

# 氣·固系 流動層內 氣體 및 粒子的 舉動

南 宮 寔, 柳 慶 玉\*

(1965. 3. 26. 受理)

## The Movement of Fluidizing Gas and Particle in the Gas-Solid Fluidized Bed.

Shik Namkoong and Kyong Ok Yoo

Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Hanyang Univ.

In order to determine the mechanism of heat transfer of the fluidized bed, the movement of fluidizing gas bubbles were inspected by means of tracer technique, and the fluidization quality including bubble frequency and number of density fluctuation per unit time were measured by the leak current method in the gas-solid fluidized bed.

Of the movement of gas bubbles, very little amount of gas is exchanged through the opening hole of vertical intermediate wall, especially when linear velocity is several times larger than that of incipient fluidization, the flow pattern of gas is plug flow. And when linear velocity is larger than 20 cm/sec, the flow pattern does not change considerably.

The movement of fluidized particles, the packet diameter is calculated by bubble frequency per unit time, and the conception of packet defined by Mickley and Fairbanks<sup>1)</sup> will enable a qualitative treatment

So far as examined with the experimental data on the heat transfer coefficient, the rate of solid mixing, and with the number of density fluctuation per unit time, the mechanism of heat transfer proposed by Mickley and Fairbank is found to be reasonable

### 結 論

本 實驗者等은 流動層의 熱傳達機構를 究明하기 爲해서, 氣泡層, 氣液固系 流動層, 그리고 氣固系 流動層에 對해서, 이들 層內에 挿入한 傳熱體의 表面과 流動層間에 總括熱傳達係數를 測定하여 報告<sup>1)2)</sup>하였고, 南宮·鄭等은 氣固系 流動層內 粉粒體의 混合速度에 關한 報告<sup>3)</sup>을 한 바 있다.

이에 依하면, 熱傳達係數는 靜止層이나 流動化物質 自體에 對한 값보다 數倍 내지 數拾倍의 큰 값을 나타냈으며, 流動層內 隔壁의 開孔을 통한 粉粒體의 混合速度는 流動化 gas 의 通氣速度  $u_0 = 5 \sim 25 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$  에서 變化될 때  $3 \sim 40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$  로 相當히 좋은 結果를 보였다. 또한  $u_t > u_0 > 20 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$  에서는 熱傳達係數나 混合速度가 共に 通氣速度에 無關하게 一定量을 나타내었다.

氣固系 流動層內 粒子和 氣體의 舉動의 測定에 對해

\* 漢陽大學校 工科大學 化工學科

서는 南宮<sup>4)5)</sup>, 小林晴夫<sup>7)</sup>, 古尾谷逸生<sup>8)</sup> 등이 研究한바 있다.

本 研究者는 위와 같은 流動層의 特性이 根本的으로 是 流動化 物質이나 流動化 gas의 舉動에 依存될 것이 라는 點에 着眼하여, 또한 流動層煤反應에서 要求되는 氣體의 piston flow 性이 있나를 밝히기 爲해서, 氣固系 流動層 內에서 tracer technique를 써서 gas chromatograph로 impulse 應答를 check하여 氣體의 舉動을 檢知하고, leak-current method<sup>4)5)6)</sup>를 써서 얻는 各種

의 流動化 狀態에 關한 示數(index)로써 粒子의 舉動을 追求하여 이것이 流動層의 熱特性이나 混合特性과 어떠한 關係가 있나를 밝혀보려는 目的으로 實驗을 行하였다.

### 實驗裝置

實驗裝置가 Fig.1에 보여졌는데, 管徑 8cm $\phi$ , 管의 長이가 40cm의 洋鐵材로 된 두 개의 圓筒을 나란히 直立시키고, 두 column 사이에 孔徑 1.4cm $\phi$ 의 hole

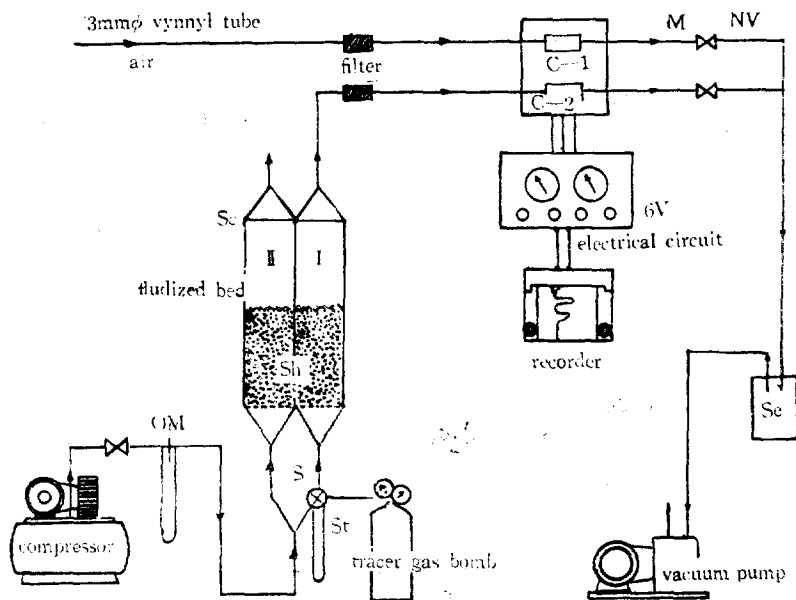


Fig. 1. Schematic Diagram of Experimental Apparatus

c-1; Reference cell      S; Sampling switch      OM; Orifice manometer      Sh; Shutter  
c-2; Sensitive cell      Sc; Sampling cap      NV; Needle valve      St; Sampling tube  
M; Manometer      Se; Suction tube

