

熱傳達 促進技術 (Ⅲ)

Techniques of Heat Transfer Enhancement

徐 正 閔*
Jeong Yun Seo

3. 亂流促進體的 流動-熱傳達特性

3.1 二次元粗度型

여기서는 表面粗度型中에서 二次元粗度型에 속하는 transverse repeated-rib roughness type에 대해서 기술하기로 한다. 또한 이 型式은 後述하는 twisted tape swirl generator 과 마찬가지로 가장 많이 研究의 對象이 되고 있다.

[1] 流動樣相

亂流狀態에서의 promoter 近傍의 흐름은 非定常性和 擴散이 강하기 때문에 흐름에 대한 可視化技術이 그 能力을 발휘하기가 매우 어렵다.

그러나 Re 數가 낮은 흐름에서의 可視化 結果는 이와 같은 흐름의 狀況을 推定하는데 有效하며 그 流動樣相은 다음과 같다.

植田·原田⁴⁾, Webb 등⁵⁾의 結果를 종합하면 promoter 間의 流動은 Re 數나 e/D에 의한 영향은 크지 않으며, 거의 P/e에 의해서만 결정된다.

流動狀態를 P/e의 增大에 대한 變化에 따라 설명하면 다음과 같다(Fig. 5 參照).

P/e = 0.5: 上下로 서로 反對方向의 두 渦流가 생긴다.

P/e = 1.0: 安定된 1개의 渦流가 생긴다.

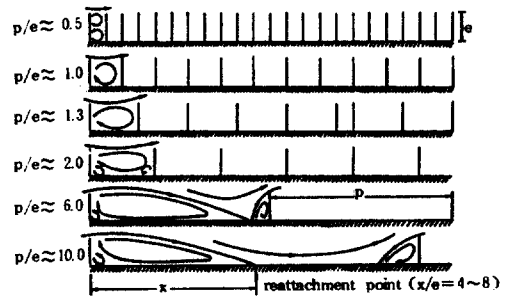


Fig. 5 Flow patterns as a function of P/e

P/e = 1.3: 摩擦係數가 極小化되며, 楕圓狀 渦流가 생긴다.

P/e = 2.0: 上流側 promoter 直後에 楕圓狀 渦流의 下部에서 또 하나의 渦流가 생긴다.

P/e = 6.0: promoter 를 넘은 自由流線은 壁面에 再附着하게 된다. 摩擦係數는 이 狀態에서 極大가 된다.

P/e > 10.0: promoter 를 넘은 自由流線은 壁面에 再附着한후, 境界層을 形成하게 된다.

再附着點의 位置는 再附着의 定義와 promoter 의 形狀 등에 따라서 變化하며, 대략

$$X/e = 6 \sim 8$$

이 된다.

[2] 壓力損失

Savage & Myers⁶⁾는 $D=153.0\text{mm}$ 인 円管 內水流에서 $e = 6.35 \sim 25.4\text{mm}$, $W = 4.76\text{mm}$, $P = 12.7 \sim 330.2\text{mm}$ 의 turbulence promoter에 대하여 剪斷力에 의한 壓力損失(ΔP_f)에 관한 摩擦係數 f_f 와 의 比率(二次元粗度の 경우, 全摩擦係數 f_T 는 f_s 와 f_f 의 합으로 표시된다)을 測定하였다(記號는 Fig. 6 參照).

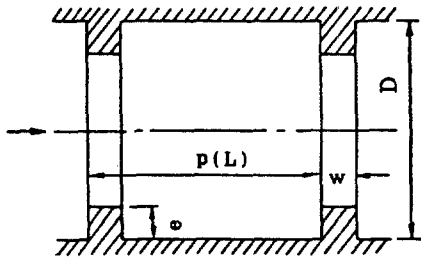


Fig. 6 Model of integral fin

Fig. 7, Fig. 8에는 각각 f_f 및 f_s/f_T 의 測定值를 e/P 에 대해서 표시하였다. 測定 Reynolds 數 範圍는 $10^4 < Re < 10^5$ 이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이

- ① 形狀抵抗係數 f_F 는 모든 rib 높이에 대해서 e/L 의 增加와 더불어 감소하며, $e/L = 1$ 에서 거의 零이다.
- ② $e/L = 1$ 이상에서는 剪斷力에 의한 壓力損失에 대한 摩擦係數 f_s 의 效果만이 나타나며, $e/L = 0.2$ 이하에서는 全 壓力損失中에서 80% 이상이 形狀抵抗이 된다. 이 중에서 ②에 대해서는 promoter의 改良을 고려하는데 있어서 중요한 要素가 된다.

