

1. 緒 論

固定層을 工業的으로 應用함에 있어서 가장 큰 利點은 높은 熱傳達增進效果를 얻을 수 있다는 점이다. 따라서 최근에는 固定層을 이용하여 小型의 高性能 熱交換器를 開發하기 위한 研究가 활발히 進行되고 있다. 그러나 이 固定層을 空氣冷却熱交換器에 이용하는데 있어서 層內를 通過하는 空氣의 壓力損失이 비교적 크다는 점이 문제가 된다. 熱交換器에 있어서 壓力損失은 入力에너지의 增加로 인한 運轉經費의 增大로 生産原價 上昇의 原因이 된다. 따라서 固定層을 이용한 熱交換器를 設計하는 데는 壓力損失을 고려한 熱傳達性能을 評價하기 위한 資料가 필요하며 이러한 設計 資料를 얻기 위해서는 固定層內를 流動하는 流體의 壓力損失을 豫測해야 할 필요가 있다. 따라서 固定層內에서의 壓力損失에 대한 理論的, 實驗的 研究가 많은 研究者들에 의해 수행되어 왔으며¹⁻⁶⁾ 粒子直徑, 固定層의 길이, 流速, 流體의 粘性係數 및 密度, 空隙率 등이 壓力損失에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.¹⁻³⁾ 특히 空隙率은 매우 중요한 固子로 취급되고 있는데 固定層內의 粒子의 配列이 규칙적으로 될 경우를 제외하고는 理論的으로 정확히 計算할 수 없으며 일반적으로 粒子配列이 불규칙한 無作爲固定層이 각종 장치에 더 많이 應用되고 있다.

또한 空隙率은 固定層內에서 均一하지 않고 壁面과 粒子가 접촉하고 있는 壁面領域은 粒子끼리 접촉하고 있는 層內部領域보다 큰 空隙率을 갖게 되며 이 壁面領域은 壁面으로부터 粒子直徑의 1/2이 되는 영역으로 限定하고 있다.⁴⁻⁶⁾ 이 壁面領域의 높은 空隙率이 層內의 平均空隙率에 미치는 影響은 무시할 수 없으며 粒子直徑과 베드直徑의 比에 따라 그 영향은 다르게 된다. 따라서 固定層內에서의 壓力損失은 平均空隙率 뿐만 아니라 壁面領域의 높은 空隙率로 인한 바이패스(bypass) 효과도 고려해야 한다. 그러나 지금까지 보고된 固定層內에서의 壓力損失에 대한

理論式과 實驗式들은 平均空隙率을 變數로 취하고 있으므로 바이패스效果를 고려하기 위해서는 베드直徑의 변화에 따른 平均空隙率의 변화에 대한 또 다른 實驗結果를 利用해야 한다.

本 研究에서는 壓力損失에 영향을 미치는 각종 因子중에서 空隙率 대신에 粒子直徑과 베드直徑의 比를 變數로 취함으로써 壁面領域의 바이패스를 포함하는 보다 실용적인 實驗式을 제시하고자 한다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

2.1 實驗裝置

Fig. 1은 本 實驗에 사용된 實驗裝置의 概略圖이다. 이 裝置에서 送風機 入口쪽에는 空氣濾過器①을 設置하였고 送風機②의 容量은 ($13\text{m}^2/\text{min} \times 300\text{mmAq}$)이다. ③은 送風流量調節用 밸브이고 流量을 測定하기 위하여 오리피스⑥을 設置하였다. 오리피스는 $\phi 14\text{mm}$ 로 製作하여 float type flow meter (Schutte & koerting Co., M 66-50637 U.S. A.)로 補正하였다. ④와 ⑤는 각각 오리피스에 流入하는 空氣의 壓力 및 溫度測定位置이고 ⑦, ⑧은 液柱計이다. 空氣의 密度는 ④와 ⑤에서 測定된 空氣의 壓力과 溫度에 의해서 計算되고 이 密度를 流量計算에 利用한다. ⑨는 固定層 ⑩에 流入하는 空氣流動을 整流하기 위하여 設置한 空氣室이다. ⑪은 固定層內에서 空氣의 壓力降下를 測定하기 위한 液柱計이다.