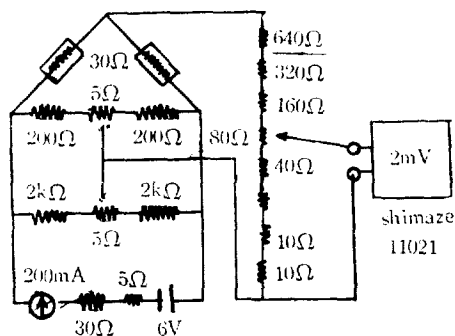


Fig. 2. Electrical Bridge of Gas Chromatograph

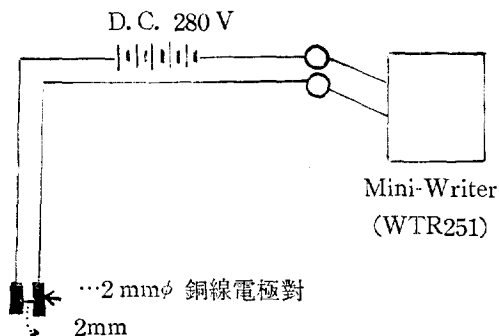


Fig. 3. 粒子舉動檢知器回路圖

Table 1. Tracer Gas 와 Bed 의 種類

tracer gas	bed 의 種類	充 填 物			umf [cm·sec <sup>-1</sup> ]
		成 分	size	層 高	
He (40cc)	Neobead fluidized bed	Neobead (370g)	60~80 mesh	8cm	1.50
	Neobead fluidized mixed bed	Neobead (370g)과 Raschig ring (210g)	60~80 mesh 5mmφ×6mm	9cm	0.85
He or H <sub>2</sub> (40cc)	Sand fluidized bed	Standard sand (500g)	40~60 mesh	8cm	7.00
	Sand fluidized mixed bed	Standard sand (500g)과 Raschig ring (210g)	40~60 mesh 5mmφ×6mm	9cm	5.20
H <sub>2</sub> (40cc)	Fixed bed	Raschig ring (360g)	5mmφ×6mm	8cm	

을 통해서 流動化 粉體나 氣體가 이 hole 을 통해서自由로 往來할 수 있도록 하였다. 이 裝置에서 두 개의 column 을 쓴 것은, 氣體의 舉動檢知方法으로 사용된 tracer technique 에 있어서 tracer gas 를 한 column 에만 넣어주는 것이 有利하기 때문이다. 또한 一定量의 tracer gas 를 넣어주기 위하여, 氣體分散板에서 50 cm 下部의 流動化 gas 流通 pipe 에 容量 40cc 인 sampling 切換 switch 를 裝置했고, 流動層內 兩 column 사이의 分流比를 調査할 때는 Fig.1 에 Sc 로 표시된 sampling cap 을 썼고, 層內 局所의 氣體舉動을 檢知하는 管徑 0.4cmφ, 길이 80cm 의 sampling pipe 를 使用하였다.

이 實驗에 使用하기 爲해서 本研究者 등이 組立한 gas chro-circuit 가 Fig.2 에 보여졌으며, SHIMADZU 製 recorder(電壓差 2mV, Shimadzu11, 021)를 使用하였다.

한편, 流動化 粒子舉動 檢知器로는 直徑 0.2cmφ(銅線), 두 極사이의 거리 0.2cm 인 電極對에 印加電壓 D.C. 280 volt 를 걸어서, 粒子가 두 電極사이를 連結시킬 때 消失되는 電流를 WATANABE 製 Mini-Writer (WTR 251)로써 記錄하였다. Fig.3 에 이를 나타낸다.

### 實驗方法

#### (1) Column I 에서 隔壁의 開孔을 통해서 Column II 로 移動되는 Tracer 量 調査.

南宮·鄭<sup>2)</sup> 등은 流動化되고 있는 粉粒體는 層을 分斷하고 있는 隔壁의 開孔을 통해서 잘 混合되고 있음을 밝혔다.

이에 대해서 流動化 gas 는 이 開孔을 통해서 어떻게 움직이고 있으며, 또한 이러한 氣體의 움직임과 氣體의 層內 滯留時間이 流動化粉體의 種類에 따라 어떻게 變化되고 있나를 Table 1 에 例示된 流動層에 對해서 밝히고자 한다.

實驗方法으로는, 첫째로 두 column 사이의 開孔을 閉하고 column I 流動層內에 流動化 gas(dry air 20°C)와 함께 瞬時的으로 tracer gas 를 넣어서 이때

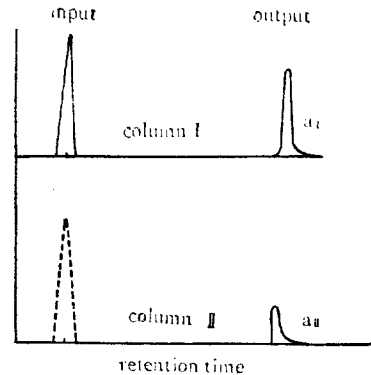


Fig. 4. Analytical Pattern of Peak

gas chro-recorder 에 나타난 peak 의 面積을  $a_1$  이라고 하고, 같은 流動化 狀態에서 column I 에 同量의 tracer gas 를 넣어 이 중에서 column II 로 移動되어가는 tracer 量을 recording 하여 그 peak 面積을  $a_2$  를 할 때, 이 두 面積의 百分率로서 data 를 整理하였다.

또한 retention time 은 pulse 를 넣어 준 時刻부터 應答인 peak 가 最大인 點에 해당하는 時間까지로 計算하였는데, 이를 Fig.4 에 例示한다.

Gas chromatography 動作에 있어서는, 첫째로, sensitive cell side 의 流速이 應答에 미치는 影響을 調査하기 爲하여 流速을 50~200cc·min<sup>-1</sup> 에서 變化시켜 본 結果, 100 cc·min<sup>-1</sup> 일 때에 應答狀態가 거의 一定하게 나타나어, 본 實驗에 있어서 sensitive cell 의 流速은 100 cc·min<sup>-1</sup> 로 固定시켰다.