특히 transverse repeated-rib type roughness의 實用 pitch 範圍인 $L/e \approx 10$ 에서는 全

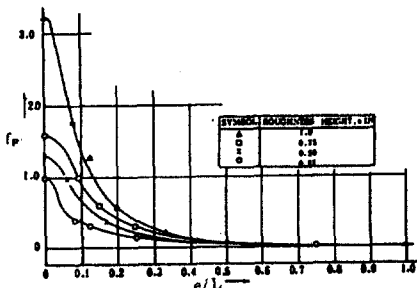


Fig. 7 Dependence of form drag coefficient on the ratio roughness height/roughness spacing ($10^4 < N_{ReD} < 10^5$)

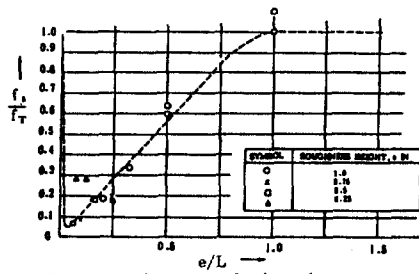


Fig. 8 Contribution of skin friction to the total pressure drop ($N_{ReD} = 10^5$)

壓力損失中 90% 이상이 形狀抵抗이며, 流動特性的 改善에는 形狀抵抗의 低減이 필요함을 알 수 있다.

[3] 摩擦係數

i) Reynolds 數에 대한 依存性

Fig. 9는 Dipprey & Sabersky⁷⁾가 測定한 均一粗度を 갖는 円管의 摩擦係數를 표시한다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 各粗度에서 Re 數를 增大시키면 摩擦係數가 Re 數에 依存하지 않게 되는 「fully rough region」이 存在한다.

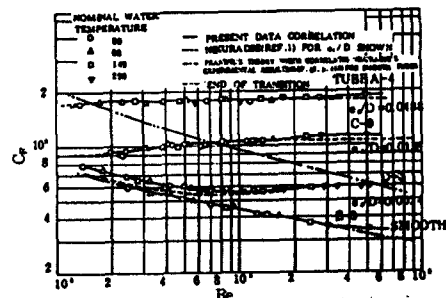


Fig. 9 Friction coefficient vs. Reynolds number for tubes E-3, D-3, C-9, and A-4

fully rough region에서의 摩擦係數는 e/D 에 의해서 정해지며, fully rough region이 시작되는 Re 數는 e/D 의 增大와 더불어 작아진다. 이와 마찬가지로 結果는 transverse repeated-rib type roughness에 대해서도 확인되었다.

Fig. 10은 Wilkie⁸⁾에 의한 $P/e = 12$. $W = 0.635\text{mm}$, $e = 0.254 \sim 1.27\text{mm}$ 의 경우의 摩擦係數 f 의 測定結果이며, Fig. 9와 마찬가지로 結果를 나타낸다.

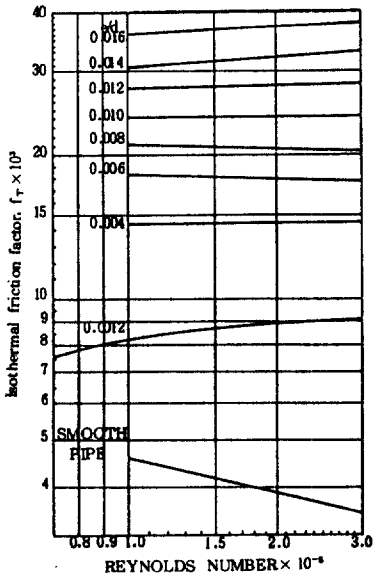


Fig. 10 Friction factor for surfaces with pitch to height ratio of 12

Fig. 11에는 $D = 106.68\text{ mm}$ 인 二重円管環狀流路内の 空氣流에 대해서 얻은 Sheriff & Gumley⁹⁾의 實驗結果이다. 다만 $P/e = 10$, $e = W$, $e = 0.058 \sim 1.016\text{ mm}$ 이다. 이상에서

(가) 摩擦係數 f 에는 Reynolds數에 대해서 f 가 獨立的으로 나타내는 fully rough region이 존재한다.

