

傳熱促進技術 (VII) (最終回)

Techniques of Heat Transfer Enhancement

徐 正 閔*
Jeong Yun Seo

5. Turbulence promoter의 性能豫測

Turbulence promoter의 性能은 現實 條件에 따라 변한다. 따라서 대상으로 하는 系마다 性能 評價를 실시하여 最適 promoter의 種類, 形狀, 寸수를 결정해야 한다. 그러므로 turbulence promoter의 流動特性, 熱傳達性能을 model化 해두는 것이 중요하다.

여기서는 transverse repeated-rib type roughness에 대한 解析 model을 간단히 소개하기로 한다.

5.1 摩擦係數

混合길이를 l 이라 하면 粗度面의 경우

$$l = K(y + \delta y_0)$$

$$u^+ = u/u^*$$

$$y^+ = yu^*/\nu$$

라고 놓으면 混合길이 理論에서 渦動粘性係數 $\epsilon_M \gg \nu$ 의 경우

$$\frac{du^+}{dy^+} = \frac{1}{K[y^+ + (\delta y_0)^+]}$$

이것을 積分하여

$$u^+ = \frac{1}{K} \ln \left[\frac{y^+}{(\delta y_0)^+} + 1 \right]$$

$y^+ \gg (\delta y_0)^+$ 의 경우

$$\begin{aligned} u^+ &= \frac{1}{K} \ln y^+ - \frac{1}{K} \ln (\delta y_0)^+ \\ &= \frac{1}{K} \ln \left(\frac{y}{e} \right) + \frac{1}{K} \ln \left(\frac{e}{\delta y_0} \right) \\ &= \frac{1}{K} \ln \left(\frac{y}{e} \right) + R^+(e^+) \end{aligned}$$

이제 이 速度分布가 管內流動에서 全斷面에서 成立한다고 하면

$$\begin{aligned} \pi r_0^2 u_m &= \int_0^{r_0} 2\pi r u^+ dr \\ &= - \int_{r_0}^0 2\pi (r_0 - y) u^+ dy \end{aligned}$$

$K=0.4$ 로 보고 積分을 하면

$$\frac{r_0^2}{(r_0^+)^2} \frac{r_0}{\rho \nu} u_m^+ = 2.5 \ln \left(\frac{r_0}{e} \right) + R^+(e^+) - 3.75$$

따라서

$$u_m^+ = 2.5 \ln \left(\frac{r_0}{e} \right) + R^+(e^+) - 3.75$$

여기서

$$f = \frac{2}{u_m^{+2}}$$

이므로

$$\sqrt{\frac{2}{f}} = 2.5 \ln \frac{r_0}{e} + R^+(e^+) - 3.75$$

한편 transverse repeated-rib type roughness의 경우 R^+ 函數는 $e^+, w/e, (p-w)/e, \hat{y}^+$ (剪斷力이 零이 되는 面의 壁面으로부터의 距離)의 函數로 생각되므로

$$u^+ = 2.5 \ln \left(\frac{y}{e} \right) + R^+(e^+, w/e, (p-w)/e, \hat{y}^+)$$

$$\sqrt{\frac{2}{f}} = 2.5 \ln \left(\frac{r_0}{e} \right) + R^+(e^+, w/e, (p-w)/e, \hat{y}^+) - 3.75$$

따라서 摩擦係數 f 를 豫測하는 問題는 R^+ 函數를 구하는 問題로 歸着하게 된다.

5.2 熱傳達係數

T^+ 를

$$T^+ \equiv \frac{\rho C_p u_m^* (T_w - T)}{q_w}$$

로 定義한다.

Sheriff & Gumley⁹⁹⁾가 測定한 바와 같이 transverse repeated-rib type roughness에 있어서도 $du^+ = dT^+$ 가 成立한다.

이들의 測定値는 Fig. 79와 같다.

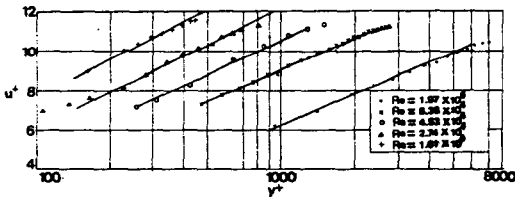


Fig. 79 Universal velocity distribution -0.040- in roughness

한편 Stanton 數는

$$\frac{1}{St} \equiv \frac{\rho C_p u_m (T_w - T_m)}{q_w}$$

$$= \frac{\rho C_p u_m (T_w - T_e)}{q_w} + \frac{\rho C_p u_m (T_e - T_m)}{q}$$

여기서 T_e 는 $y=e$ 에서의 流體溫度이다.