Fig. 2는 固定層內에서의 壓力損失을 測定하기 위한 固定層의 詳細圖로서 베드①은 수도용 P. V. C管을 사용하여 제작하였고 ②는 베드를 연결하기 위하여 사용한 P. V. C 소켓이다. ⑥은 充填된 粒子를 支持하기 위하여 설치한 金屬網이며, ③은 層內에 流入되는 공기의 溫度를 測定하기 위한 熱電對 挿入口이며, 여기서 測定된 空氣의 溫度는 空氣의 物性值를 계산하는데 利用된다. ④는 層內에서 공기의 壓力損失을 測定하기 위한 液柱計 連結口로서 金屬網에 의한 흐름의 영향을 없애기

위하여 金屬網 上方 8mm인 위치에 設置하였고 또 다른 液柱計 連結口는 空氣流動方向을 따라 15mm間隔으로 20개를 設置하였다.

⑤는 金屬網插入位置에서의 氣密을 유지하기 위한 가스켓이며 ⑦은 베드內에 充填된 鋼球를 나타낸다. 또한 베드로는 直徑이 31.5 [mm], 40.05 [mm], 50.8 [mm], 60.5 [mm] 4種類를 사용한다.

2.2 實驗方法 및 實驗範圍

(1) 實驗方法

Fig. 1의 實驗裝置에서 壓力損失測定用 베드 (Fig. 2)를 組立하고 베드內에 鋼球를 充填한다. 이때 鋼球의 充填狀態에 따라 壓力損失이 相異하게 됨을 고려하여 最密充填狀態가 되도록 베드에 振動을 주면서 充填하였다. 鋼球의 充填이 끝난후 液柱計 (Fig. 1. ⑩)를 壓力測定用 連結口 (Fig. 2. ④)에 연결하고 層內에 流入하는 空氣의 溫度를 測定하기 위하여 Fig. 2의 ③에 熱電對를 插入한다. 또한 Fig. 1의 ⑤에도 熱電對를 插入하고 이들 熱電對를 Data Logger에 各各 連結한 다음에 送風機 (Fig. 1, ②)를 稼動하고 流量調節밸브 (Fig. 1. ③)로써 流量을 調節한다. 이때 流量은 Fig. 1의 ④와 ⑤에서 測定된 空氣의 壓力과 溫度에 의해 計算된 空氣의 密度와 오리피스 (Fig. 1. ⑥)에서의 壓力差를 利用하여 計算한다. 流量이 一定하게 유지된 상태에서 空氣流動方向의 各 위치에 壓力差를 測定하고 한 流量에 대한 실험이 끝나면 流量을 變化시킨 후 壓力測定을 하게 된다. 流量範圍는 本實驗에서 最大로 通過할 수 있는 流量까지로 하였고 流量變化는 液柱計에 나타나는 壓力差를 等間隔으로 變化시켰으며 모든 粒子크기와 各 베드크기에 대해서도 같은 방법으로 實驗을 실시하였다.

本實驗에서 壓力損失測定은 Fig. 2와 같이 베드의 軸方向을 따라 15 [mm] 간격으로 여러 위치에서의 壓力差를 同一한 液柱計로 測定하였으므로 測定誤差는 液柱計 읽음에 의한 誤差뿐이며 이 값은 極히 작기 때문에 實驗結果에 큰 影響을 미치지 않는다고 볼 수 있다.

(2) 實驗範圍

鋼球가 充填된 固定層內를 流動하는 空氣의 壓力損失에 대한 流速, 粒子直徑, 베드直徑의 影響을 考察하기 위하여 實驗한 範圍는 Table 1과 같으며 各 베드에서 〇표한 粒子에 대해서 實驗하였다.

