

## 充填層에서의 局部有效熱傳導率에 關한 實驗的 研究

An Experimental Study on the Local Effective Thermal Conductivity  
in Packed Bed

李鍾洙\*, 梁漢柱\*\*, 崔國光\*\*\* 徐正閏\*\*\*\*  
J.S. Lee, H.J. Yang, K.K. Choi, J.Y. Seo

### ABSTRACT

In this paper, the local effective thermal conductivities are calculated by using the actual temperature distribution in packed bed. The variations of these are investigated for radius and air stream direction, flow rate and particle diameter. The resulting local effective thermal conductivities are classified in the inner zone of bed and vicinity zone of the wall surface. Also these are related to dimensionless axial direction position, radius direction position, and particle diameter and Reynolds number which uses particle diameter as the characteristic length. If these correlations are represented by function, the equation is showed in Eq. (3.4). This equation is well satisfied with experimental results within  $\pm 25\%$ .

### Nomenclature

|         |   |        |  |
|---------|---|--------|--|
| $C_p$   | : constant pressure specific heat [KJ/kg. K]                | $r_b$  | : radius of bed [mm]                                       |
| $D_p$   | : particle diameter [mm]                                    | $r_h$  | : radius of heater [mm]                                    |
| $D_p^*$ | : dimensionless particle diameter<br>$[=D_p/(r_b-r_h)] [-]$ | $r^*$  | : dimensionless radius $[=(r-r_h)/(r_b-r_h)]$<br>[-]       |
| $G$     | : mass flow rate [ $\text{Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ]  | $T$    | : temperature [K]  |
| $K_e$   | : effective thermal conductivity<br>[W/m·K]                 | $u$    | : superficial velocity of air [m/s]                        |
| $K_g$   | : thermal conductivity of air [W/m·K]                       | $Z$    | : position of axial direction [mm]                         |
| $r$     | : radius [mm]   | $Z^*$  | : dimensionless height of bed $[=Z/r_b-r_h]$               |
|         |   | $\rho$ | : density of air [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]                |
|         |   | $\mu$  | : absolute viscosity [ $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ ] |

\* 仁川大學 大學院

\*\* 東洋工業専門大學

\*\*\* 仁川大學 機械工學科

\*\*\*\* 仁荷大學校 機械工學科

## 1. 結 論

充填層은 觸媒反應爐, 乾燥裝置, 蕎熱槽, 热交換器 등 工業分野에 광범위하게 利用되고 있으며 특히 傳熱裝置에 있어서는 傳熱面積의 增大, 亂流擴散效果 등으로 인한 热傳達增進效果가 注目된다.<sup>1-6)</sup>

充填層에서의 傳熱特性은 傳熱面과 層內를 흐르는 氣體사이의 热傳達係數 및 層內部의 有效熱傳導率에 대해 考察하는 것이 일반적이며 充填粒子의 크기, 材質, 形狀, 充填方法, 氣體의 热的, 物理的 特性, 流量 등 많은 變數가 영향을 미치기 때문에 理論的 解析보다는 주로 實驗的 研究가 진행되고 있다.

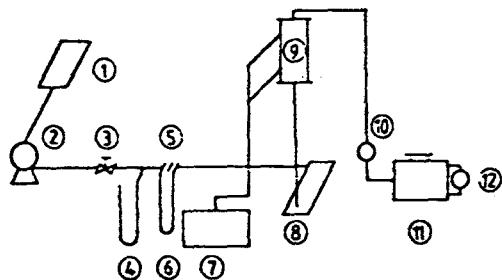
有效熱傳導率의 概念은 層內의 溫度分布를 豫測할 수 있다는 점에서 매우 有用하며 J. M. Smith 등<sup>7)</sup>은 高溫空氣가 흐르는 圓筒形充填層內의 局部有效熱傳導率을 實驗的으로 구하여  $(r/r_b) = 0.8$ 인 位置를 제외하고는 모든 半徑方向 position에서의 有效熱傳導率이 거의 類似한 값을 갖는다는 결과를 얻었으나, 溫度勾配의 幾何學的 解析으로 인한 誤差가 클 것으로 생각되며 또 粒子크기, 流量 등의 영향을 구체적으로 考察하지 않았다. Yagi와 Kunii<sup>8,9)</sup>는 充填層內에서의 平均有效熱傳導率을 氣體流動에 관계없는 項과 亂流擴散에 의한 項의 합으로 표시되는 半理論式을 提示하였고 Gabor,<sup>10)</sup> Botterill 등,<sup>5)</sup> Decker 등<sup>6)</sup>은 充填層內에 傳熱面이 插入된 경우에 대한 傳熱特性의 解析모델을 提示하였다.

