

流動層內的 粒子的 運動狀態 및 熱傳達

都 東 燮*

Particle Movements and Heat Transfer in a Gas Fluidized Bed

Dong Sup Doh

College of Science and Engineering, Korea University

Abstract

The movements of silica-alumina particles in a gas fluidized bed of 28 cm I.D. were studied with a modified thermistor probe. The probe developed in this study was found to be able to measure the mass velocity and direction of particle flow in a fluidized bed.

Particles moved upwards near the center of the bed and downwards near the wall. The magnitude of the mass velocity and the cross-sectional area through which the particles move upwards increased with increasing air velocity and position from the bed support.

The profiles of heat transfer coefficient between the surface of a small heating element and the bed were found to be very similar to those of particle velocity, which explains that the heat is transferred mainly by the movements of solid particles and the effect of fluid is minor.

1. 緒 論

流動層內的 粒子的 運動狀態를 調査함으로써 流動化機構를 說明하려는 研究는 現在까지 많이 報告되어 있다. 이를테면, 寫眞撮影에 依하여 壁附近의 粒子運動速度를 測定하는 方法^(1,2), 層上部에 着色된 粒子를 뿌려 놓고 이 粒子들이 層全體에 均一하게 分散되는 데 所要된 時間을 測定하는 方法⁽³⁾, 放射線 同位元素를 使用하여 測定하는 方法^(4,5), 한 쌍의 thermistor를 Probe로 하여 測定하는 方法⁽⁶⁾ 등이다.

위의 境遇들은 粒子的 運動을 直接 測定한 例이지만 이 밖에도 氣泡의 舉動^(7,8,9), 層內的 密度變動⁽¹⁰⁾ 등 다른 觀點에서 流動化狀態를 說明하려는 研究가 있고, 實驗 data의 蓄積과는 關係 없이 運動方程式에서부터 出發하여 現象을 記述하려는 努力이 계속되고 있다^(11,12,13).

本研究에서는 流動化機構를 說明하는 한 方法으로서 改良된 thermistor probe로 氣固系流動層內的 粒子的

運動狀態를 調査하고, 또 層內에 固定한 작은 發熱體表面과 層間的 熱傳達係數를 測定하여 粒子運動狀態와의 關係를 檢討하였다.

2. 實驗裝置 및 方法

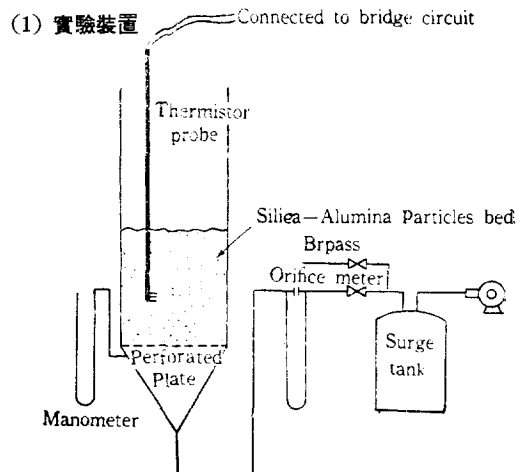


Fig.1 Diagram of Fluidization Equipment

*高麗大學校 理工大學 化學工學科

本實驗에 使用한 裝置는 Fig. 1에 表示되어 있는 바와 같은 內徑 28 cm, 높이 70 cm 의 鐵製圓筒이다. 氣體分散板은 pitch 30 mm의 三角配列로 徑 1.5 mm의 구멍이 61個, 밑部分에 200 mesh의 金屬網을 붙인 多孔板으로 開孔比가 0.175 %이다

固體粒子로는 silica-alumina 粉末을 使用하였고 이의 物理的性質은 Table 1에 表示되어 있는 바와 같다.

Table 1. Physical Properties of Silica-Alumina Particles

Mean Particle Diameter	0.639 mm
True Particle Density	2.0 g/cc
Bulk Density	0.58 g/cc
Shape	angular
Minimum Fluidization Velocity	3.5 cm/sec

檢知裝置의 主要部分인 檢知端은 外徑이 2 mm, 길이 가 20 mm, 끝部分이 半球形인 glass thermistor 세個로 되어 있다. 이의 詳細圖과 物理的特性은 各各 Fig. 2와 Table 2에 表示되어 있다.