둘째, reference cell 의 流速은 20~100 cc·min<sup>-1</sup> 사이에서 變化시켜 보았는데, 이 reference side 의 流速變化에 依한 應答의 影響은 別로 찾을 수 없음으로 reference cell 의 流速은 40 cc·min<sup>-1</sup> 로 固定해서 實驗을 行하였다.

셋째, recorder의 chart speed는  $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 으로  
 행했으며, 다음에 說明하는 局所의 氣體舉動을 調査할  
 때는  $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 로 하였다.

Peak의 面積計算에는 梯形法을 썼다.

### (2) 局所의 氣體의 舉動

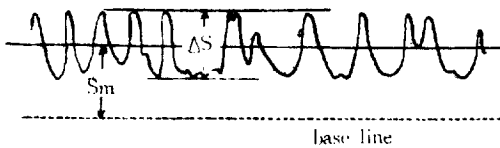
管徑  $0.4 \text{ cm}$ , 길이  $80 \text{ cm}$ 의 銅 sampling pipe를 層  
 의 各部와 層上에 固定시켜 놓고 通氣速度變化에 따른  
 peak變化를 recording하여, 이 peak面積으로써 氣體  
 의 舉動을 推算하여 이를 傳熱機構에 應用시키려는 것  
 이다.

### (3) 局所의 粒子舉動 檢知

局所의 粒子舉動 檢知는, 물론 同時에 이 流動層內  
 의 熱傳達係數를 測定하기 爲하여, 裝置로부터 gas-  
 chro.裝置를 除去하고, column I에는 傳熱體를,  
 column II에는 Fig. 3에 보인 電極對를 넣어, 粉粒體  
 와 氣體가 開孔을 通하여 往來하는 狀態에서 粒子舉動  
 檢知와 熱傳達係數를 同時에 測定하였다.

粒子舉動 解析의 한 方法으로 南宮<sup>6)</sup>은 다음과 같은  
 것을 提議하였다.

Mini-writer recorder에 記錄된 peak形을 Fig. 5에 表  
 示했는데,



Base line

Fig. 5. Analytical Pattern of Mini-Writer Peak

Fig. 5에서,

$\Delta S$ ; peak의 最少値와 最大値와의 差.

$S_m$ ; 基線에서 peak中心線까지의 距離.

$n_i$ ; 1 sec 동안의 粒子의 振動數

라 할 때, slugging index,  $C_s$ , velocity index(速度示  
 數),  $Q$ , mixing index(混合示數),  $Q^*$ , 물 다음과 같이  
 定義하였다.

$$C_s = \frac{\sigma_t}{n_m} \quad [-] \quad (1)$$

$$Q = \left( \frac{\Delta S}{S_m} \right) n_m \quad [\text{sec}^{-1}] \quad (2)$$

$$Q^* = \left( \frac{\Delta S}{S_m} \right) \left( \frac{n_m}{\sigma_t} \right) \quad [-] \quad (3)$$

여기서,

$$n_m = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} n_i \quad [\text{sec}^{-1}]$$

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} (n_i - n_m)^2}$$

즉 이와같은 index(示數)들을 써서 粒子舉動을 半定  
 量的으로 追求하였다.

## 實驗 結果 및 考察

### (1) Column I에서 隔壁의 開孔을 通해서 Column II로 移動되어 나가는 Tracer 量 調査

Table 1에 表示된 各 bed에 對해서, tracer가 column I에서 column II로 移動되어 나가는 量이 어떠한 結果로 나타나며, 또 이 column II로 移動되어 나가는