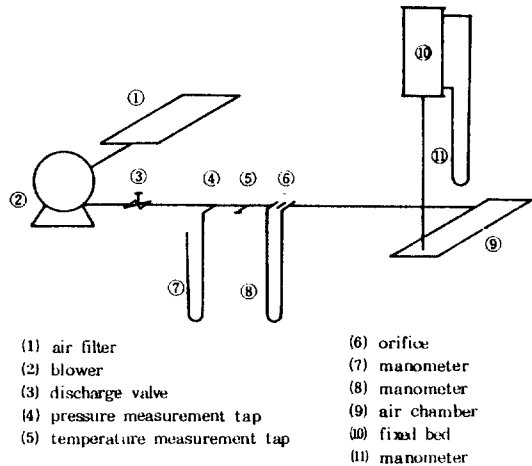


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

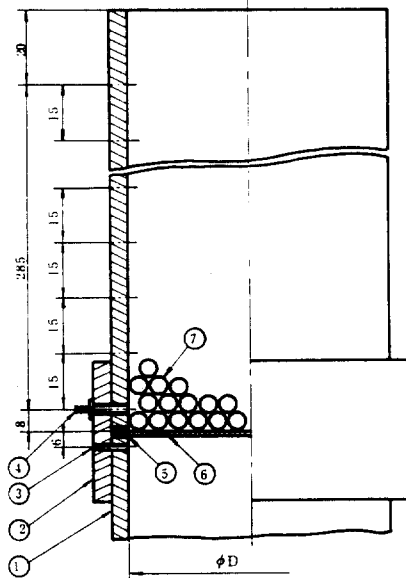


Fig. 2 Detail of cylindrical fixed bed for pressure drop measurement

Table 1. Scope of Pressure drop experiment

nominal dia [mm] dia of bed [D, mm] dia of particle [D _p , mm]	30	40	50	60	mass flow rate [kg/min]
	31.5	40.08	50.8	60.5	
1.0				○	0.099~0.432
1.5			○	○	
2.0		○	○	○	
2.5		○	○	○	
3.17		○	○	○	
3.96	○	○	○	○	
4.75	○	○	○	○	
5.0	○			○	
5.95	○	○		○	
6.35	○	○			
7.15	○	○	○	○	

3. 實驗結果 및 考察

3.1 次元解析

從來의 研究結果^{1,2,3)}에 의하면 固定層內에서의 壓力損失(ΔP)은 粒子直徑(D_p), 固定層의 길이(L), 流體의 密度(ρ) 및 粘性係數(μ), 空塔平均速度(U_m), 空隙率(ε)의 函數로서 다음式으로 표시된다.

$$\Delta P = F_1(L, D_p, \rho, U_m, \mu, \epsilon) \dots \dots \dots (1)$$

또한 空隙率은 粒子直徑 및 베드直徑(D)에 따라 다르므로 式(1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta P = F_2(L, D_p, D, \rho, U_m, \mu) \dots \dots \dots (2)$$

式(2)에서 反復變數로서 D_p, ρ, U_m을 취하고 π 定理을 이용하면 다음과 같은 無次元式을 얻는다.

$$F_3\left(\frac{\Delta P}{\rho U_m^2}, \frac{L}{D_p}, \frac{D}{D_p}, \frac{\mu}{\rho U_m D_p}\right) = 0 \dots \dots \dots (3)$$

式(3)의 無次元數 μ/ρU_mD_p는 粒子直徑을 特性길이로 하는 Reynold 數(Re_p)의 逆數이다.

3.2 實驗結果의 整理 및 考察

式(3)의 각 無次元數 사이의 關係를 實驗結果로부터 求하기 위하여 式(3)을 다음과 같이 變形한다.

$$\frac{\Delta P}{\rho U_m^2} = C_1 \left(\frac{L}{D_p}\right)^{n_1} \cdot F_4\left(\frac{D}{D_p}, Re_p\right) \dots \dots (4)$$

式(4)에서 n₁ 값을 구하기 위하여 實驗結果로부터 ΔP/ρU_m²과 L/D_p의 關係를 정리하면 Fig.3~Fig.6과 같다. 모든 粒子크기에 있어서 베드直徑, D=30mm인 경우(Fig.3)는 n₁=0.95~0.96, 베드直徑, D=40mm인 경우(Fig.4)는 n₁=0.97~1.07, 베드直徑, D=50mm인 경우(Fig.5)는 n₁=0.97~1.07, 베드直徑, D=60mm인 경우(Fig.6)는 n₁=0.95~1.03이고 모든 베드直徑에 대한 n₁ 값의 平均値는 n₁≅1.01로서 ΔP/ρU_m²은 L/D_p에 比例한다고 볼 수 있다.