그러나 充填層內에 傳熱面이 插入된 경우 層內의 局部有效傳導率에 대한 구체적인 研究結果는 발표된 바 없다. 따라서 本 研究에서는 垂直圓筒形 斷熱壁內의 球狀粒子充填層 中心에 傳熱管을 설치하고 그 주위를 空氣가 흐를 때 局部有效熱傳導率을 實驗的으로 구하고 各種 因子가 有效熱傳導率에 미치는 영향을 明確하고자 한다.

## 2. 實驗裝置 및 實驗方法

### 2.1 實驗裝置

本 實驗에 사용된 裝置의 概略圖는 Fig.2-1와 같다.

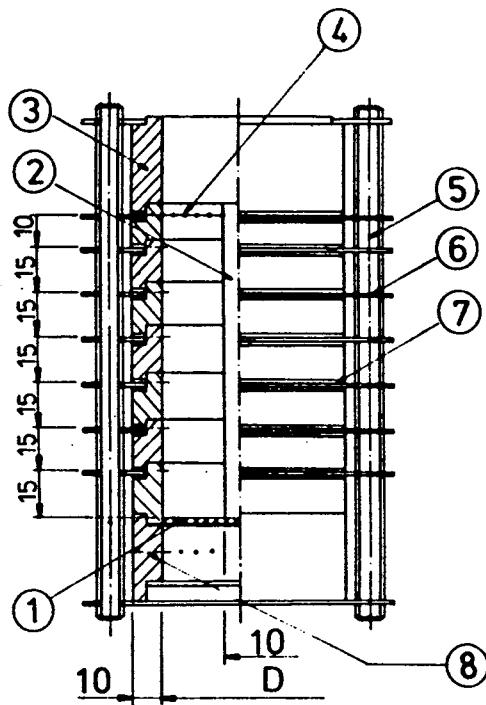


- |                     |                   |
|---------------------|-------------------|
| (1) Air Filter      | (7) Date Logger   |
| (2) Blower          | (8) Air Chamber   |
| (3) Discharge Valve | (9) Packed Bed    |
| (4) Manometer       | (10) Ampere Meter |
| (5) Orifice         | (11) Slidac       |
| (6) Manometer       | (12) Volt Meter   |

Fig.2-1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

空氣濾過器(1), 送風機(2)를 通過한 空氣는 流量調節밸브(3)에 의해 流量가 調節되고 空氣室(8)을 지나 均一한 流速으로 充填層(9)에 流入된다. 이 때 流量은 오리피스(5)와 液柱計(4, 6)을 利用하여 測定되며 充填層內의 溫度測定에는 Data Logger(Fluke 2240 C, U.S.A)(7)이 사용되었다. 電流計(10), 電壓調節器(11), 電壓計(12)를 사용하여 充填層內에 插入된 加熱器에 一定熱量이 供給되도록 調節하였다.

Fig. 2-2는 充填層의 詳細圖이다. ①은 充填粒子를 支持하기 위한 鐵網이며 ②는 棒形加熱器( $220\text{ W} \times 120\text{ V}, \phi 10 \times 100^\circ$ )이다. 圓筒形壁面③(內徑  $60\text{ mm}$ )은 斷熱效果가 強호한 배크라이트(Bakelite)로 되어 있으며 軸方向으로는 热電對를 여러 위치에 插入할 수 있도록 數段으로 組立되어 있다. ④는 半徑方向의 热電對( $C-C, \phi 70\mu\text{m}$ ) 插入位置를 나타내는데 그 간격은  $1, 4, 5, 5, 4, 1 [\text{mm}]$ 이며 軸方向插入位置는 圖示한 바와 같이  $15 [\text{mm}]$  간격이다.