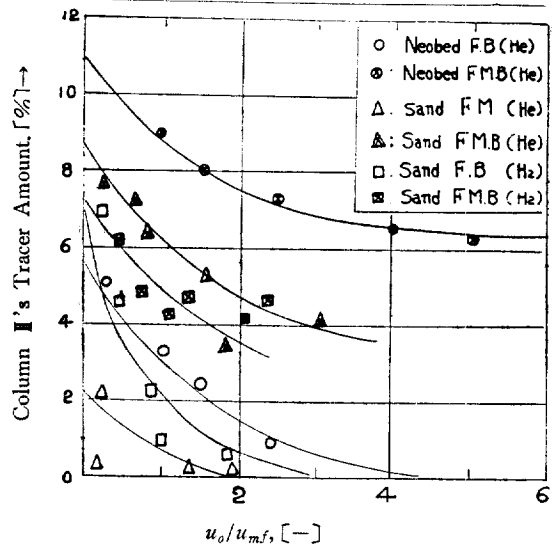


Fig. 6. Tracer Amount of Column II vs  $u_o/u_{mf}$

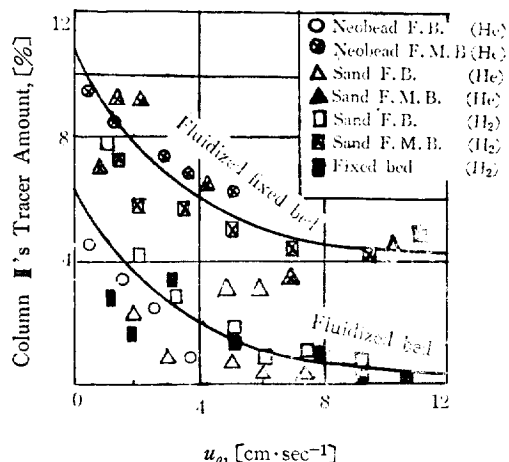


Fig. 7. Tracer Amount of Column II vs  $u_o$

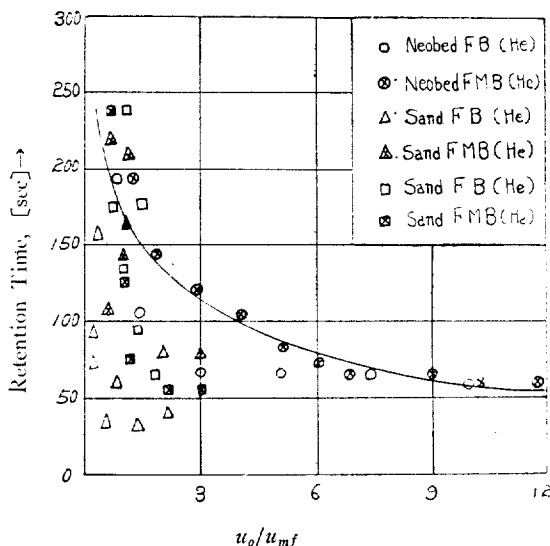


Fig. 8. Retention Time of Tracer Gas vs  $u_o/u_{mf}$

tracer 量이 粉體 또는 充填物에 依해서 어떤 影響이 있나를 밝히기 爲해서, Fig. 6 에는 column II 에서 check 되는 tracer 量 對  $u_o/u_{mf}$  로 plot 하였다. Fig. 에서 보는 바와 같이 어떤 一定한 傾向을 찾을 수 없는 故로, Fig. 7 에  $u_o/u_{mf}$  대신  $u_o$  에 對해서 表示하였다. 여기에서 보면, column II 에서 check 되는 tracer 量은 通氣速度  $u_o$  에 依해서 一定한 傾向을 나타내고 있다.

다음 tracer gas의 層內 retention time을 Fig. 8 에  $u_o/u_{mf}$  에 對해서, 그리고 Fig. 9 에는  $u_o$  에 對해서 plot 했는데, 이 경우도 tracer gas 量에 對한 경우와 마찬가지로  $u_o/u_{mf}$  와의 關係에서 各 bed 마다 多樣性을 나타내나  $u_o$  와의 plot 에서는 모든 bed 가 다 같은 傾向을 나타내고 있다. Fig. 9 에 點線으로 표시된 것이 計算된 retention time 인데 實測值에 거의 接近한다. 즉 通氣速度  $u_o$  가 적은 부분에서 fluidized bed의 경우에 接近하고  $u_o$  가 큰 경우에는 fluidized mixed bed 경우 接近한다. 이와같이 Fig. 6 와 Fig. 7 그리고 Fig. 8 와 Fig. 9 을 比較하여 볼 때 流動層內의 隔壁의 開孔을 통한 氣體의 混合이라든지 그의 retention time 은 流動化物質에 對한 影響보다는 流動化에 참여하는 氣體의 線速에 依한 影響이 支配的이라는 것을 알 수 있다.

지금  $f$  를 流動化 gas의 分流比 (fractional flow ratio of fluidizing gases)라 하여 다음과 같이 定義할 때

$$f = \frac{a_{II}}{a_I} \quad [-] \quad (4)$$

여기서,

$a_I$ : 兩 column 사이의 隔壁의 開孔을 閉할 때 column I 에서 check 되는 peak 面積,  $[cm^2]$

$a_{II}$ : 兩 column 사이의 隔壁의 開孔을 열었을 때 column II 에서 check 되는 peak 面積,  $[cm^2]$

Neobead fluidized bed와 sand fluidized bed에 對한 分流比  $f$ 와 混合速度  $W_m$  과의 關係를 Fig. 10에 plot

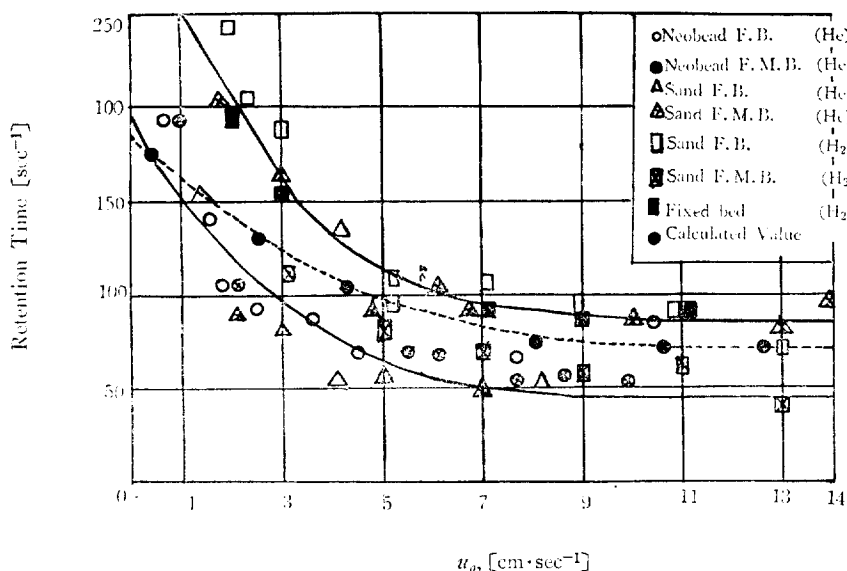


Fig. 9. Retention Time of Tracer Gas vs  $u_o$

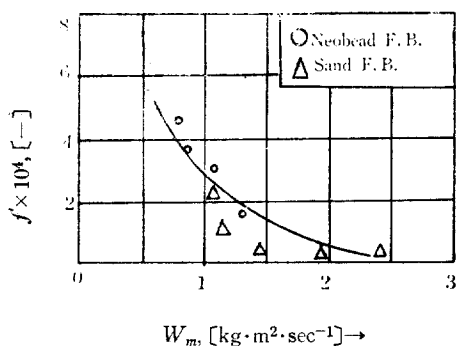


Fig. 10. Fractional Flow Ratio( $f$ ) vs Rate of Mixing ( $W_m$ )

