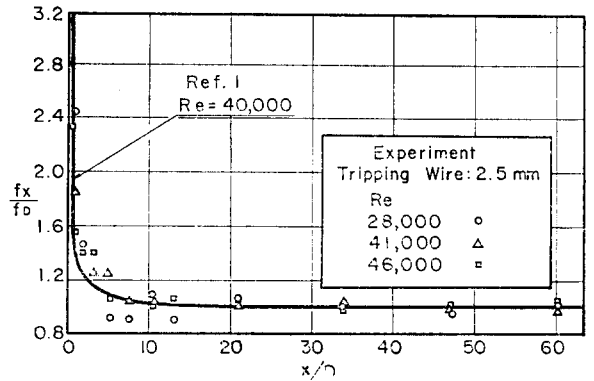


Fig. 6. Friction Factors, Entrance Region.

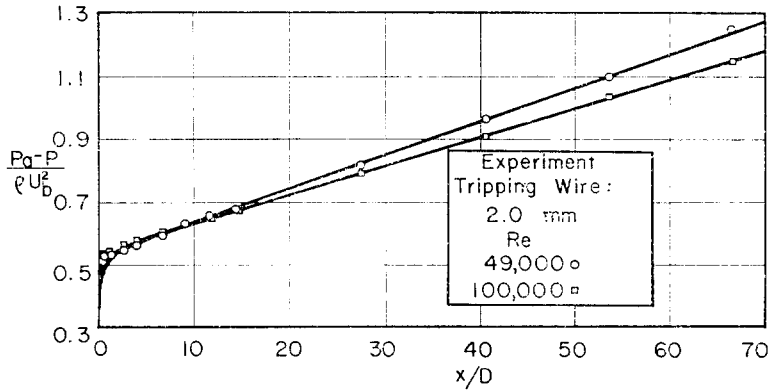


Fig. 7. Variation of Static Pressure.

의 효과를 試驗하기 爲하여 직경이 각각 다른 Tripping wire 를 管의 入口에 附着시킨 다음에 Reynolds 數를 變更시키면서 測定한 管摩擦係數의 값들을 管의 길이 x/D 를 함수로하여 그림에 表示하였다.

Fig. 3에서 Fig 6.까지는 Tripping wire 의 직경이 각각 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mm 인 경우의 결과를 表示하고 있으며 이그림들은 각각의 Tripping wire 의 치수에 적합한 Reynolds 數의 경우만을 골라서 表示한 結果이기 때문에 비교적 實線 즉 管의 上端에서 생기는 층류경계층을 효과적으로 파괴시켜서 처음부터 亂流의 境界層을 만들어주었을 경우의 理想的인 摩擦曲線에 接近되고 있음을 엿볼 수 있다. 이 그림에서도 볼 수 있는 바와 같이 주어진 Tripping wire 의 直徑에 꼭 알맞은 Reynolds 數의 決定이 매우 힘이 든다는 것을 알수 있으나 大體적으로 Tripping wire 의 直徑이 굵어지면 여기에 적합한 Reynolds 數는 다소 減少하는 경향이 있다.

Fig 7. 에서는 入口區間의 各斷面에서 測定한 靜壓을

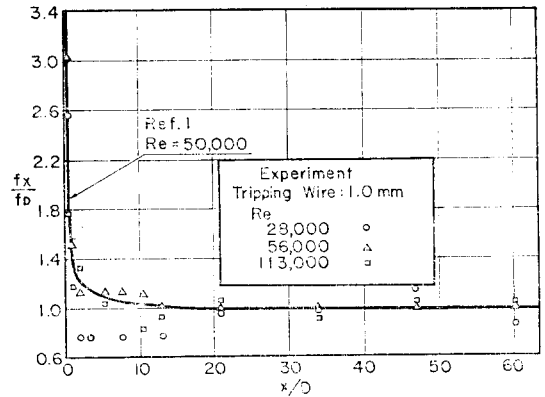


Fig. 8. Variation of Friction Factors.

無次元으로 하여 表示한 結果이다. 이같은 Reynolds 數의 函數이며 流動狀態가 確立된 區間에서는 直線的인 關係를 갖지만 入口區間에서는 直線이 아님을 볼 수 있

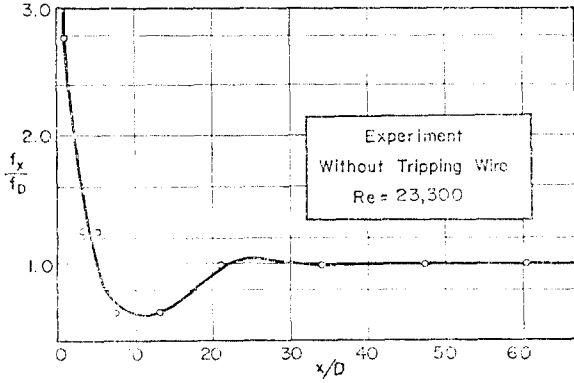


Fig. 9. Variation of Friction Factors.