$dT^+ = du^+$ 의 關係에서

$$T_m^+ - T_e^+ = \int_e^{y_m} dT^+ = \int_e^{y_m} du^+$$

$$= u_m^+ - u_e^+ = \sqrt{\frac{2}{f}} - \frac{u_e}{u^*}$$

따라서

$$T_m - T_e = (T_m^+ - T_e^+) \frac{u_m}{u^*} = (T_m^+ - T_e^+) \sqrt{\frac{2}{f}}$$

$$= \frac{2}{f} - \left(\frac{u_e}{u^*} \right) \sqrt{\frac{2}{f}}$$

또 $u_e^+ (\equiv u_e/u^*)$ 는 바로 摩擦係數에 관한 R^+ 函數가 되므로

$$\frac{\rho C_p u_m (T_w - T_e)}{q_w} \equiv H^+$$

라고 하면 以上の 關係에서

$$\frac{1}{St} = H^+ + \frac{2}{f} - R^+ \sqrt{\frac{2}{f}}$$

가 되며 熱傳達係數 h 를 豫測하는 問題는 H^+ 函數를 구하는 問題로 歸着된다.

일반적으로 H^+ 函數는 turbulence promoter의 幾何學的 形狀의 R^+ 函數 ($e^+, w/e, (p-w)/e, \hat{y}^+$)와 Prandtl 數의 函數 $F(\text{Pr})$ 의 곱으로 생각하고 있으며 따라서

$$H^+ \equiv R(e^+, w/e, (p-w)/e, \hat{y}^+) \cdot F(\text{Pr})$$

이 된다.

5.3 R^+ 函數 및 H^+ 函數

이상에서 f 및 h 를 實測値를 사용하여 R^+ 函數, H^+ 函數를 다음과 같이 구할 수 있다.¹⁰²⁾

$$R^+ = \sqrt{\frac{2}{f}} - 2.5 \ln \left(\frac{r_0}{e} \right) + 3.75$$

$$H^+ = \frac{f/2st - 1}{\sqrt{f/2}} + R^+$$

현재로서는 Dalle Donne & Meyer¹⁰²⁾의

式이 가장 적절한 것으로 알려져 있다.

5.4 實驗值와의 對應 例示

Fig. 80은 Dipprey & Sabersky¹⁰⁰⁾의 H^+ 函數 Fig. 81, 82는 각각 Webb¹⁰¹⁾의 R^+ 函數, H^+ 函數를 實驗值와 더불어 표시한 것이다.

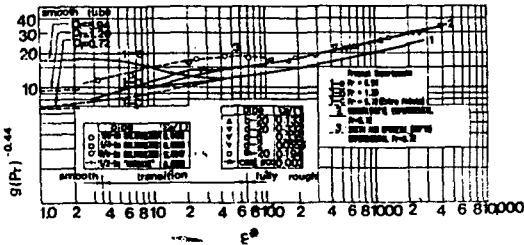


Fig. 80 Comparisons-rough tube heat-transfer experimental results

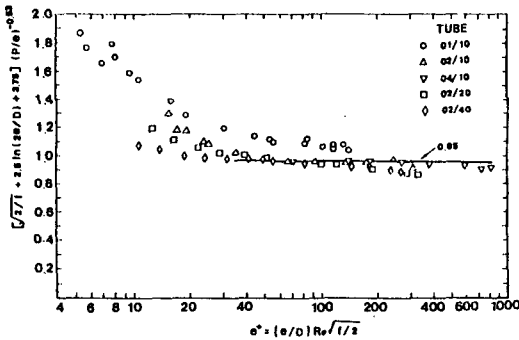


Fig. 81 Final friction correlation for repeated-rib tubes

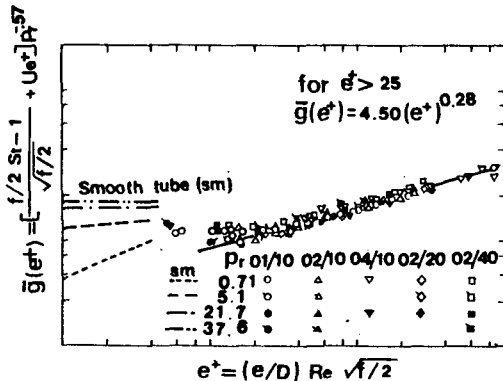


Fig. 82 Final heat transfer correlation, $\bar{g}(e^+)$ vs e^+ including the Prandtl number dependency

또 Fig. 83~Fig. 88은 Dalle Donne¹⁰²⁾의 R^+ 函數, H^+ 函數에 관한 實驗值를 비교 표시한 것이다.