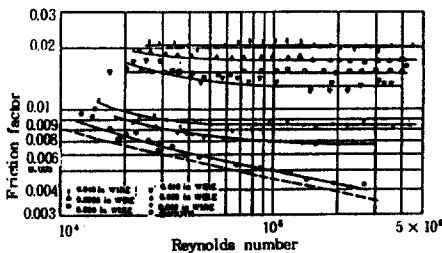


Fig. 11 Transformed friction factors, based on roughness tip area

(나) fully rough region이 시작되는 Reynolds數는 e/D 의 增大에 따라 減少한다. 는 것을 알 수 있다.

ii) e/D 에 대한 依存性

Fig. 9 ~ Fig. 11에서 알 수 있는 바와 같이

[a] fully rough region에서의 摩擦係數 f 는 e/D 의 增大와 더불어 單調롭게 增加한다.

[b] fully rough region(壁面粗度에 의해

서 形成되는 形狀抵抗이 全摩擦係數의 大部分이 되는 狀況에서 일어난다고 생각된다)은 e/D 의 增大와 더불어 낮은 Reynolds數에서 시작되게 된다.

Dipprey & Sabersky⁷⁾에 의하면 fully rough region이 시작되는 狀況은 Nikuradze¹⁰⁾가 지적한 바와 같이 $e^+ (\equiv eu^*/\nu)$ 로 표시할 때 $e^+ = 70$ 로 주어진다.

[c] transverse repeated-rib type roughness에서는 fully rough region은 $e^+ = 35$ (Webb⁵⁾, Han¹¹⁾), 혹은 $e^+ = 30$ (Dalle Donne & Meyer¹²⁾)에서 시작된다.

iii) P/e 에 대한 依存性

Fig. 12는 Savage & Myers⁶⁾가 円管($D = 153.0\text{ mm}$)內 水流에 대해서 實驗한 結果($10^4 < Re < 10^5$)를 나타낸다.

이 그림에서 $0.04 < e/D < 0.166$ 의 범위에서 摩擦係數 f 는 e/D 와는 관계없이 거의 $P/e = 7$ 에서 最大가 된다.

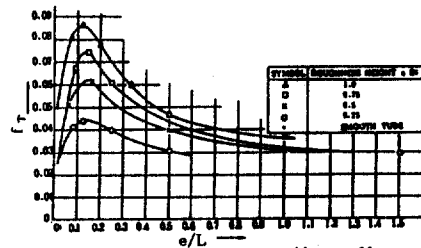


Fig. 12 Dependence of overall coefficient on the ratio: roughness height/roughness spacing ($10^4 < N_{ReD} < 10^5$)

Fig. 13은 Wilkie⁸⁾가 二重管内 空氣流에 대해서 實驗한 結果를 나타낸 것이다. 이 그림에서는 $Re = 10^5$ 에서 $0.004 < e/D < 0.016$ 의 범위에서는 同一한 e/D 에 대해서 f 의 最大値를 나타내는 P/e 는 e/D 의 감소와 더불어 增大하고 있다.

따라서

① 충분히 큰 e/D 에 있어서는 f 는 P/e 가 6~8 정도에서 最大가 되며

② e/D 가 작은 경우에는 e/D 가 작을수록 큰 값의 P/e 에서 f 는 最大가 됨을 알 수 있다.

또 植田・原田⁴⁾의 結果에 의하면

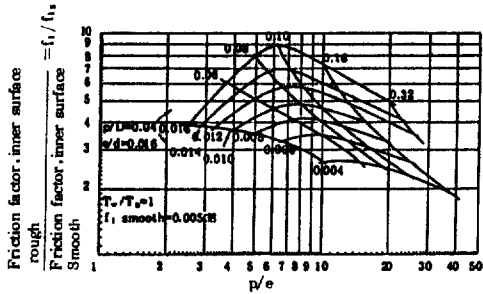


Fig. 13 Friction factor relative to smooth surface valve for Reynolds number of 1×10^5

③ f 는 $P/e=1$ 前後에서 極小値가 된다.

iv) promoter 形狀에 대한 依存性

turbulence promoter 로서는 보통 直四角型 斷面을 갖는 것이 사용되는데, Wilkie⁸⁾는 이 promoter의 edge를 45°로 깎아내거나 둥글게 만들므로서 摩擦係數가 5~10% 정도 低減된다는 것을 제시하였다.