(1) Stainless Screen    (5) Bolt  
 (2) Heater                (6) Flange  
 (3) Bed                  (7) Packing  
 (4) Thermocouple Position    (8) Thermocouple Hole

Fig.2-2 Detail of Packed Bed

⑤, ⑥은 조립을 위한 볼트(Bolt) 및 플랜지(Flange)이고 ⑦은 패킹(Packing), ⑧은 입구空氣溫度를 测定하기 위한 热傳對插入口이다.

## 2.2 實驗方法

斷熱圓筒의 中心에 加熱器를 軸方向으로 設置하고 그 주위에 鋼球를 充填하면서 热電對를 插入한 후 送風機를 가동시켜 充填層內에一定流量이 流入되도록 流量調節밸브로 調節하였다. 그리고 加熱器에는  $50V \times 0.91A$ 의 일정한 热量이 供給되도록 電壓調節器로 調節하였고 層內의 溫度分布를 5分간격으로 Data Logger에서 記錄하였다. 各位置에서의 溫度變化가 없는 狀態를 定常狀態로 보며 定常狀態에 도달하기까지는 流量, 粒子크기, 外氣溫

度 등에 따라 約 30分~2時間이 소요되었다. 流量은 한 粒子크기에 대하여 6~8회(流量範圍;  $0.85 \sim 2.4 kg/m^2 \cdot s$ ) 變化시켰으며  $\phi 1.5$ ,  $\phi 2.5$ ,  $\phi 3.96$ ,  $\phi 4.75$ ,  $\phi 5.95$ ,  $\phi 7.15$  등 6種의 粒子크기에 대하여 반복하여 實驗하였다.

## 3. 實驗結果 및 考察

### 3.1 有效熱傳導率의 計算

有效熱傳導率의 計算은 다음과 같은 假定에 基礎를 둔다.

- (1) 热移動은 傳熱面으로부터 半徑方向으로 부터 定常熱傳導에 의해서 일어난다.
- (2) 傳熱面에서 발생된 热은 모두 層內를 흐르는 空氣에 의해서 外部로 除去된다.
- (3) 軸方向의 热傳導는 空氣流動으로 인한

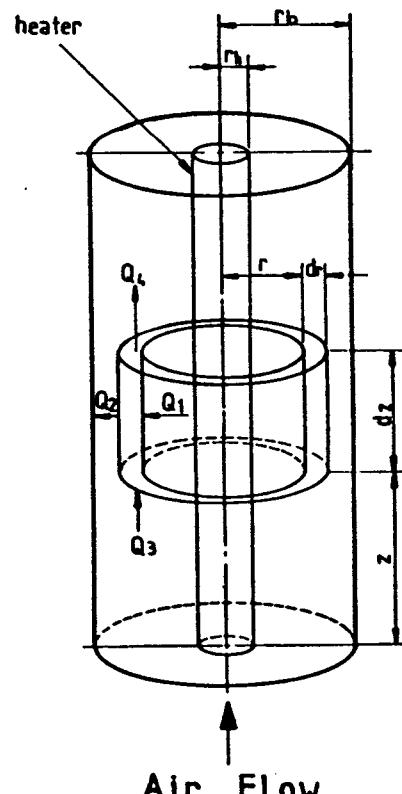


Fig.3-1 Model for Heat Balance between an Immersed Cylindrical Surface and a Packed Bed

엔탈피 移動에 비하여 작으므로 무시한다.

(4) 空氣流速은 層內의 全斷面에 걸쳐 均一하다.

(5) 層內의 임의의 위치에서 粒子 및 空氣의 溫度는 같다.