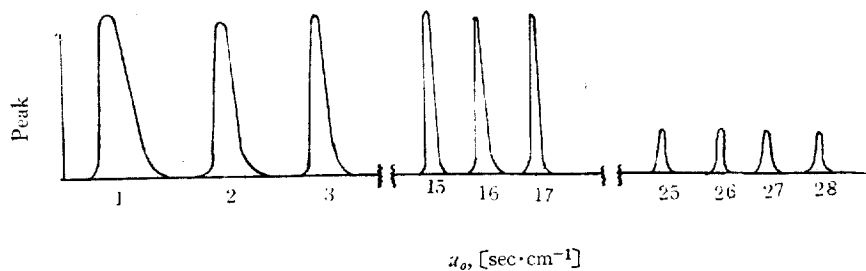


Fig. 11. Peak's Form

速度가 같다면 層內 어느 部分에서든지 같은 熱傳達이 일어날 것이라는 結論이 나왔는데, 氣體의 舉動이  $U_o = 10 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$  以上에서는  $\frac{r}{R} = 4$  인 부분이 나머지 부분보다 현저히 다른 點으로 미루어 보아 이때의 熱傳達도 달라 질 것으로 생각된다.

다음은 層의 中心線에 sampling pipe 를 固定시켜 놓고 通氣速度  $u_o$  를 變化시킬 때  $u_o$  가 增加함에 따라 peak 의 面積은 점점 감소하나  $u_o = 20 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$  以上에서는 거의 一定한 크기를 나타내고 있다.

이것은 熱傳達係數가  $u_o = 20 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$  以上에서 一定値를 나타내는 것과 相通하는 것으로 다음과 같이 설명할 수 있을 것이다.

小林晴夫<sup>7)</sup> 등에 依하면 流動層內 氣泡群의 一部는

했는데  $W_m = 3$  以上에서는  $f$  는 zero 에 가깝다.  $W_m = 3$  이면 대략  $u_o = u_{mf} = 2$  以下인데 實際 流動化 操作에서는  $u_o/u_{mf} = 10$  以上에서 動作하므로 이러한 경우 開孔을 통해서 移動되는 氣體의 影響은 別로 없고 氣體는 단지 piston flow 역할만 하는 것이다.

그러나 fluidized mixed bed 에서는 流動層의 경우보다 分流比  $f$  가 상당히 크므로 觸媒를 수반하는 流動反應에 있어서는 fluidized mixed bed 를 쓰는 것이 유리할 것이다.

## (2) 局所의 氣體舉動

$u_o = 10 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$  以下에서는 層內 어느 部分에서나 check 되는 tracer 量은 同一速度에 對해서 變化가 없으나  $\delta_o$  가 커짐에 따라 層의 中心部分이 管壁附近에서 보다 많은 量이 check 되는 것을 알 수 있었다. 既報한 流動層內 熱傳達係數 測定<sup>1)</sup>에서 層內의 局所의 熱分布를 밝힐 때 管壁附近을 除外하고 同一速度에 對해서 層內 各部分의 熱傳達係數가 同一値를 나타내어 通氣

本來의 流速과 같은 速度로 層위로 上昇하고 나머지 氣泡群이 合流 내지 成長하여 本來의 速度보다 더 빠른 速度로 層을 pass 한다고 報告하였다. 이러한 點을 考察해 볼 때 氣體가 流動化에 크게 기여하는 境遇는 氣泡가 成長할 때 일어나는 것으로 생각되는데  $u_o$  가  $20 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$  以上에서는 通氣量 增加에 關係없이 成長하는 氣泡群은 항상 一定하고 大部分의 氣泡群이 그대로 層中을 pass 해 나가므로 流動化 狀態는  $u_o$  의 增加에도 不拘하고 一定하게 되며 이 結果로 tracer gas 의 peak 나 熱傳達係數 그리고 混合速度가 一定値를 나타내는 것으로 간주된다.

## (3) 粒子 舉動 檢知

Fig. 12 에는 粒子의 振動數  $n_m$  을 종축으로 그리고 通氣速度를 횡축으로 plot 했으며, Figs 13, 14, 15 에는 (1), (2), (3) 式에 依해서 일어난 slugging index, vel-