다. 한편 Fig 8.에서는 Tripping Wire 의 直徑 1.0 mm 에 대한 理論的인 實線과 實驗值로서 Reynolds 數 28,000, 56,000, 113,000의 경우를 함께 보여주고 있다. 여기서 理論的인 實線은 第1報¹⁾에서 얻어진 Reynolds 數 50,000인 경우의 값으로서 實驗值로서 Reynolds 數가 56,000의 경우에 비교적 잘 一致되고 있음을 볼수 있으나 反面 Reynolds 數가 28,000인 경우와 113,000인 경우에는 理論線인 實線으로부터 많이 떨어져 있음을 엿볼수있다.

Fig. 9에서는 管의 入口에 Tripping wire 를 設置하지 않고 測定한 摩擦係數의 값을 Reynolds 數가 23,000인 경우에 대하여 그려준 것이다. 예상했던 대로 Reynolds 數로 보아 充分히 亂流의 條件이 되면서도 第1報에서 지적한 대로 Tripping wire 를 設置하지 않았을 경우에는 처음에는 境界層이 層流로 시작하였다가 遷移

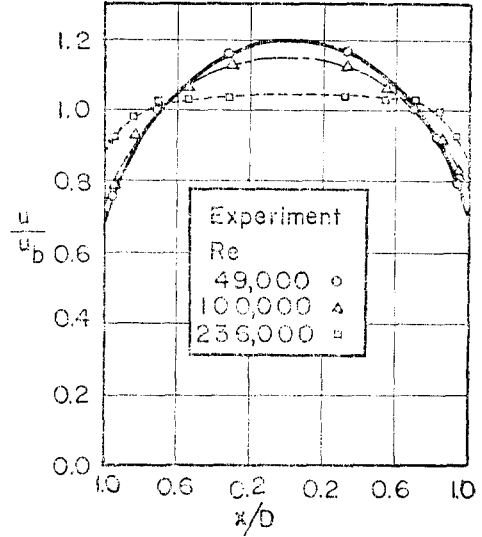


Fig. 10. Experimental Velocity Profile

區間을 거쳐서 亂流의 값을 갖게됨을 볼수 있다.

4.2. 速度 分布

管內 速度分布는 流動狀態가 充分히 確立된 한 斷面에서 피토크우管으로 測定하였다.

Fig.10 에서는 速度分布를 管의 中心으로 부터의 距離를 軸수로 하여 그렸다. 여기서 Reynolds 數가 증가하면 速度分布의 모양이 점점 扁平해지고 있으며 管의 中心에 대하여 대칭의 모양을 가지고 있다. 한편 Fig. 11.에서는 無次元 速度와 距離 즉 u^+ , y^+ 의 값으로 測

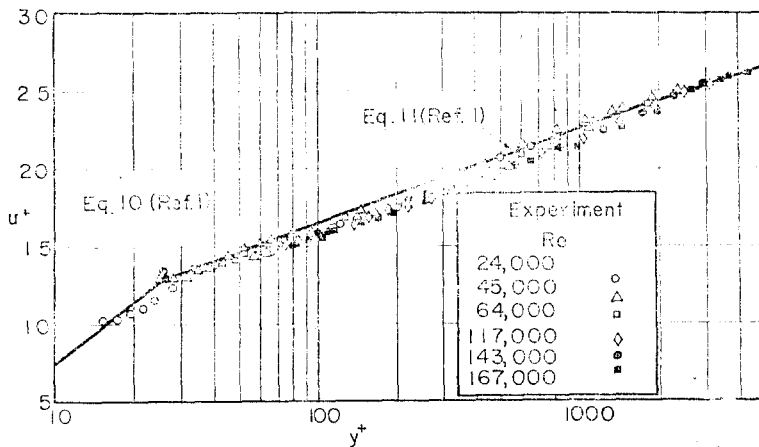


Fig. 11. Dimensionless velocity profile.