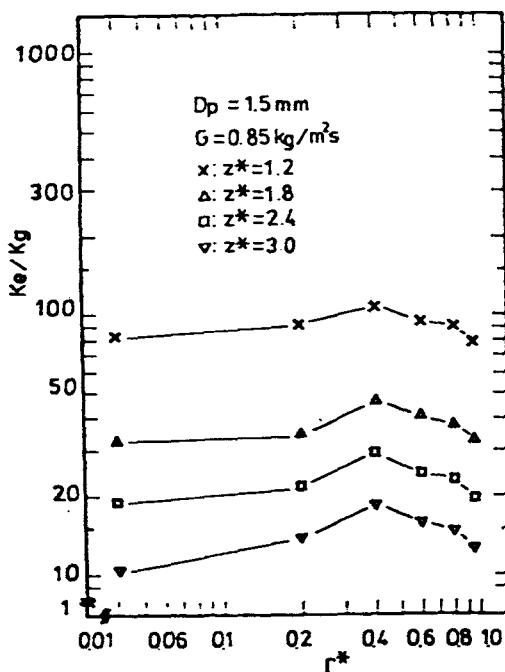
(6) 空氣의 熱的, 物理的 特性(密度, 比熱, 粘性係數, 热傳導率)은 層內의 平均溫度에 대한 값으로 한다.

上記假定에 의하면 Fig.3-1에서 半徑方向의 傳導에 의한 移動熱量은 軸方向으로의 對流에 의한 移動熱量과 같으므로 다음과 같은 热平衡式을 얻을 수 있다.

$$GC, \frac{\partial T}{\partial z} = K_e \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

따라서 有效熱傳導率  $K_e$  는

$$K_e = \frac{CC_p \frac{\partial T}{\partial Z}}{\left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right)} \quad \dots \dots \dots \quad (3-1)$$

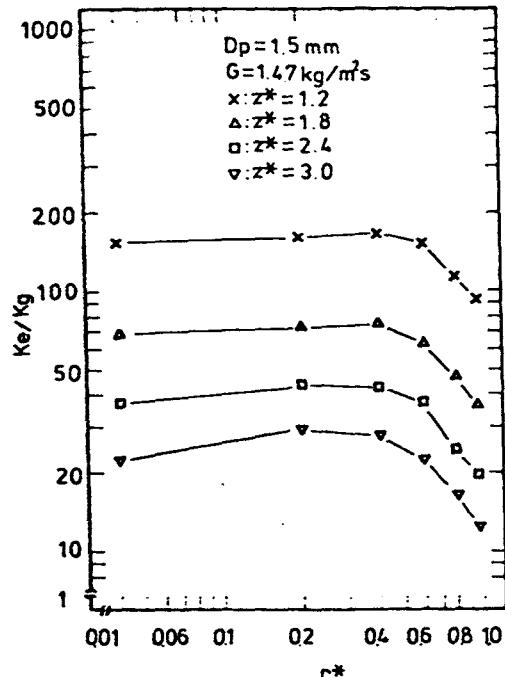


**Fig.3-2 Correlation of Dimensionless Local Effective Thermal Conductivity and Dimensionless Radius**

### 3.2 實驗結果에 대한 考察

實驗的으로 구한 層內의 溫度分布를 利用하여 數值解析法으로  $\partial T / \partial r$ ,  $\partial^2 T / \partial r^2$ ,  $\partial T / \partial z$  을 구하고 式(3-1)에 代入하여 局部有效熱傳導率를 계산하였다. 그 結果의 一例를 圖示하면 Fig. 3-2 ~ Fig. 3-3 과 같으며 여기서 有效熱傳導率  $K_e$  的 表示는 空氣의 热傳導率  $K_g$  를 써서 無次元化하였다.