따라서 式(4)는 다음 式으로 된다.

$$\frac{\Delta P}{\rho U_m^2} \cdot \frac{L}{D_p} = C_2 \left(\frac{D}{D_p}\right)^{n_2} \cdot Re_p^{n_3} \dots \dots \dots (5)$$

式(5)의 C₂, n₂, n₃ 값을 數值解析的인 方法으로 구하면 C₂=36.44, n₂=0.281, n₃=

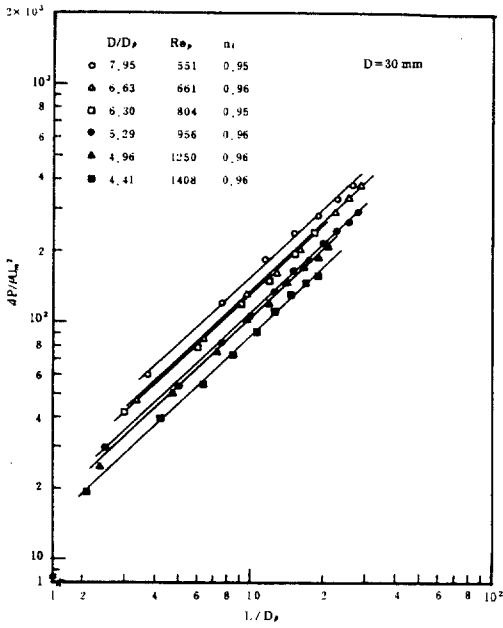


Fig.3 Pressure drop data obtained from cylindrical fixed bed (D=30 mm)

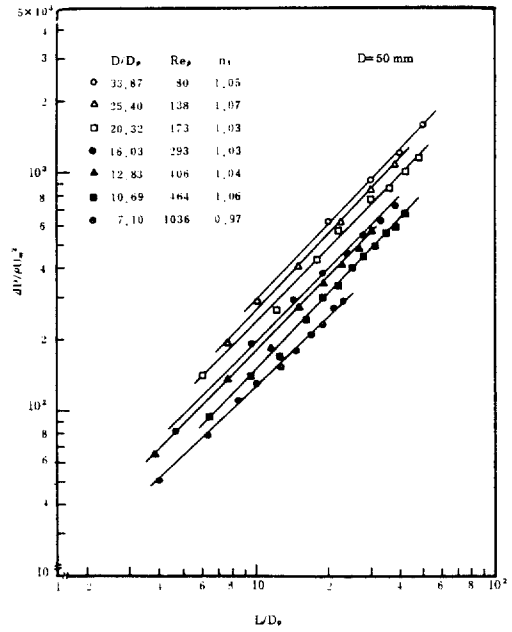


Fig.5 Pressure drop data obtained from cylindrical fixed bed (D=50 mm)

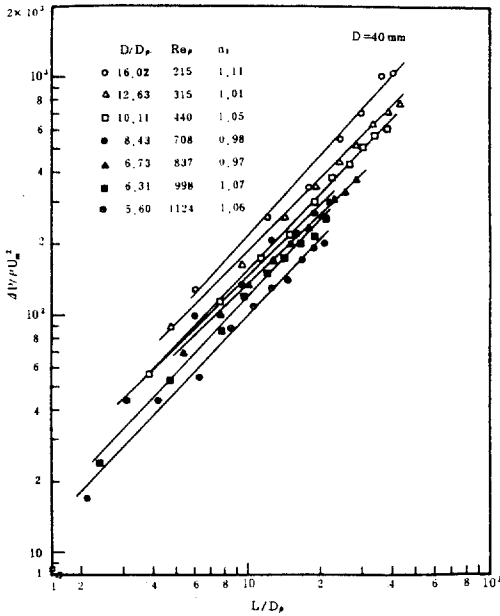


Fig.4 Pressure drop data obtained from cylindrical fixed bed (D=40mm)