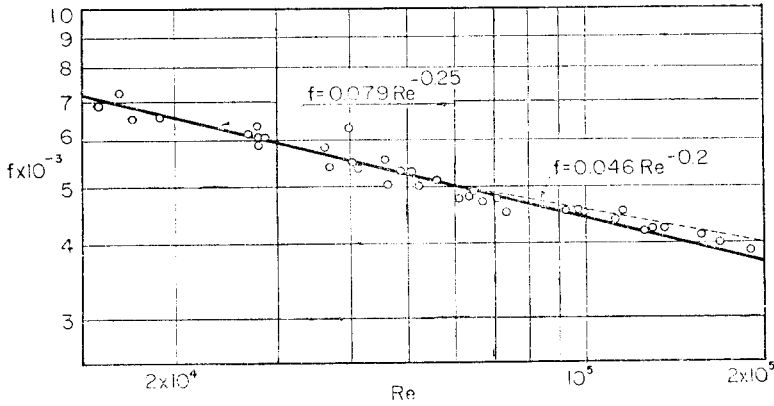


Fig. 12. Friction Factors for Fully Developed Flow

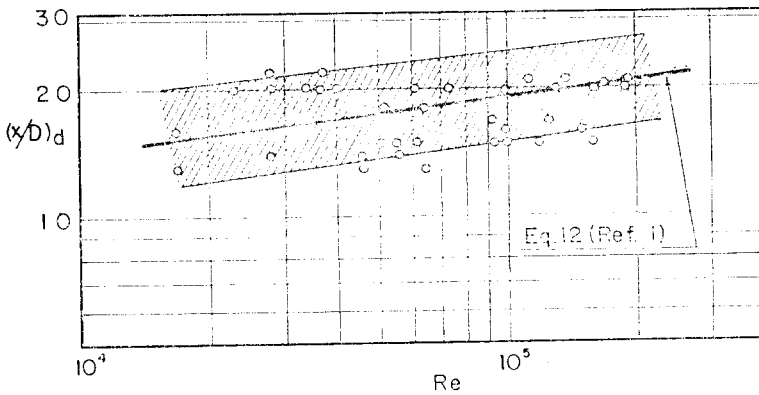


Fig. 13. Hydrodynamic Entry Lengths

定된 값들을 表示한 結果이고 여기서 實線은 第1報¹⁾에서의 理論值의 結果이다. 여기서도 볼수 있는바와 같이 모든 Reynolds 數에 대하여 亂流 速度分布는 u^+ , y^+ 의 向으로 表示하게 되면 Universal velocity profile 로서 하나의 線으로 表示할수 있음을 보여준다.

4.3. 入口區間의 길이와 摩擦係數

本 實驗의 正確度를 確認하기 위하여 確立된 區間에서의 摩擦係數를 Reynolds 數를 함수로하여 Fig. 12에 表示하였다.

그림에서 實線은 많은 研究者들^{3, 4)}에 의해서 證明된 經驗式을 表示하며 本實驗에서의 實值도 比較의 잘一致되고 있음을 엿볼수 있다. Fig. 13.에서는 實驗으로부터 測定된 入口區間의 길이 $(x/D)_d$ 와 Reynolds 數와의 關係를 보여주고 있다. 여기서 斜線을 친 부분은 實值의 약 90%를 포함하는 영역을 나타낸 것이다. 그

리고 實線은 第1報에서 理論적으로 구한 값을 그린 결과이다. 여기서 入口區間의 길이는 管의 入口로부터 $f_x/f_D=1$ 즉 임의점에서의 管摩擦係數 f_x 가 完全히 流動狀態가 確立된 區間에서의 값 f_D 와 같게되는 점까지의 距離를 $(x/D)_d$ 로 계산한 값을 말한다. 그러나 實際로 이러한 地點을 實驗值로 부터 正確하게 判斷하는 일은 대단히 어려운 것이다. 그림에서도 볼수 있는 바와 같이 實驗值는 대략 理論值와 같은 경향을 가지고 있다. 즉 Reynolds 數의 증가와 더불어 入口區間의 길이 $(x/D)_d$ 의 값도 증가되는 경향을 가지고 있다.