Fig. 3-2 는 粒子直徑 1.5 [mm], 流量 0.85 [ $kg/m^3 \cdot s$ ]인 경우로서 有效熱傳導率은  $r^* = 0.4$ 인 位置에서 最大가 되며 傳熱面 ( $r^* = 0$ ) 및 圓筒壁面 ( $r^* = 1$ ) 近傍으로 接近할수록 낮은 값을 나타내고 있다. 이것은 壁面近傍의 空隙率이 層內部보다 크기 때문에<sup>3, 5, 6)</sup> 이 區域에서는 대부분의 热量이 이 區域을 지나는 空氣의 溫度를 상승시키는데 이용되고 아주 작은 热量만이 半徑方向으로 移動된다. 결국 壁面近傍에서의 큰 空隙率은 半徑方向으로



**Fig.3-3 Correlation of Dimensionless Local Effective Thermal Conductivity and Dimensionless Radius**

의 空氣混合을 방해 함으로써 傳熱抵抗을 상승시켜 낮은 有效熱傳導率를 초래하게 되며 이 것은 充填層內의 有效熱傳導率이 주로 流體混合效果에 기인한다는 Rane<sup>11)</sup>의 研究結果와도 일치한다.

Fig. 3-3은 流量을  $1.47 [kg/m^2 \cdot s]$ 로 增加시킨 경우로서 각 位置에서의 有效熱傳導率이 Fig. 3-2의 경우보다 높은 값을 나타내고 있으며  $r^* = 0.04 \sim 0.4$ 인 區域에서는 각  $Z^*$ 에 있어서  $r^*$ 에 관계없이 거의 같은 값을 나타내고 있다는 점이 注目된다. 이것은 流量이 增加함에 따라 半徑方向으로의 流體混合이 활발히 이루어져서 有效熱傳導率이 增加하는데 그 effect는 溫度勾配가 큰 領域( $r^* = 0.04$ )일수록 더 크기 때문이라고 생각된다. 이와같은 傾向은 모든 粒子크기에 대해서 나타난다.

Fig. 3-4는 軸方向位置( $Z^*$ )의 變化에 따른 有效熱傳導率의 變化를 나타낸 것이다.  $Z^*$ 가 增加함에 따라 즉 層의 入口로부터 軸方向거리가 멀어질수록 有效熱傳導率이 減少하고 있

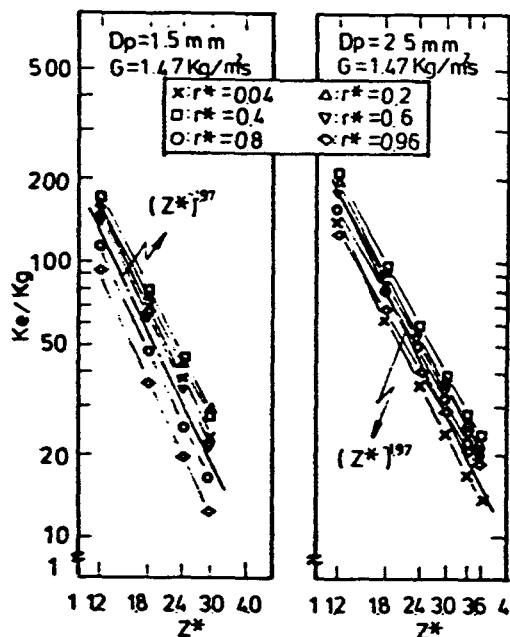


Fig.3-4 Correlation of Dimensionless Local Effective Thermal Conductivity and Dimensionless Bed height

으며 그 減少率은 각 半徑方向位置( $r^*$ )에서 거의 같음을 알 수 있다. 이 特性은 Quinton 등<sup>3)</sup>의 研究結果와도 符合되는데 그는 軸方向位置變化에 따라 有效熱傳導率이 變化하는 領域을 入口領域이라고 하였으며 이 領域에서는 半徑方向으로의 流體混合이 충분히 이루어지지 않기 때문에 軸方向溫度勾配가 變化한다고 하였다. Quinton 등에 의하면 入口領域은 層入口로부터 層直徑의 約 6倍가 되는 領域이며 本實驗範圍도 이 領域에 해당한다.