Table 2. Glass Thermistor Specifications

Type	CS-252k, TOA Elect. Co.
Resistance, at 25°C	2800 ohm

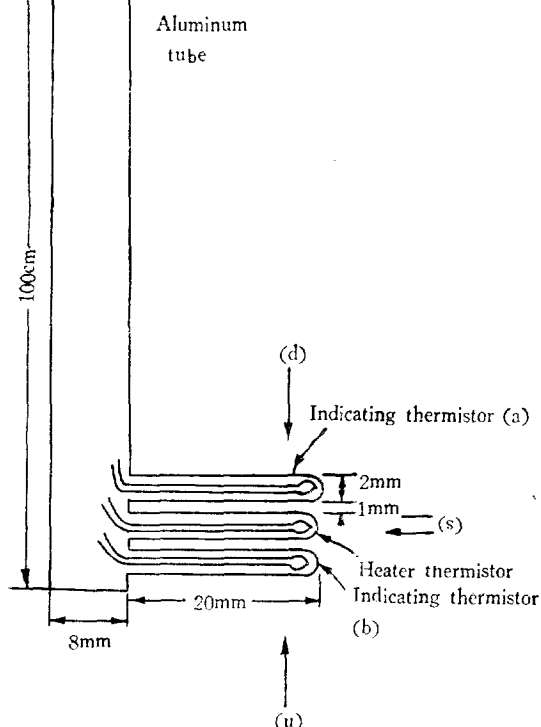


Fig. 2 Drawing of Thermistor Probe

Temp. Coeff. of Resistance $-2.9 \%/^{\circ}\text{C}$

B-constant 2600 °k

Max. Permissible Temp. 200 °C

(2) 測定原理 및 方法

Thermistor probe의 測定原理는 熱線風速計의 原理와 類似하나 여기에 方向性을 갖도록 한 것이다. Fig. 2에 表示되어있는 thermistor probe에서 中心部의 thermistor (heater thermistor)를 電氣的으로 加熱하여 流動層 또는 氣流中에 固定시켜 놓으면 抵抗은 變化할 것이지만 이것의 抵抗變化를 測定하는 代身에 隣接한 thermistor (indicating thermistor)의 抵抗變化를 測定

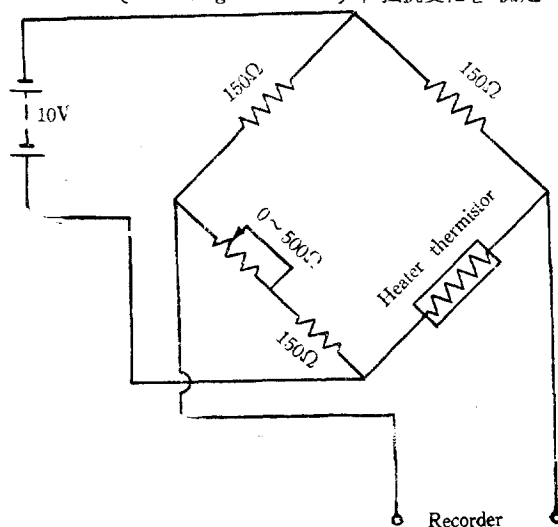


Fig. 3-a Diagram of Bridge Circuit for Heater Thermistor

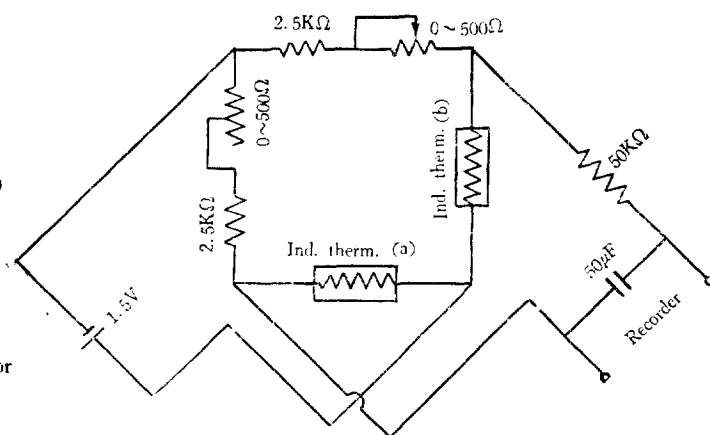


Fig. 3-b Diagram of Bridge Circuit for Indicating Thermistor

한다.