한편, Han¹¹⁾은 Fig. 14에 표시한 바와 같은 形狀의 promoter에 대해서 實驗을 실시하

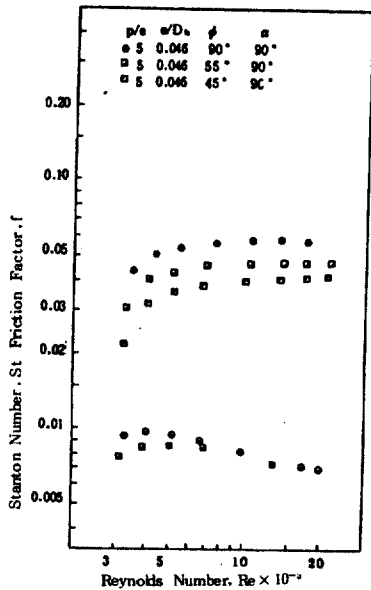
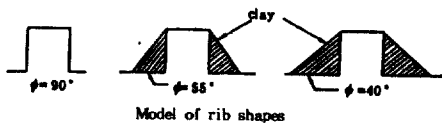


Fig. 14 Friction factor and Stanton number for different rib shapes

여 rib shape angle ϕ 의 減少에 의한 摩擦係數 f 의 감소양상을 제시하였다(Fig. 14 參照).

이들 結果는 形狀抵抗係數가 작은 形狀을 갖는 rib의 使用으로 f 가 감소한다는 것을 나타내고 있다.

v) Helix angle (α)의 依存性

Han¹¹⁾ 등은 等價直徑 $De=24.9 \sim 116.2$ mm의 直四角形 流路內 空氣流에서 摩擦係數 f 에 대한 helix angle α 의 영향을 조사하여 Fig. 15와 같은 結果를 얻었다. 이 그림에 의하면 f 는 α 에 대해서 2次曲線形狀으로 변화하고 있다. 이와 같은 結果는 Wilkie⁸⁾도 얻고 있다.

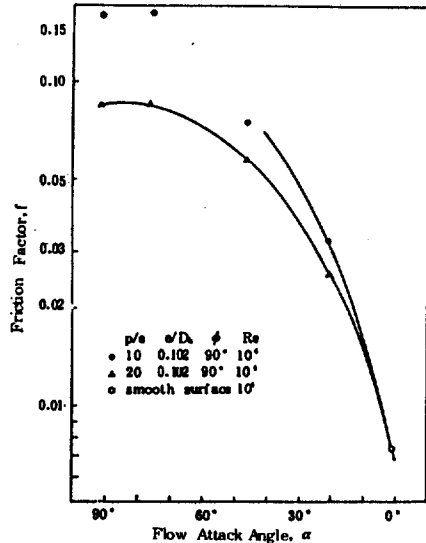


Fig. 15 Friction factor vs flow attack angles

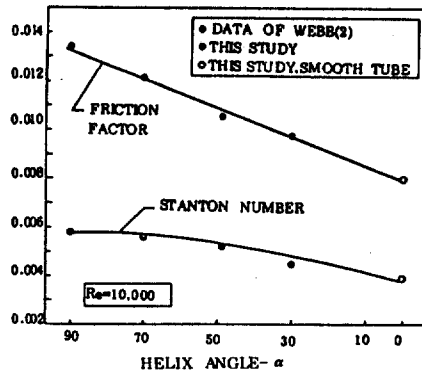


Fig. 16 Stanton number and friction factor vs. helix angle for $Re = 10,000$

한편 Gee & Webb¹³⁾는 $D=25.4\text{mm}$ 의 円管內空氣流에 대해서 α 의 영향을 實驗的으로 조사하여 Fig. 16과 같이 f 는 α 에 대해서 直線的으로 변화함을 제시하였다. 그리고 Han의 實驗에서는 $e/D=0.102$, $P/e=10\sim 20$ 이며 Gee의 實驗의 경우는 $e/D\cong 0.01$, $P/e=15.2$ 이다.

또 Han¹¹⁾은 流路의 上下面의 粗度가 $\frac{1}{2}P$ 씩 어긋나게 配列된 staggered rib에 대한 경우의 實驗에서 f 는 對稱配列의 경우와 同一하다는 것을 $e/De=0.076$, $P/e=5$ 의 條件下에서 확인하였다.

[다음號에 계속]