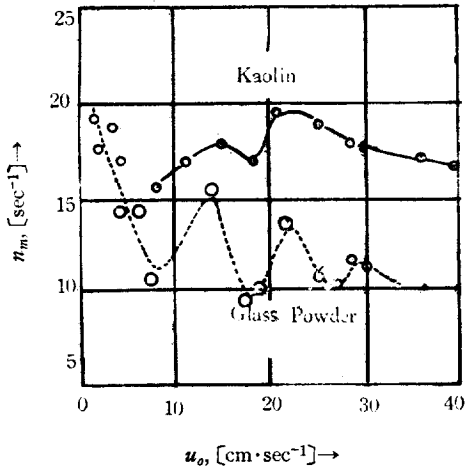


Fig. 12.  $n_m$  vs  $u_o$

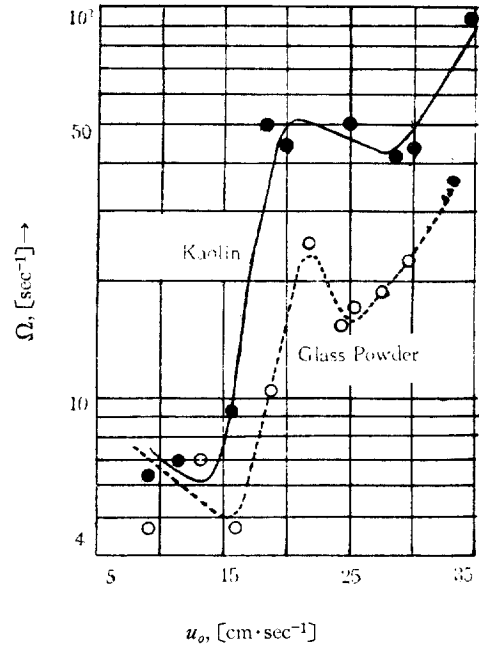


Fig. 14. Velocity Index vs  $u_o$

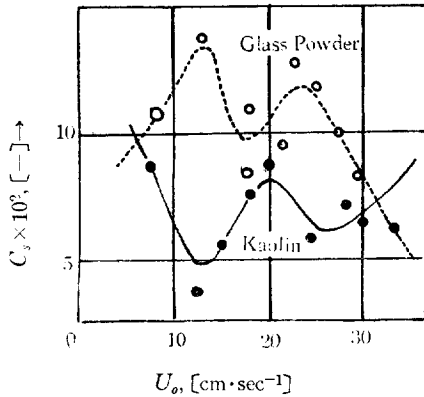


Fig. 13. Slugging Index vs  $u_o$

velocity index, mixing index 가 各各  $u_o$  에 對해 plot 되었다. 이 實驗에서 本 研究者는 熱傳達係數가 通氣速度 增加에 따라 增加하다가  $u_o = 20 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$  以上에서는 一定値를 나타내는 理由가 이들 index 와도 어떤 關聯性이 있기를 기대하였으나 그러한 傾向은 찾을 수 없었다.

다만 Fig. 14 와 Fig. 15 에 表示된 速度示數와 混合速度는 通氣量 增加에 따라 增加한다는 結果만을 얻었다.

Fig. 16 에는 混合示數와 熱傳達係數와의 關係를 표시했는데 混合示數  $\Omega^*$  의 增加에 따라 熱傳達係數도 增加하나  $\Omega^* = 11$  以上에서는 熱傳達係數가 一定値를 갖

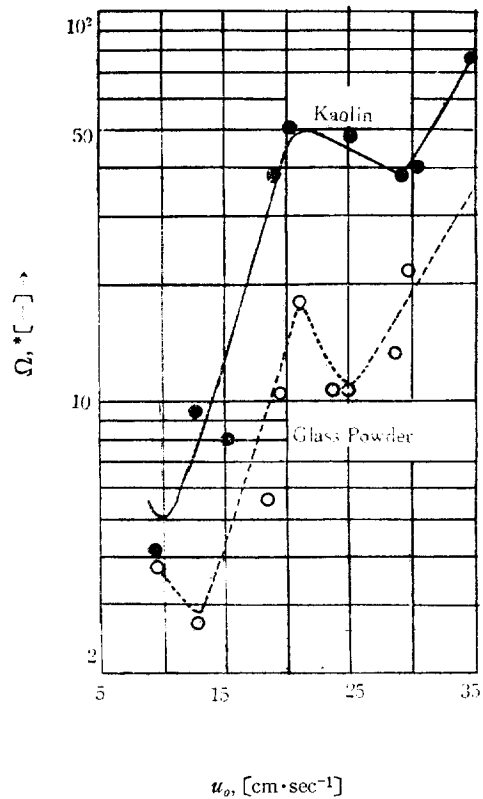


Fig. 15. Mixing Index vs  $u_o$

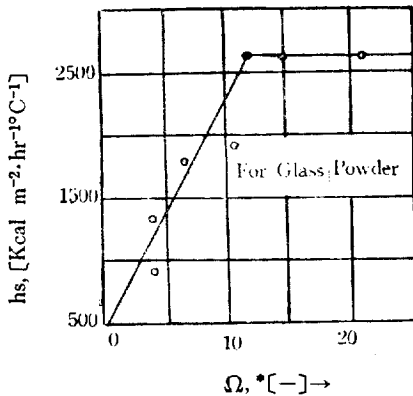


Fig. 16.  $h_s$  vs  $\Omega^*$

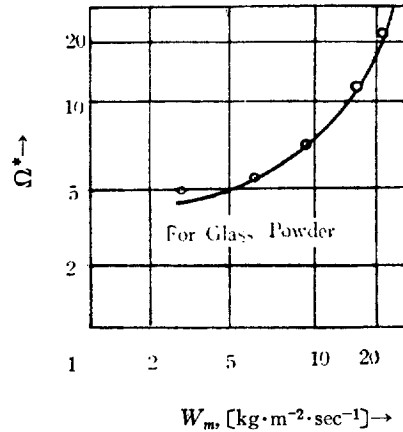


Fig. 18.  $\Omega^*$  vs  $W_m$

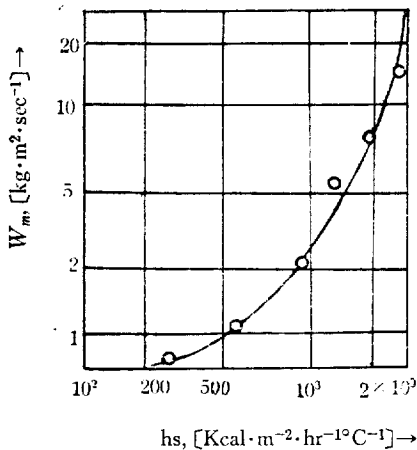


Fig. 17.  $\Omega^*$  and  $W_m$  vs  $h_s$

는다. 이것은  $U_o=20 \text{ cm} \cdot \text{sec}$  以上에서  $h_s$  가 一定値를 갖는 것과 相通하는 現象이다.

또한 Fig. 17 에는 混合速度  $W_m$  을 熱傳達係數  $h_s$  에 對해서, 그리고 Fig. 18 에는 混合示數  $\Omega^*$  를 混合速度  $W_m$  에 對해서 plot 했는데, 여기서도 어떤 特異한 關係는 찾을 수 없었다.