Heater thermistor와 indicating thermistor의 抵抗變化를 測定하기 爲한 bridge回路는 Fig. 3-a 및 3-b와 같다.

Thermistor probe의 作用은 heater thermistor에서부터 indicating thermistor으로 移動하는 熱에 依하여 이루어진다. Heater thermistor를 bridge回路의 印加電壓을 調節함으로써 自己發熱시켜 約 100°C의 一定한 溫度를 維持하도록 한다.

粒子的 運動方向이 Fig. 2의 (u)方向인 境遇 卽 heater thermistor에서부터 indicating thermistor (a) 쪽으로 運動할 境遇에는 heater thermistor에 依하여 加熱된 粒子들은 그 熱을 indicating thermistor (a)에 傳하게 되고 卽차서 抵抗値는 減少될 것이다. 이 때 indicating thermistor (b)에는 輻射와 傳導에 依한 熱傳達이 있을 뿐이고 이것은 粒子的 運動方向에 關係 없이 indicating thermistor (a)에도 똑같은 量이 傳達될 것이므로 輻射 및 傳導에 依한 寄與는 서로 相殺되어 bridge回路의 出力은 粒子的 對流에 依한 熱移動만에 對應할 것이다.

粒子的 運動方向이 反對인 境遇 卽 Fig. 2의 (d)方向인 境遇에는 indicating thermistor (b)의 抵抗이 減少

依한 熱移動만이 있을 뿐이며 이境遇 indicating thermistor (a)와 (b)에 對하여 똑같은 bridge回路에 連結된 記錄計의 scale reading은 零이 될 것이다.

(3) Thermistor Probe의 Calibration

Thermistor probe의 抵抗變化에 依한 scale reading과 質量速度와의 定量的인 關係를 調査하기 爲하여 內徑이 3 cm, 長이가 150 cm 되는 tube의 內部에 probe의 끝을 固定시켜놓고 空氣 및 粒子를 通過시키면서 scale reading의 變化를 測定하였다. 그 結果는 Fig. 4와 같다.

流動層內에서 thermistor probe로 運動速度를 測定함에 關與될 重要한 函數들은 流動層粒子自體의 物理的性質 外에도 粒子的 速度, 空氣의 速度, 層의 密度等으로 생각된다. 그러나 다음과 같은 세 가지 理由로 氣固系流動層內에서 thermistor probe는 實質적으로 固體粒子的 質量速度測定에만 寄與한다고 看做할 수 있다.

첫째로, scale reading이 質量速度의 函數로 表示되어 있고 本研究에 使用한 粒子的 粒보기 密度가 空氣密度의 500 배 以上이므로 空氣의 質量速度는 粒子的 質量速度에 比하여 無視할 수 있다.