Fig. 3-4와 같은 傾向은 모든 粒子크기 및 流量變化에 대하여 나타났으며 有效熱傳導率은 대략  $(Z^*)^{1.97}$ 에 比例하여 減少함을 알 수 있었다. 따라서 縱軸에  $(K_e/K_g)(Z^*)^{1.97}$ 을 취함으로써  $Z^*$ 의 영향이 포함된 有效熱傳導率을 나타낼 수 있으며 一例로서 粒子直徑( $D_p$ )  $1.5 [mm]$ 인 경우를 Fig. 3-5에 圖示한다. 그림에 나타난 바와같이 Data들은 각 流量別로  $Z^*$ 에 관계없이 잘 집중되고 있으며 다른 粒

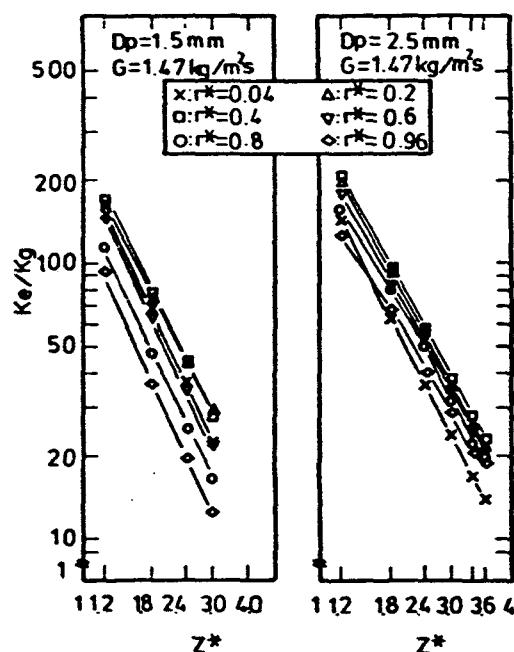


Fig.3-5 Correlation of Dimensionless Local Effective Thermal Conductivity, Bed Height and Dimensionless Radius for Various Reynolds Numbers

子크기에 대해서도 같은 경향임을 알 수 있었다.

Fig. 3-6 은  $r^* = 0.04$ 인 位置에서 粒子直徑을 特性길이로 하는 Reynolds 數( $= \rho u D_p / \mu$ )에 대하여 有效熱傳導率를 나타낸 것이다.

粒子크기에 따라 각각 다른 값을 나타내고 있으나  $R_e$ 가 增加함에 따른 有效熱傳導率의 增加率은 거의 같음을 알 수 있으며 이들 關係의 一般性은 다음 式으로 定立된다.

$$K_e/K_g = a \phi R_e^N (Z^*)^{-1.97} \dots \dots \dots \quad (3-2)$$

여기서,  $\phi = e^{(0.12 D_p^*)}$

$$N = 1.35$$

$a$  = 常數

$r^* = 0.2 \sim 0.96$  인 位置에서는 Fig. 3-7 과 같이 粒子直徑에 관계없이 각  $r^*$ 에 대하여 일정한 값을 나타내며  $r^*$ 가 增加할수록 그 增加率이 減少한다. 따라서 이 位置에서는 式 (3-2)의  $\phi$ 가 1이 되며  $N$ 값과  $r^*$ 의 關係를 나타내면 Fig. 3-8 과 같고 다음 式으로 표시된다.

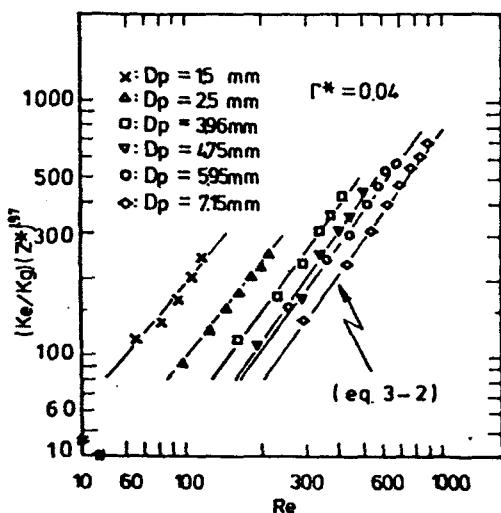


Fig. 3-6 Relation between Dimensionless Local Effective Thermal Conductivity, Bed Height and Reynolds Number in Dimensionless Radius. 0.04