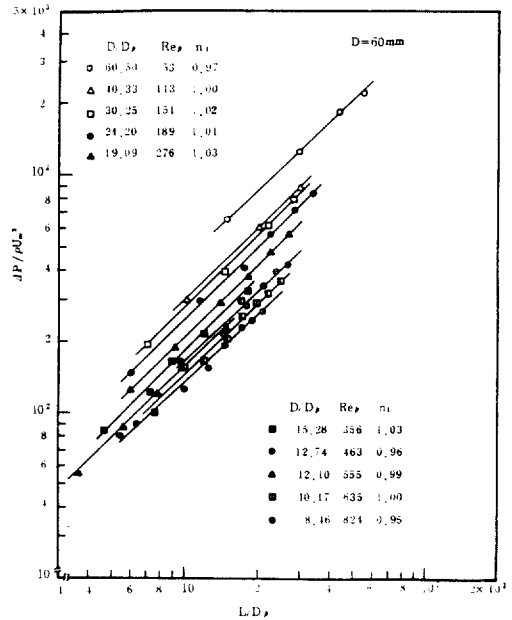


Fig.6 Pressure drop data obtained from cylindrical fixed bed (D=60mm)

-0.243이 되므로 式 (5)는 다음式으로 된다.

$$\frac{\Delta P}{\rho U_m^2} = 36.44 \cdot \left(\frac{L}{D_p}\right) \left(\frac{D}{D_p}\right)^{0.281} Re_p^{-0.243} \quad (6)$$

(30 ≤ Re_p ≤ 1900, 4.41 ≤ D/D_p ≤ 60.5)

式 (6)은 Fig. 7과 같이 모든 實驗值를 ± 15%의 精度로 만족하며 空隙率을 구하지 않고서도 壓力損失을 豫測할 수 있고 또한 베드 直徑 (D)을 변수로 취하고 있으므로 壁面領域의 바이패스 效果를 포함하고 있는 實驗式이라고 할 수 있다.

Fig. 8~ Fig. 11은 본 實驗式을 종래에 보고된 Ergun의 理論式¹⁾, Achenbach의 實驗式³⁾, Takahashi의 實驗式²⁾과 비교한 그림이다. D/D_p 값이 변화하면 空隙率이 變化하므로 본 實驗範圍에서는 D/D_p 값에 대한 4개의 條件에 대해서 比較한 結果, 본 實驗式은 대체로 從來의 關係式들 사이의 範圍內에 있으며 특히 Re_p < 200의 범위에서는 Ergun의 式에 접근하고 Re_p > 200의 範圍에서는 Achenbach의 式에 접근함을 알 수 있다.

Fig. 12는 본 實驗結果 (式 6)를 2重管式 熱交換器에 적용하기 위하여 環狀固定層內에서의 壓力損失에 대한 實驗結果와 式 (6)을 비교한 그림이다.

여기서 環狀固定層에 대한 有效直徑 (effective diameter), D_e는 다음과 같이 계산된다.

$$D_e = \frac{4A}{P} = \frac{4 \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2)}{\pi (D_o + D_i)} = D_o - D_i \quad (7)$$

여기서 A는 流動 斷面積이고, P는 接水周 邊길이 (wetted perimeter)이다.

따라서 式 (6)의 D 대신에 D_e를 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta P}{\rho U_m^2} = 36.44 \cdot \left(\frac{L}{D_p}\right) \left(\frac{D_e}{D_p}\right)^{0.281} Re_p^{-0.243} \quad (8)$$

(70 ≤ Re_p ≤ 1200, 5.60 ≤ D_e/D_p ≤ 33.33)

Fig. 12에서 알 수 있는 바와 같이 式 (8)은 ± 15% 範圍內에서 實驗值를 만족한다. 따라서 式 (6)과 式 (8)로부터 摩擦係數 f는 다음

式으로 표시된다.