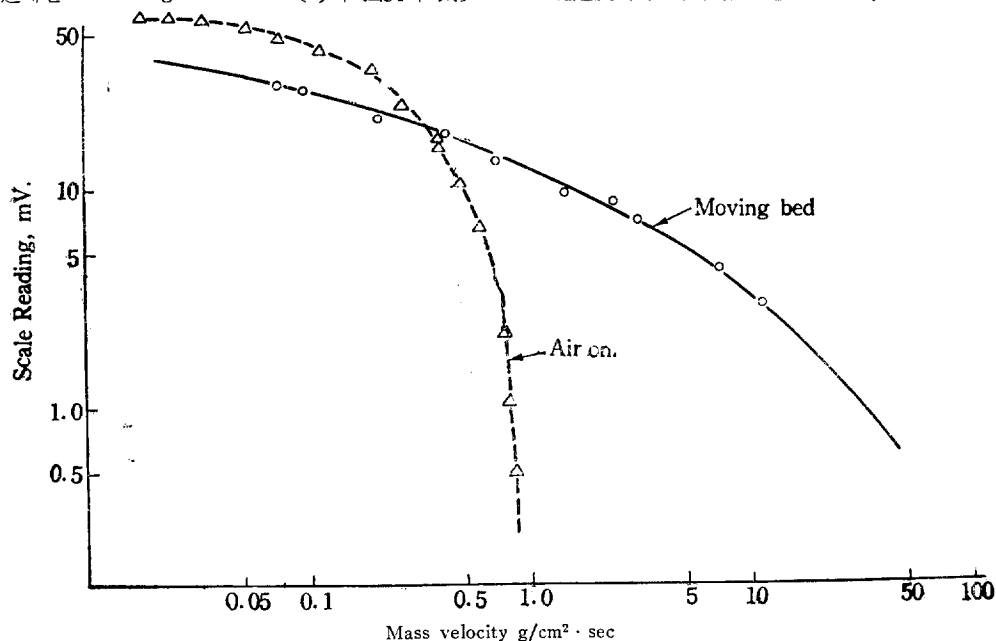


Fig. 4 Thermistor Probe Calibration Curve

되어 bridge回路의 出力은 (u)方向인 境遇의 正反對가 될 것이다. 粒子的 運動方向이 Fig. 2의 (s)方向인 境遇에는 對流에 依한 熱傳達은 없고 輻射와 傳導에

둘째로, Fig. 4에서 質量速度가 0.3g/cm² · sec 以上에서는 空氣의 質量速度가 scale reading에 미치는 影響이 粒子에 比하여 더 큰 것같이 보이나 空氣의 質量速

도로 $0.1 \text{ g/cm}^2\text{sec}$ 는 線速度로서는 95 cm/sec , 따라서 $0.3 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 는 285 cm/sec 에 該當되는 셈이다.

이렇게 큰 空氣의 速度는 本實驗의 範圍內에는 存在하지 않는다.

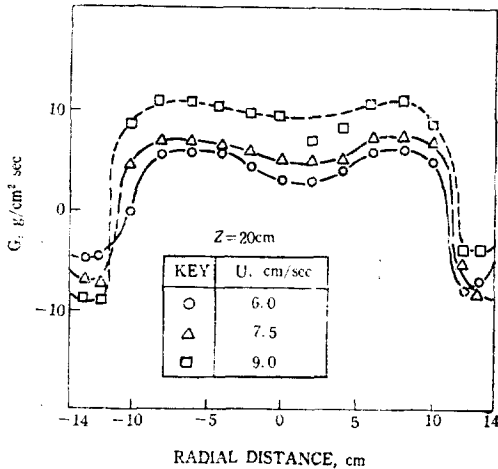


Fig. 5-a Radial Profiles for Different Superficial Air Velocities

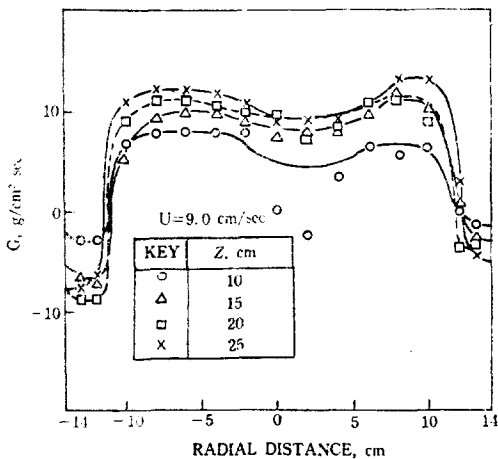


Fig. 5-b Radial Profiles for Different Positions from Gas Distributor

셋째로, 流動層內에서 가장 빠른 上昇運動을 하는 것으로 알려진 氣泡는 無視할 수 있을 程度의 粒子를 包含하고 있으며⁽¹⁴⁾, 層內全體粒子中 氣泡內에 分散되어 있는 粒子의 分率은 不過 $0.002 \sim 0.004$ 程度이다⁽¹⁵⁾.

따라서 實際로 流動層內의 質量速度의 calibration에는 Fig. 4의 實線을 使用하였다.

3. 實驗結果 및 考察

(1) 粒子運動速度의 半徑方向分布

粒子의 運動速度의 半徑方向分布를 調査하기 爲하여

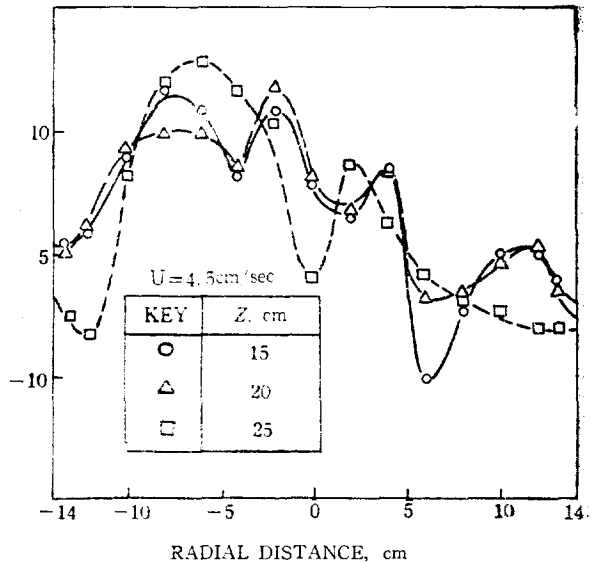


Fig. 5-c Radial Profiles for Different Positions from Gas Distributor with Very Low Air Velocity