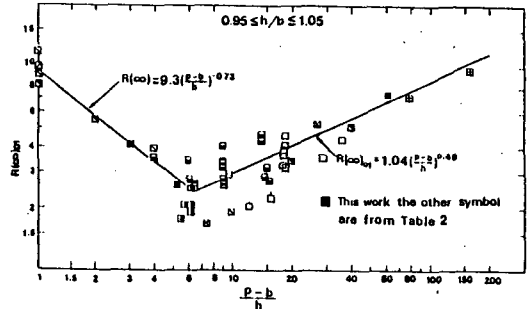


Fig. 83 $R(\infty)_{01}$ vs $(p-b)/h$ for $0.95 \leq h/b \leq 1.05$

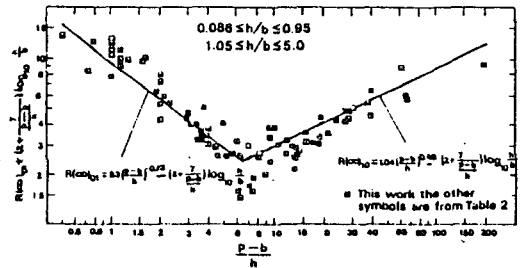


Fig. 84 $R(\infty)_{01} + [2 + 7\{(p-b)/h\}] \log_{10}(h/b)$ vs $(p-b)/h$ for $0.086 \leq h/b < 0.95$ and $1.05 \leq h/b \leq 5.0$.

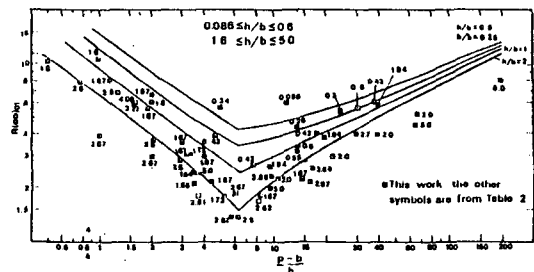


Fig. 85 $R(\infty)_{01}$ vs $(p-b)/h$ for $0.086 \leq h/b \leq 0.6$ and $1.6 \leq h/b \leq 5$ comparison with suggested correlation. (The numbers beside the points indicate the value of h/b .)

그림중에서 縱軸 $R(\infty)_{01}$ 는 fully rough flow, $h/\hat{y} = 0.01$ 에서의 R^+ 函數이다. Fig.

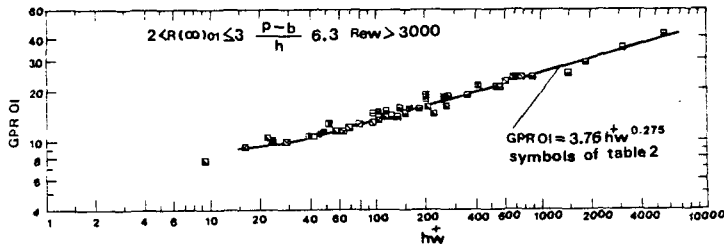


Fig.86 GPR01 vs h_w^+ for $2 < R(\infty)_{01} \leq 3$ and $(p-b)/h > 6.3$

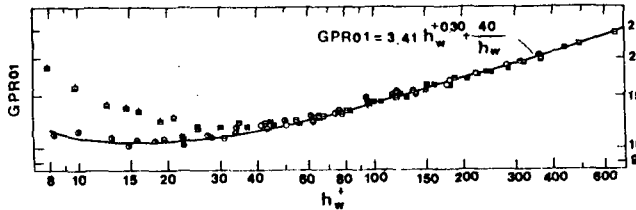


Fig.87 $GPR01 = G(h_w^+) / \left[P_r^{0.44} (T_w/T_B)^{0.5} \left(\frac{h}{0.01(r_2-r_1)} \right)^{0.053} \right]$ vs h_w^+ for the rough rod number 8 (symbols of Figs. 20 and 21).