(1) 圓筒形 固定層의 경우

$$f = \frac{1}{2} \frac{\Delta P}{\rho U_m^2} \frac{D_p}{L} = 18.22 \cdot \left(\frac{D}{D_p}\right)^{0.281} Re_p^{-0.243} \dots\dots\dots (9)$$

(2) 環狀固定層의 경우

$$f = \frac{1}{2} \frac{\Delta P}{\rho U_m^2} \frac{D_p}{L} = 18.22 \cdot \left(\frac{D_e}{D_p}\right)^{0.281} Re_p^{-0.243} \dots\dots\dots (10)$$

式 (9)에서 摩擦係數 f가 D/D_p와 Re_p의 函數로 표시되는 것은 종래의 關係式^{1,2,3)}에서 f를 空隙率 ε과 Re_p의 函數로 표시한 것과 對應된다.

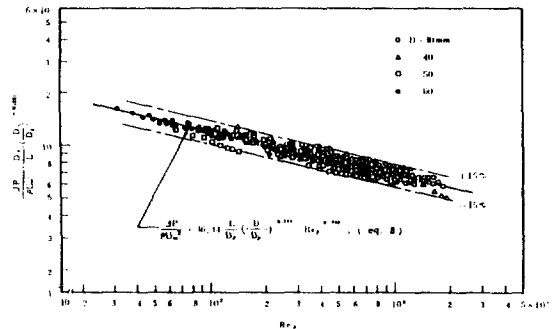


Fig. 7 Dimensionless correlation of pressure drop in cylindrical fixed bed.

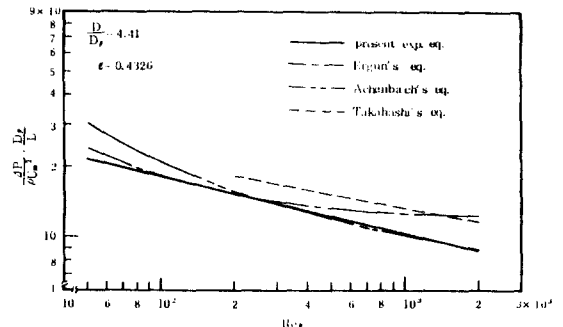


Fig. 8 Comparison of present experimental equation with previous equations, (D/D_p = 4.41, ε = 0.4326).

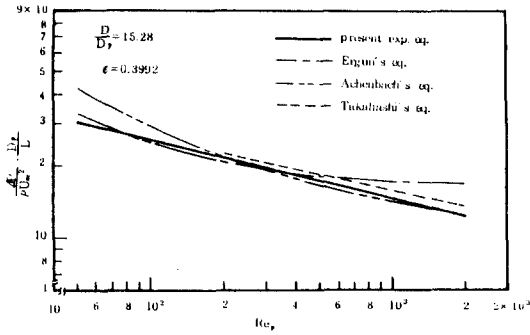


Fig. 9 Comparison of present experimental equation with previous equations, ($D/D_p = 15.28$, $\epsilon = 0.3992$).

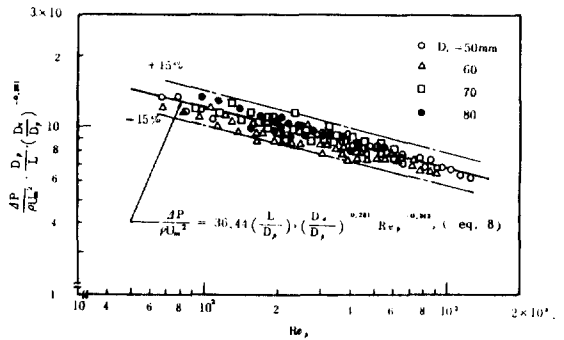


Fig. 12 Dimensionless correlation of pressure drop in annular fixed beds.