停止層高 28 cm 의 流動層內에서 probe를 半徑方向으로 움직이면서 Probe의 分散板에서부터의 位置와 空氣의 速度를 各各 4 種을 擇하여 測定한 結果 Fig. 5-a, 5-b, 5-c와 같다.

그림에서 보는 바와 같이 空塔速度가 매우 작은 境遇(Fig. 5-c)를 除外하고는 粒子들은 層中心部에서는 上昇運動을 하고 壁附近에서는 下降運動을 하고 있음을 알 수 있다. 또한 上昇 및 下降의 質量速度의 크기와, 粒子의 上昇域의 크기는 空氣의 速度와 分散板에서부터의 距離가 增加함에 따라 增加하며, 層中心에서 壁 사이의 中間位置附近(半徑方向으로 7 cm 内外의 位置)에서 質量速度의 最大値를 나타내고 있다.

空氣의 流速이 U_{mf} (流動化의 開始速度)보다 조금만 더 큰 境遇(Fig. 5-c)에는 粒子의 一定한 flow pattern 이 없고 半徑方向의 位置에 關係 없이 氣泡가 上昇하는 部分에서만 氣泡에 따라 上昇하고 氣泡가 存在하지 않는 處에서는 不降하고 있다.

(2) 粒子運動速度와 空氣速度 및 軸方向位置와의 關係

粒子의 運動速度는 空氣의 流速 및 分散板에서부터의 距離의 增加와 더불어 增加하고 있으나 이들의 定量的인 關係를 알아 내기 爲하여 空氣速度의 影響과 位置의 影響을 個別的으로 分析하여 이를 綜合해 보기로 한다.

a) 空氣速度的 影響 : Fig. 6-a 에서 보는 바와 같이 空氣速度를 無次元速度인 U/U_{mf} 로 表示하고 質量速度를 그의 平均值 \bar{G} 로 表示하면 \bar{G} 는 U/U_{mf} 의 1.5 乘에 比例하여 增加함을 알 수 있다.