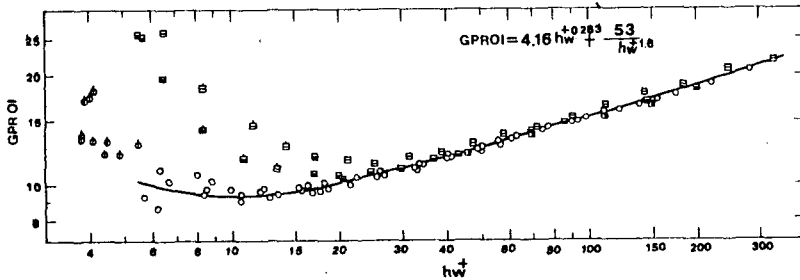


Fig.88 $GPR01 = G(h_w^+) / \left[P_r^{0.44} (T_w/T_B)^{0.5} \left(\frac{h}{0.01(r_2-r_1)} \right)^{0.053} \right]$ vs h_w^+ for the rough rod number 10 (symbols of Figs. 22 and 23).

85는 Dalle Donne 의 $R(h^+)$ 函數와 實驗値가 표시되어 있는데 h/b , $(p-b)/h$ 에 대한 依存性이 잘 一致하고 있다.

또한 그림에서 縱軸 GPR01 은

$$GPR01 = H^+ / \left[P_r^{0.44} (T_w/T_B)^{0.5} \left(\frac{h}{0.01(r_2-r_1)} \right)^{0.053} \right]$$

이다.

Fig.87은 fully rough region에서 $R(h^+)$ 函數가 작은 경우 Fig.88은 fully rough region에서 $R(h^+)$ 函數가 큰 경우에 대해서 각각 정리한 경우이다.

또 Fig.89, Fig.90은 Hau¹⁰³의 R^+ 函數,

H^+ , Fig.91, Fig.92는 Gee¹⁰⁴의 R^+ 函數, H^+ 函數와 實驗 data와 對應表示한 것인데 모두 實驗範圍에서 data가 잘 정리되고 있다.

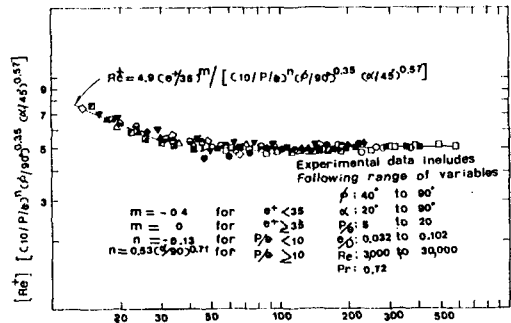


Fig.89 Roughness Reynolds Number, $e^+ = (e/D)_r Re \sqrt{f/2}$ Final friction correlation.

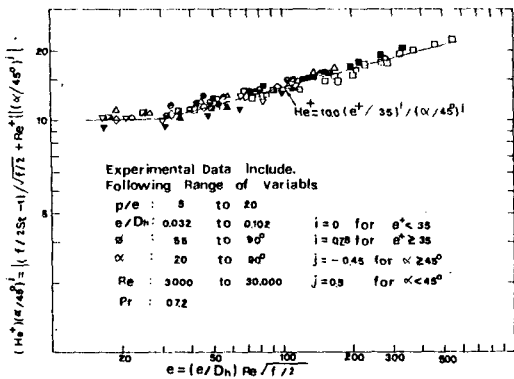


Fig. 90 Final heat-transfer correlation with Stanton number based on total area.