$$\begin{aligned} N = & -14.50(r^*)^6 + 42.04(r^*)^4 - 48.66(r^*)^3 \\ & + 27.92(r^*)^2 - 8.05(r^*) + 1.63 \dots \dots \dots \quad (3-3) \end{aligned}$$

또 局部有效熱傳導率은 式(3-2)의 常數  $a$

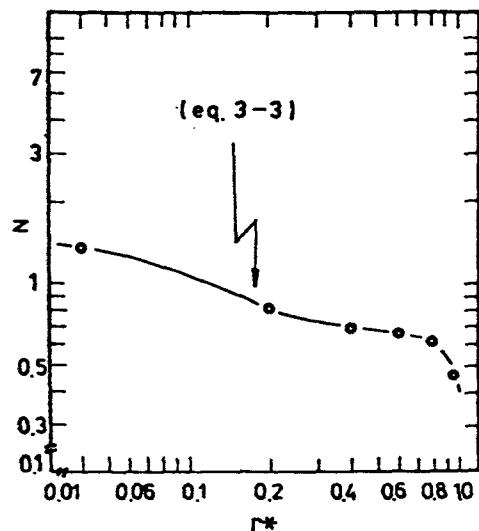


Fig. 3-7 Correlation of Power of Reynolds Number and Dimensionless Radius of Bed

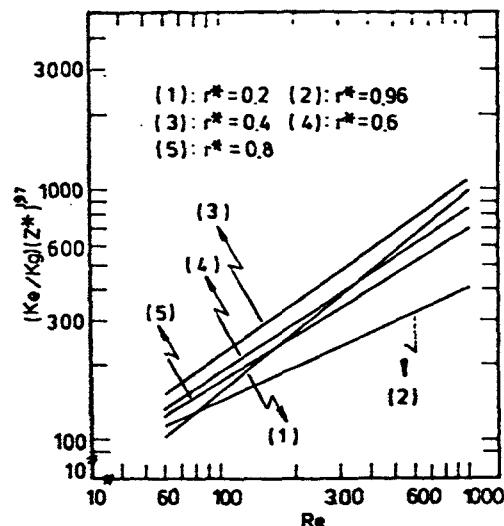


Fig. 3-8 Comparision of Relation between Dimensionless Effective Thermal Conductivity and Reynolds Number for All Dimensionless Radii

를  $r^*$ 의 함수로 나타내고  $F(r^*)$ 로 놓으면 다음 式으로 나타낼 수 있다.

$$K_e/K_g = \phi R_e^N (z^*)^{1.97} F(r^*) \quad \dots \dots \quad (3-4)$$

여기서,  $\phi = e^{(0.12/D_p)} ; r^* = 0.04$

$$\phi = 1 \quad ; \quad r^* = 0.2 \sim 0.96$$

$$F(r^*) = -277.29(r^*)^6 + 888.82(r^*)^4 \\ - 938.15(r^*)^3 + 374.35(r^*)^2 \\ - 28.13(r^*) + 0.63$$

따라서 充填層內에서의 局部有效熱傳導率에 미치는 粒子크기, 流量, 半徑方向 및 軸方向位置의 影響을 포괄적으로 나타내는 一般關係式은 式(3-4)와 같이 定立되며 Fig. 3-9에서와 같이  $\pm 25\%$ 範圍內에서 實驗值를 만족한다.