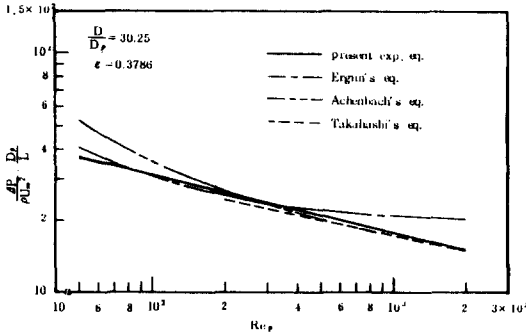


Fig. 10 Comparison of present experimental equation with previous equations, ($D/D_p = 30.25$, $\epsilon = 0.3786$).

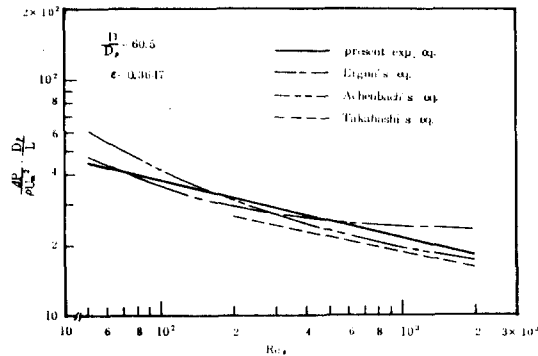


Fig. 11 Comparison of present experimental equation with previous equations, ($D/D_p = 60.5$, $\epsilon = 0.3647$).

4. 結 論

鋼球가 充填된 垂直型 圓筒狀 및 環狀의 固定層內를 흐르는 空氣의 壓力損失에 對한 實驗을 한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 圓筒形 固定層內에서의 壓力損失에 對한 實驗式은 空隙率 대신에 粒子直徑과 베드直徑의 比로 나타낼 수 있으며 다음과 같은 無次元式으로 定立되고 $\pm 15\%$ 의 精度에서 實驗値를 만족한다.

$$\frac{\Delta P}{\rho U_m^2} = 36.44 \cdot \left(\frac{L}{D_p}\right) \left(\frac{D_p}{L}\right)^{0.281} Re_p^{-0.243}$$

($30 \leq Re_p \leq 1900$, $4.41 \leq D/D_p \leq 60.5$)

2) 環狀固定層內에서의 壓力損失은 圓筒形 固定層의 實驗式에서 베드直徑 (D) 대신에 有效直徑 (D_e)을 적용함으로써 $70 \leq Re_p \leq 1200$, $5.60 \leq D_e/D_p \leq 33.33$ 의 範圍에서 $\pm 15\%$ 의 精度로 實驗値를 만족한다.

後 記

이 論文은 1986年度 韓國學術振興財團 自由公募課題 學術研究助成費에 의해서 1989년까지 3個年間 研究된 것이며 韓國學術振興財團에 感謝드립니다.

參 考 文 獻

1. S. Ergun, "Fluid Flow through Packed Columns.", Chem. Eng. Progr., Vol. 48, pp. 89-94, 1952.
2. T. Takahashi, Y. Akagi and K. Ueyama, "A New Correlation for Pressure Drop of Packed Column.", J. of Chem. Eng. of Japan, Vol. 12, pp. 341-346, 1979.
3. E. Achenbach, "Heat Transfer and Pressure Drop Pebble Beds up to High Reynolds Number.", Proc. of Int. Heat Transfer Conference, Vol. 6, pp. 3-8, 1982.
4. R.F. Benenati and C.B. Brosilow, "Void Fraction Distribution in Beds of Spheres.", AIChE J., Vol. 8, pp. 359-361, 1962.
5. J.S.M. Botterill and A.O.O. Denloye, "A theoretical Model of Heat Transfer to a Packed or Quiescent Fluidized Bed.", Chem. Eng. Sci., Vol. 33, pp. 509-515, 1978.
6. N. Decker and L. Glicksman, "A Simplified Model for Heat Transfer from A Cylinder Immersed within a Packed Bed.", Chem. Eng. Sci. Vol. 35, pp. 831-835, 1980.