4.4. Tripping Wire 의 치수

本實驗의 重要한 目的의 하나는 주어진 管과 Reynolds 數에 대하여 가장 알맞는 크기의 Tripping wire 의 直徑을 決定하는데 있다. 다시말하면 管入口에서 亂流境界層이 시작되기 전에 생기게 되는 層流境界層을

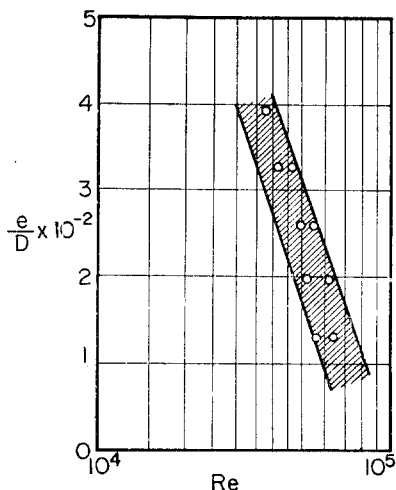


Fig. 14. Relation between Tripping wire and Reynolds Number.

과피시켜서 管全體를 亂流境界層으로 만들어주는 Tripping wire 의 치수를 判斷하는데 있다. Fig 14. 에서는 Reynolds 數를 함수로 하여 Fig 3. 에서 Fig. 6. 까지 그리고 Fig. 8. 에서 얻은 實驗結果를 토대로하여 가장 알맞는 Tripping Wire 의 直徑과 管의 直徑과의 直徑比 c/D 의 값들을 表示한 것이며 斜線部分은 實驗值의 약 70%를 포함하는 영역이다. 그림에서 實驗結果가 많이 分散되는 현상은 亂流의 入口特性을 決定하여주는 또다른 重要한 要素^{5, 6)}의 하나가 入口地點에서의 亂流強度 $Tu = \sqrt{u'^2}/u_b$ 인데 이값을 각 實驗때마다 一定하게 維持시킬 수 없었기 때문인 것이다. 本實驗에서의 測定된 入口에서의 亂流強度 Tu 의 범위는 大略 0.015 ~ 0.0014 이었다. 언제나 같은 亂流強度를 入口地點에서 유지시켜주기 위해서는 管의 入口에 커다란 Settling Box 를 設置하고 적당한 mesh wire screen 을 設置하여야하나 本實驗에서는 Tu 의 조절이 不可能하였다. 그러나 보통의 實驗室 條件下에서 入口條件의 亂流強度는 大略 本實驗에서의 값과 같은 범위라고 가정할 때 Reynolds 數에 따르는 Tripping wire 의 치수는 Fig 14. 로 부터 決定할 수 있다. 여기서 Tripping wire 의 치수는 Reynolds 數의 증가와 더불어서 減少하는 경향이 있음을 알 수 있다.

5. 結 論

관의 入口區間에서 熱傳達 效果를 증가시켜주는 方法의 하나는 亂流境界層의 前面에 생기는 層流境界層을 效果의 除去시켜주는 것이다. 本研究에서는 實驗의 結果로 Tripping wire 를 사용하여 이러한 目的을 달성시키는 方法을 검토하였다. 주어진 管의 直徑과 Reynolds 數에 대한 Tripping wire 의 直徑은 Fig 14. 에서 주어져 있으며 Reynolds 數의 증가와 더불어 요구되는 Tripping wire 의 直徑은 감소되는 경향이 있다. 다만 入口特性에 대한 보다 效果의인 實驗은 入口에서의 初期 亂流強度를 임의로 변경시키면서 그에 대한 영향도 함께 고려되어야하나 本研究에서는 亂流強度에 대한 영향은 고려하지 못하였으며 앞으로의 과제로 제기한다.

<後 記>

本 論文은 1975年度 科學技術處 研究 助成費에 의하여 研究된 結果의 一部임을 밝혀두며, 研究費를 支援하여준 當局에게 感謝를 드린다.

參 考 文 獻

1. 朴勝德, 金景碩, 管의 入口區間에 있어서 Tripping wire 의 效果(第1報, 遷移區間의 解析), 大韓機械學會誌, 16卷, 1號, 1976.
2. K. C. Goel & Y. Lee, Effect of Free Stream Turbulence on the Thermal Entrance Region of a Circular Duct, Letters in Heat and Mass Transfer, Vol. 2, 1975.
3. W. M. Kays and A. L. London, Compact Heat Exchangers, Chapt. 6, p. 107, McGraw-Hill, New York, 1964.
4. W. M. Kays, Convective Heat and Mass Transfer, Chapt. 6, p. 73, McGraw-Hill, New York, 1966.
5. S. D. Park, Turbulence Intensities in the Developing Regions, J. of KSME, Vol. 12, No. 4, 1972.
6. 朴勝德, 文明局, 金景碩, Compact 熱交換器의 性能向上에 관한 研究, 科學技術處 研究報告書, R-75-13, 1975.