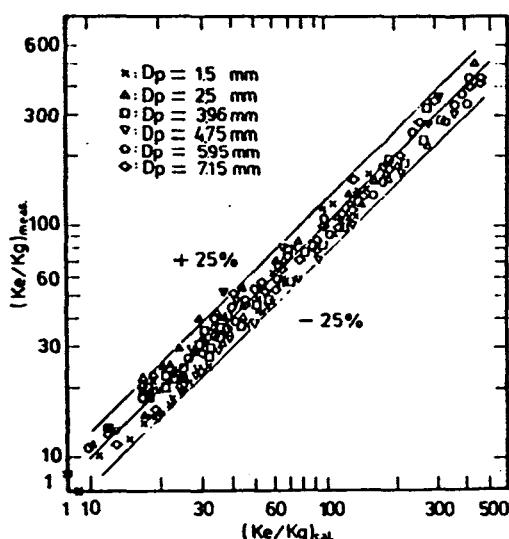


Fig. 3-9 Comparison of Effective Thermal Conductivity measured by Experimental Data and Calculated by Empirical Eq.

#### 4. 結論

圓筒形 球狀粒子充填層의 中心에 軸方向으로 傳熱面을 설치할 경우 層內에서의 局部有效熱傳導率에 關한 實驗에서 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 有效熱傳導率은 流量이 작을 경우  $r^* = 0.4$ 인 位置에서 最大值를 나타내고 壁面近傍으로 갈수록 減少하지만 流量이 增加함에 따라  $r^* = 0.04 \sim 0.4$ 인 位置에서는 거의 같은 值을 나타내고  $r^* = 0.96$ 인 位置로 갈수록 현저히 減少한다.

(2) 充填層入口로부터 軸方向거리가 增加함에 따라 有效熱傳導率  $(Z^*)^{1.97}$ 에 比例하여 減少한다.

(3) 有效熱傳導率은  $R_e$ 가 增加함에 따라 增加하는데 그 增加率은 半徑方向位置에 따라 다르며 溫度勾配가 큰 領域일수록 增大한다.

(4) 有效熱傳導率은 粒子크기, 流量, 半徑方向位置( $r^*$ ), 軸方向位置( $Z^*$ )와 함수관계가 있으며 그 關係式을 式(3-4)와 같고  $\pm 25\%$ 範圍內에서 實驗置를 만족한다.

#### REFERENCES

1. J.O. Hougen and E.L. Piret, "Effective Thermal Conductivity of Granular Solids through which Gases are Flowing", Chem. Eng. Progr., Vol. 47, No. 6, pp. 295-303, 1951.
2. D.F. Molino and J.O. Hougen, "Thermal Conductivity of Granular Solids through which Gases are Flowing", Chem. Eng. Progr., Vol. 48, No. 3, pp. 147-149, 1952.
3. J.H. Quinton and J. Anderson Storrow, "Heat Transfer to Air Flowing through Packed Tubes", Chem. Eng. Sci., Vol. 5, pp. 245-257, 1956.
4. W. Schotte, "Thermal Conductivity of Packed Beds", A.I. Ch. E.J., Vol. 6, No. 1, pp. 63-67, 1960.
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.
7. D.G. Bunnell, H.B. Irvin, R.W. Olson and J.M. Smith, "Effective Thermal Conductivities in Gas-Solid System", Ind. Eng. Chem., Vol. 41, No. 9, pp. 1977-1981, 1949.
8. S. Yagi and D. Kunii, "Studies on Effective Thermal Conductivities in Packed Beds", 日本化學工學, Vol. 18, No. 12, pp. 578-585, 1954.
9. S. Yagi and D. Kunii, "Studies on Effective Thermal Conductivities in Packed Beds", A.I. Ch. E.J., Vol. 3, No. 3, pp. 373-381, 1957.
10. J.D. Gabor, "Heat Transfer to Particle Beds with Gas Flows Less than or Equal to that Required for Incipient Fluidization.", Chem. Eng. Sci., Vol. 25, pp. 979-984, 1970.
11. W.E. Ranz, "Friction and Transfer Coefficients for Single Particles and Packed Beds", Chem. Eng. Progr., Vol. 48, No. 5, pp. 247-253, 1952.