이와같은 點을 綜合的으로 考察해 볼 때 流動層의 傳熱特性, 混合特性, 그리고 隔壁의 開孔을 통한 氣體의 移動은 充填物인 流動化物質에 依한 영향보다 流動化 gas 에 依한 영향이 支配的이라는 結論이 나온다.

이와 같이 流動層의 特性이 大部分 流動化 gas 에 依해서 支配된다는 結論을 내린 것은 우리가 사용한 流動化 粒子에 關한 諸示數와 傳達特性이나 混合特性사

이에 關係가 없다는 點에서 나온 것이며, 다른 方向으로 流動 粒子의 特性을 規定짓고 이들과 流動層의 特性을 關聯시킨다면 어떤 關係가 있을지도 모르겠다.

그러나 우리는 이 粒子學動檢知에서 粒子의 振動數를 求하였다(Fig. 12 참조). 本 實驗에 粒子라고 쓴 말은 Mickley & Fairband<sup>6)</sup> 등이 定義한 packet 라는 것과 同意語이므로 實際로는 packet 의 振動數를 求한 셈이다.

여기에서 이 packet 의 振動數와 熱傳達係數, 그리고 混合速度에 對한 關係를 맺어 주므로써 이제껏 定性的 取扱만 해온 packet 의 概念을 定量的으로 다루는 것이 可能하게 되었다.

지금 packet 의 直徑을  $D_{pa}$ , 密度를  $\rho_m$ , 熱容量을  $C_v$  라고 하면 그의 質量  $M_p = \rho_m(\pi D_{pa}^3/6)$  이고, 單位時間에 傳熱面 A 에 충돌하는 packet 의 數를  $n_m$  이라 하면,

$$n_m = \frac{6AWA_3}{\rho_m \pi D_{pa}^3}, [\text{sec}^{-1}] \quad (5)$$

또한 packet 의 溫度를  $T_o$ , 傳熱體의 表面溫度를  $T_1$  이라 하면 傳熱面積 A 를 통해서 packet 로 흘러 들어간 熱量  $q_m$  은,

$$q_m = n_m \left( \frac{\rho_m \pi D_{pa}^3}{6} \cdot C_v \right) \cdot (T_1 - T_o), [\text{kcal} \cdot \text{sec}^{-1}] \quad (6)$$

$$\text{단, } C_v = C(1 - \epsilon_m f)$$

(6)式으로 부터

$$h_s = n_m \left( \frac{\rho_m \pi D_{pa}^3}{6} \cdot C_v \right) \cdot 3600, [\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}] \quad (7)$$

그리고 (5)式으로 부터

$$W_m = n_m \frac{\rho_m \pi D_{pa}^3}{6A}, [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}] \quad (8)$$



(7)식과 (8)식을 比較하면,

$$h_s = 3600 C_v W_m, [\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}] \quad (9)$$

또한 (7) or (8)식에서  $D_{pa}$ 를求하면

$$\left. \begin{aligned} D_{pa}^3 &= \frac{6Ah_s}{3600\pi n_m \rho_m C_v}, [\text{m}^3] \\ \text{or} \\ D_{pa} &= \frac{6AW_m}{\pi n_m \rho_m}, [\text{m}^3] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

우리는 이 (10)式으로 부터 packet의 크기를求할 수 있는데 이에 앞서 이 식의 正當性부터 檢討해야 할 것이다. (9)式은 packet model을 展開하므로 導出된 熱傳達係數와 混合速度와의 關係式이므로 두 實測值를 代入했을때 等號가 成立해야 할것이다. Table 2에 그 結果를 보였는데,  $u_o = 10 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ 以下에서는 대체로 許用할 수 있는 範圍이나,  $10 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ 以上에서의 差는 turbulence에 依한 影響으로 보아서 우리가 考察하고 있는 領域밖의 問題이므로 packet model에서 導出한 모든 식들은 正當하다고 보는 것이 좋을 것이다.

Table 2. 實測熱傳達係數와  $h_s = 3600 C_v \cdot W_m$ 으로 計算된 값과의 比較

$u_o$ [cm·sec <sup>-1</sup> ]	實測 $h_s$ [kcal·m <sup>-2</sup> ·hr <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ]	實測 $W_m$ [kg·m <sup>-2</sup> ·sec <sup>-1</sup> ]	$h_s = 3600 C_v W_m$
1	200	0.95	342
3	430	1.30	468
5	700	1.70	612
7	920	2.30	768
10	1,320	3.60	1,296
15	1,920	8.00	2,880
20	2,500	17.00	6,129
30	2,500	30.00	10,800

Fig. 12에서 packet의 振動數는 glass powder의 경우 대략 10~20 사이에 있음으로 (10)式에 依해서 그의 直徑  $D_{pa}$ 를求하면,

i)  $u_o = 10 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$  일 때,  $n_m = 10$ ,  $W_m = 3.6$ , 또한  $A = 3.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 이므로

$$D_{pa}^3 = \frac{6(3.14 \times 10^{-4})(3.6)}{(3.14)(10)(2530)}$$

$$\therefore D_{pa} = 4.35 \times 10^{-3} \text{ m or } 4.35 \text{ mm.}$$

ii)  $u_o = 1$  일 때  $n_m = 20$ ,  $W_m = 0.9$ 이므로,

$$D_{pa}^3 = 1.13 \times 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$\therefore D_{pa} = 2.24 \times 10^{-3} \text{ m or } 2.24 \text{ mm.}$$

以上的 計算結果로 부터 packet의 크기는 그 直徑이 2~5mm인 것을 알 수 있으며 이로써 한 packet속에 들어 있는 粒子數, packet의 體積과 表面積, 全流動層內的 packet의 數等을 計算할 수 있게 되었다. 고로 이 packet를 着目하여 그의 運動을 流體力學的으로 해석하여 이를 傳熱機構나 混合特性을 究明하는데 適用시

킬 수 있는 좋은 展望이 보인다.