b) 軸方向位置의 影響 : Fig. 6-b에서 보는 바와 같이

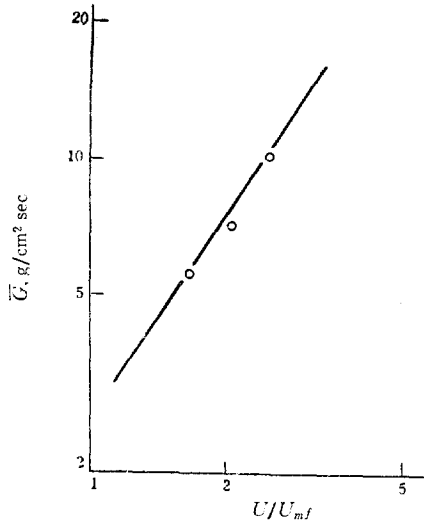


Fig. 6-a Effect of U/U_{mf} on \bar{G}

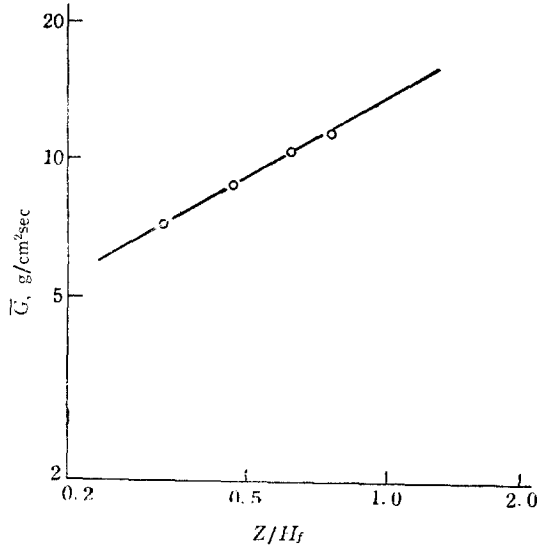


Fig. 6-b Effect of Z/H_f on \bar{G}

分散板에서부터의 距離를 無次元距離인 Z/H_f 로 表示하고 \bar{G} 는 實驗値와 같은 값을 取하면 \bar{G} 는 Z/H_f 의 0.5乘에 比例하여 增加함을 알 수 있다. 以上の 結果를 綜合하여 空氣를 流動化流體로 使用하는 流動層에서 粒子의 平均質量速度 \bar{G} 의 實驗値는 Fig. 7에 表示된 바와 같이 다음과 같은 實驗式으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{G} = 3.2 (U/U_{mf})^{1.5} (Z/H_f)^{0.5} \dots \dots \dots (1)$$

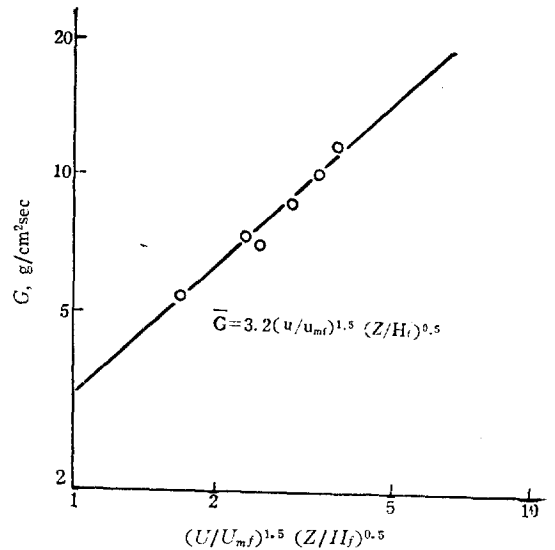


Fig. 7 Empirical Equation of Average Mass Velocity

(3) 粒子運動速度的 角方向分布

粒子의 運動狀態의 軸에 對한 對稱性如否를 調査하기 爲하여 probe를 分散板에서부터 20 cm, 層軸에서부터 半徑方向으로 10 cm되는 곳에 位置하게 하고 空氣의 空塔速度를 7.5 cm/sec로 하여 角方向의 變化에 따른 質量速度의 變化를 測定한 結果 Fig. 8과 같다.

粒子의 運動速度는 주어진 垂直平面上에서는 對稱性을 가지지만 軸에 對한 모든 方向에 對해서는 非對稱

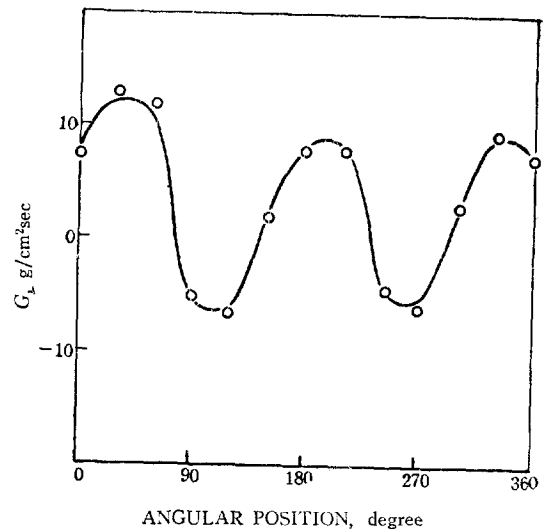


Fig. 8 Relation between Angular Position and Mass Velocity

性이며 180 度마다 類似한 運動狀態를 나타내고 있다.
이 事實은 粒子의 上昇域이 軸을 中心으로하여 圓形이 아닐을 意味한다.

(4) 粒子運動速度와 熱傳達

a) 熱傳達係數의 半徑方向分布 Thermistor 自體를 發熱體로 하여 그 表面과 流動層間의 熱傳達係數를 空氣速度 및 分散板에서부터의 距離를 여러 가지로 變化시키면서 測定하여 그 結果를 Fig. 9-a 및 9-b에 半徑