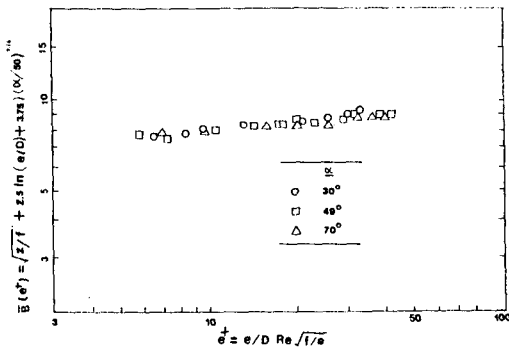


Fig. 91 Correlation of friction data using Nikuradse's Similarity Law (12)

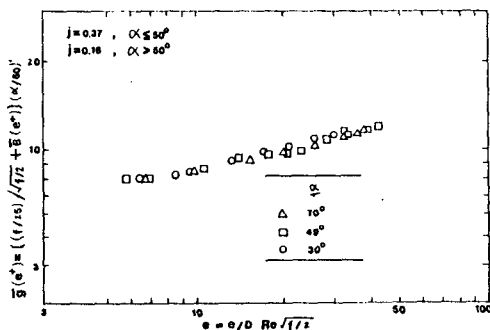


Fig. 92 Correlation of friction data using Nikuradse's Similarity Law.

6. 結 論

7 회에 걸쳐 記術한 turbulence promoter 에 관한 내용에 대해서 간략하게 그 結果를

정리하면 다음과 같다.

(1) Transverse repeated-rib type roughness 에 관해서

1) 이 promoter 에서는 $p > 5$ 에서 全壓 力 損失中 80% 以上이 形狀抵抗으로 나타난다.

2) 摩擦係數는 h/D 의 增大와 더불어 단 조롭게 增大하며 p 에 대해서는 任意의 $(p)_{max}$ 에서 最大値가 되는데 이 $(p)_{max}$ 의 값은 D 의 增大와 더불어 減少하며 6~7 程度로 漸近한다.

3) 熱傳達係數 分布는 平均熱傳達係數로 規格化하면 거의 相似的 變化를 하게 된다. 한편 hx/h_s 는 promoter 의 밑 部分 (上流, 下流側 모두)에서는 1보다 작으며 이밖의 大部分에서는 1보다 크다.

4) 熱傳達係數는 e/D 의 增大와 더불어 單調롭게 增大하는데 h/h_s 는 e^+ 가 100을 초과하면 거의 一定하게 된다. 한편 p/e 에 대해서는 임의의 $(p/e)_{max}$ 에서 最大値가 되며 이 $(p/e)_{max}$ 의 값은 e/D 의 增大와 더불어 減少하며 6~7 程度로 漸近한다.

5) rib shape angle 은 摩擦係數에는 影響을 주지만 열전달계수에는 큰 影響을 주지 않는다.

한편 helix angle 을 갖게 하면 摩擦係數와 熱傳達係數는 모두 減少한다.

6) Volume Goodness Factor 는 promoter 의 性能評價를 하면 helix angle $\alpha = 90^\circ$ 의 경우는 $e/D = 0.006$, $p/e = 6.3$ 程度에서 性能이 最高가 된다.

7) 이 종류의 promoter 의 性能評價는 대략적으로 볼 때 數值的으로 豫測이 可能하지만 機構的 面에서의 研究가 필요하다.

(2) twisted tape swirl generator에 관해서

1) 이 promoter 에서의 流動은 주로

- ① helical flow
 - ② vortex mixing
 - ③ 體積力에 의한 二次流動
- 으로 파악된다.

2) 이 promoter 의 摩擦係數, 熱傳達係數는 $f/fa = 2.75 y^{-0.406}$, $h/ha = 2.26 y^{-0.248}$ 로 표시되는 바와 같이 비틀림比 $y (\equiv H/2D)$

가 減少할수록 크다.

3) Volume Goodness Factor 로 비교하면 일반적으로 y 의 減少와 더불어 性能은 向上되지만 e/D 가 큰 transverse repeated rib type roughness 와 마찬가지로 Re 의 增大와 더불어 性能은 떨어진다.

참 고 문 헌

99. N. Sheriff & P. Gumley, Int. J. Heat & Mass Transfer, 9(1966), pp. 1297-1320.
100. D. F. Dippery & R. H. Sabersky, Int. J. Heat & Mass Transfer, 6(1963), pp. 329-353.
101. R. L. Webb et al., Int. J. Heat & Mass Transfer, 14 (1971), pp. 601-617.
102. M. Dalle Donne & L. Meyer, Int. J. Heat & Mass Transfer 20 (1977), pp. 583-620.
103. J. C. Hau et al., Int. J. Heat & Mass Transfer, 21(1978), pp. 1143-1155.
104. D. L. Gee & R. L. Webb, Int. J. Heat & Mass Transfer, 23 (1980), pp. 1127-1135.