## 結 論

Tracer technique로 檢知된 氣體의 舉動에 있어서는 流動層內 隔壁의 開孔을 통해서 粉體는 잘 混合되고 있는데 反하여 流動化 gas의 混合은 잘 이루어 지지 않았다. 대개  $u_o/u_{mf} = 2$ 以上에서는 兩 column 사이의 流動化 gas의 混合은 무시할 수 있어서 流動反應에서 要求되는 바와 같이 氣體는 piston flow 역할만 한다는 것이 實證된 것이다.

그러나 fluidized mixed bed에서는  $u_o/u_{mf} = 10$  程度까지 流動化 gas의 分流比가 상당히 크므로 觸媒에 反應 gas가 吸着을 要求하는 反應에서는 fluidized mixed bed가 有利할 것으로 생각된다. 그리고 이와같은 開孔을 통한 gas의 移動(즉 分流比)이나 層中 gas의 retention time은 流動化 粉體에 依한 影響보다 流動化 gas에 依한 影響이 더욱 크다.

또한  $u_o = 20 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ 以上에서는 gas chro-recorder에 記錄된 peak型과 크기가 대개 一定한 것으로 비루어 보아 이와같이 通氣量이 많은 경우에는 gas의 대부분이 層內를 그대로 通過해 버리고 少量의 gas만이 成長 合流하여 大氣泡群을 이루면서 流動化에 참여하므로 이 범위 以上에서는 氣體의 通氣速度 增加에 關係 없이 流動化 상태는 變함이 없게 되어 이때의 流動層의 熱傳達係數나 粉粒體의 混合速度가 一定值를 갖게 된다고 解析할 수 있다.

다음 leak-current method에 依해서 檢知된 粒子舉動에 있어서는, 여기에서 얻어진 流動層의 諸示數단으로는 傳熱機構나 混合特性을 해석할 수 없었으나, 粒子의 振動數를 얻으므로써 傳熱에 對한 packet model을 더욱 더 擴張할 수 있게 되었다. 즉 假想의 packet가 振動數로서 그의 크기를 計算할 수 있게 되어 이로써 packet의 體積과 表面積 그리고 全流動層內에 들어 있는 packet의 數等을 計算할 수 있음으로, 이 여러 因子들과 流動化 物質의 諸 物性定數를 特徵지우면 더 正確한 傳熱機構를 究明할 수 있으리라 믿는다.

## 記號說明

- A; Heat transfer area [cm<sup>2</sup>]
- $a_1$ ; Tracer gas peak area of column I when shutter is closed [cm<sup>2</sup>]
- $a_2$ ; Tracer gas peak area of column II when shutter is opened [cm<sup>2</sup>]
- C; Heat capacity of the packet [kcal·kg<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>]
- $C_s$ ; Slugging index [—]
- $C_v$ ; Heat capacity of the packet depend on the

superficial velocity of air  $[\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$   
 $D_{pa}$ ; Diameter of the packet  $[\text{cm}]$   
 $f$ ; Fractional flow ratio of fluidizing gases  $[-]$   
 $h_s$ ; Heat transfer coefficient of the gas-solid fluidized bed  $[\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$   
 $n_m$ ; Average frequency of the particle (or packet) per sec.  $[\text{sec}^{-1}]$   
 $q_m$ ; Rate of heat flow  $[\text{kcal} \cdot \text{hr}^{-1}]$   
 $R$ ; Radius of column  $[\text{cm}]$   
 $r$ ; Radial distance of heat transfer element or sampling pipe  $[\text{cm}]$   
 $S_m$ ; Distance from base line to average peak line mini-writer recorder  $[\text{cm}]$   
 $\Delta s$ ; Difference between max and mini peak value  $[\text{cm}]$   
 $T_1$ ; Temperature of heat transfer element surface  $[\text{°B}]$   
 $T_o$ ; Temperature of the packet  $[\text{°C}]$   
 $u_{mf}$ ; Minimum fluidization velocity  $[\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}]$   
 $u_o$ ; Superficial velocity of air based on cross sectional area of column  $[\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}]$   
 $W_m$ ; Rate of mixing of the particle  $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}]$

$\sigma_t$ ; Standard deviation of the number of the packet frequency  $[\text{sec}^{-1}]$   
 $\varepsilon_{mf}$ ; Minimum void fraction of fluidized bed  $[-]$   
 $\rho_m$ ; Density of the packet  $[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$   
 $\Omega$ ; Velocity index  $[\text{sec}^{-1}]$   
 $\Omega^*$ ; Mixing index  $[-]$

### 参考文献

- 1) Mickley H.S. and D.F. Fairbanks; J. Ama. In chem. **1** 374 (1955)
- 2) 南宮寔, 柳慶玉; 화학공학 **2** 82 (1964)
- 3) 柳慶玉; 漢陽大學校 大學院 碩士學位論文 (1964. 12)
- 4) 南宮寔 · 鄭雨昌; 화학공학 **2** 87 (1964)
- 5) 南宮, 新井, 進藤; 化學工學協會(日本) 24 年會講演要旨 p. 197 (1959)
- 6) 南宮 寔; 化學工學協會(日本) 總合 symposium 講演要旨 第二回 41 (1963)
- 7) 南宮 寔; 入門反應工學 pp. 237~242 工學圖書出版社刊(日本) (1963)
- 8) 小林晴夫; 化學工學協會(日本) 總合 symposium 講演要旨 第三回 45 (1964)
- 9) 古尾谷逸生; 東京工業大學, 修士學位論文 (1964)