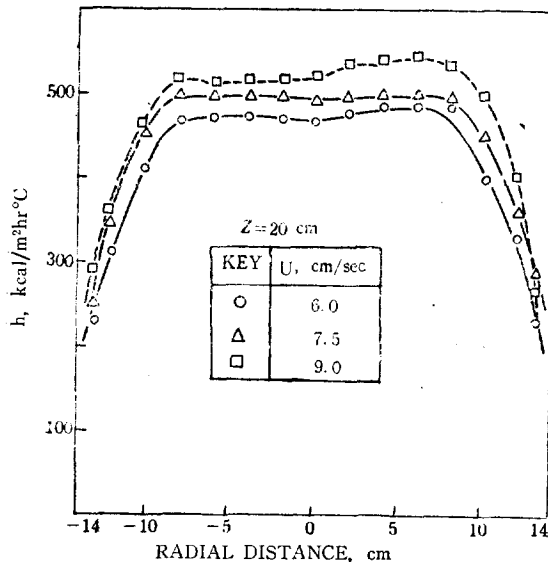


Fig. 9-a Heat Transfer Coefficient for Different Air Velocities

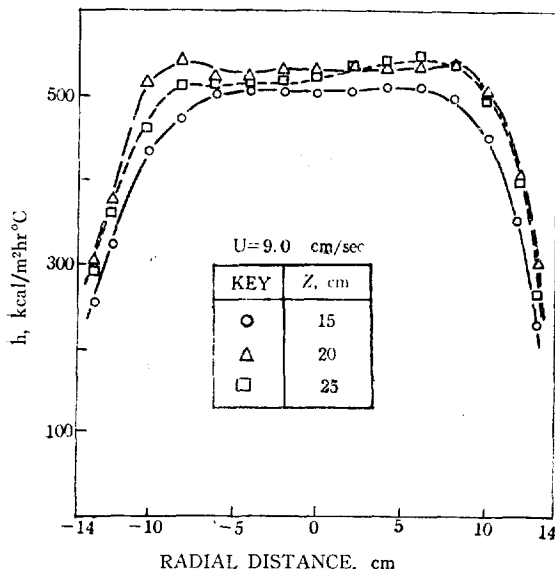


Fig. 9-b Heat Transfer Coefficient for Different Positions from Gas Distributor

方向의 位置의 函數로 表示하였다. 熱傳達係數의 計算에는 다음의 式을 使用하였다.

$$T_t - T_b = \frac{T_b T_t}{B} \ln \frac{R_b}{R_t} \dots \dots \dots (2)$$

$$Q = hA(T_t - T_b) = 0.86 E^2 / R_t \dots \dots \dots (3)$$

Fig. 9-a와 9-b에서 보는 바와 같이 熱傳達係數의 半徑方向分布는 粒子運動速度의 그것과 매우 類似하다. 卽, 層中心部에서는 높은 값을 가지며 壁附近에서는 낮은 값을 가지고 있다. Shirai等⁽¹⁶⁾과 Ziegler等⁽¹⁷⁾은 流動層內에서 熱은 粒子와 氣體의 兩者에 依해서 移動되지만 粒子에 依한 移動은 90%나 되고 氣體에 依한 移動은 10%밖에 되지 않는다고 報告하였다. 熱傳達係數와 粒子運動速度의 半徑方向分布의 類似性은 實事實을 잘 뒷받침해 주고 있다.

b) 粒子運動速度와 逆傳達係數와의 關係 粒子運動速度와 熱傳達係數와의 關係를 보면 上昇流와 下降流의 境界領域을 除外하고는 Fig. 10에서 보는 바와 같이 熱傳達係數는 空氣의 流速, 分散板에서부터의 距離, 半徑方向의 位置 등에 關係 없이 그 點에서의 粒子의 運動速度만으로 定해짐을 알 수 있다. 本實驗條件의 範圍에서 h의 實測値는 ±20%의 誤差範圍內에서 다음과 같은 實驗式으로 表示할 수 있다.

$$h = 155 G^{0.5} \dots \dots \dots (4)$$

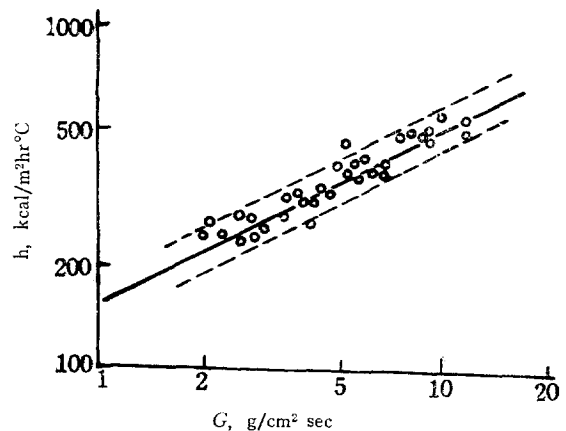


Fig. 10 Relation between Mass Velocity and Heat Transfer Coefficient

4. 結 論

方向性을 갖도록 改良한 thermistor probe를 使用하여 氣固系流動層內의 粒子의 運動狀態를 調査하고, 또 層內에 있는 작은 發熱體表面과 層間의 熱傳達係數를 測定한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 粒子의 運動으로서, 層中心部에서는 上昇하고

壁附近에서는 下降하는 循環流가 存在하며, 粒子의 運動速度와 上昇域은 空氣의 流速과 分散板에서부터의 距離가 增加함에 따라 增加한다. 粒子의 運動速度를 平均質量速度로 나타냈을 때 그 增加關係는 다음의 實驗式으로 表示할 수 있다.

$$\bar{G}=3.2(U/U_{mf})^{1.5}(Z/H_f)^{0.5}$$

(2) 空氣의 流速이 매우 작은 境遇에는 粒子의 一定한 flow pattern이 없고, 단순히 氣泡가 上昇하는 部分에서는 氣泡와 더불어 上昇하고 氣泡가 存在하지 않는 곳에서는 下降하고 있다.

(3) 粒子의 上昇域은 軸에 對하여 對稱性이 없고 따라서 圓形이 아니며 軸을 中心으로 하여 180度마다 類似的인 모양의 運動形態를 가진다.

(4) 熱傳達係數의 半徑方向分布는 粒子의 運動速度分布와 매우 類似하며, 이 事實은 流動層內에서의 熱移動은 主로 粒子의 運動에 依하여 이루어지고 氣體의 形響은 極히 적음을 意味한다.

(5) 熱傳達係數는 空氣速度 測定位置 等에 關係없이 그 點에서의 粒子의 運動速度만으로 表示할 수 있다.

使用記號

B: B-constant of thermistor	[°K]
E: Applied voltage	[volt]
G: Particle mass velocity	[g/cm ² sec]
\bar{G} : Average particle mass velocity	[g/cm ² sec]
h: Heat transfer coefficient	[kcal/m ² hr°C]
H _f : Fluidized bed height	[cm]
Q: Heat generated by thermistor	[kcal/hr]
R _b : Resistance of thermistor at T _b	[ohm]
R _t : Resistance of thermistor at T _t	[ohm]
T _b : Fluidized bed temperature	[°K]
T _t : Thermistor temperature	[°K]
U: Superficial air velocity	[cm/sec]
U _{mf} : Minimum fluidization velocity	[cm/sec]

Z: Distance from gas distributor [cm]

參考文獻

1. R. D. Toomey and H. F. Johnstone, *Chem. Eng. Prog.*, **48**, 220 (1952).
2. L. Massimila and J. W. Westwater, *A. I. Ch. E. J.*, **6**, 134 (1960)
3. M. Leva and M. Grummer, *Chem. Eng. Prog.*, **48**, 307 (1952)
4. N. B. Kondukov et al, *Int. Chem. Eng.*, **4**, 43 (1964)
5. N. B. Kondukov et al, *ibid*, **5**, 83 (1965)
6. R. M. Marsheck and A. Gomezplata, *A. I. Ch. E. J.*, **11**, 169 (1965)
7. J. Davidson and D. Harrison, "Fluidized Particles", Cambridge University Press (1963)
8. J. Davidson and D. Harrison, *Chem. Eng. Sci.*, **21**, 731 (1966)
9. D. L. Pyle and D. Harrison, *ibid*, **22**, 531 (1967)
10. S. Urabe et al, *Kagaku Kogaku (Japan)*, **29**, 863 (1965)
11. T. B. Anderson and R. Jackson, *I & EC Fund.*, **6**, 478 (1967)
12. T. B. Anderson and R. Jackson, *ibid* **6**, 527 (1967)
13. J. D. Murray, *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, **62**, No. 62, 71 (1966)
14. R. Toei et al, *Kagaku Kogaku (Japan)*, **29**, 851 (1965)
15. I. Hiraki, K. Yoshida and D. Kunii, *ibid*, **29**, 846 (1965)
16. T. Shirai et al, *ibid*, **29**, 880 (1965)
17. E. N. Ziegler and W. T. Bargelton, *I & EC Fund.*, **3**, 941 (1964)