

氣·固系 流動層內 粉粒體의 混合速度(Ⅱ)

南宮 寔, 鄭 雨 昌 *

(1965. 3. 26. 受理)

The Rate of Solid Mixing in Gas-Solid Fluidized Bed (Ⅱ)

Shik Nam-koong and Woo-Chang Chung

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

In designing fluidized bed, it has been the most difficult problem that the basic data obtained by the small scale apparatus are not applicable for the design of the large diameter commercial scale plant.

One of authors has proposed, as a scale-up method, to divide the large diameter fluidized bed into elementary compartments by internal vertical walls with holes of optimum area, so that each compartment can maintain the fluidization quality equal to the elementary small scale apparatus.

In this work, the scale up method was checked by the measurements of the rate of solids mixing. And the reproducibility in both elementary small scale 6 cm equivalent diameter apparatus and scaled up one was assured. This shows a possibility of practical use of this method in commercial scale plant design.

緒 論

流動層內의 裝置設計에 있어서 實驗室的 規模의 小型裝置에서 測定되는 各種 data가 大型裝置에서는 再現되지 않음이 가장 큰 難問題가 되어왔다.

그리한 事實은 定量的으로 表示하기는 어려우나 流動層 內의 氣泡의 舉動 및 粒子混合의 樣相에 依해서 把握되는 所謂 流動化狀態가 裝置規模에 따라 大幅의 變化함에 起因하는 것으로 理解되는 것이다.

한편 流動化狀態는 流動化法이 利用되는 具體的인 裝置의 成績 및 効率에 依해서 評價되어야 할 것이므로 乾燥 傳熱化學反應 等 各種操作에 共通된 流動化狀態의 良否는 判定될 수 없다.

그러므로 먼저 最適한 流動化狀態를 小型裝置에 依한 實驗을 通하여 確認하고, scale-up에 際해서는 그와 同一한 流動化狀態를 確保할 수 있는 方式을 取하여야 할 것이다.

Scale-up을 容易하게 하기 위한 方式으로서는 多孔板¹⁾, 充填物²⁾, 金屬網充填物³⁾等을 層內에 配置시키는 方法이 檢討되어 왔다.

近來 Volk等⁴⁾은 流動層 觸媒 反應器를 scale-up함에 있어서 基礎 實驗裝置의 內徑과 同一한 相當徑을 갖게끔 圓管群을 大型裝置 內에 設置한 結果, 裝置規模의 擴大에도 不拘하고 同一한 反應器 成績을 얻을 수가 있었다고 報告하고 있다.

著者 等은 가장 裝置構造가 簡單하고, 특히 內挿物 내지 充填物에 依한 反應器 容積의 占有率을 極小化시킬 수 있는 方法의 하나로서, 流動層 內에 有孔隔壁을 垂直方向으로 設置하여 橫方向으로 裝置規模를 擴大하는 方式을 提案하였다. 橫方向만 考慮한 것은, 縱方向의 scale-up은 實驗室裝置를 使用하여도 檢討할 수가 있으며, 隔壁上의 開孔의 位置와 面積은 流動層의 모든 長點의 根源이 되어있는 粒子의 迅速한 運動을 妨害치 않도록 設計할 수가 있는 것이기 때문이다.

여기에서는 著者 等の 前의 研究發表⁵⁾에 이어서

화학공학

* 漢陽大學校 工科大學 化學工學科

scale-up 된 裝置 內의 粒子의 混合速度와 隣接連成된 區劃 사이의 氣體의 分流現象에 關하여도 考察하였으 며 scale-up에 關한 著者들의 手法이 本 實驗研究의 實驗條件下에서 有効하다는 것을 밝혔다.

實驗裝置와 實驗方法

流動層의 scale-up에 關하여 著者들이 提案한 方式⁶⁾은 有孔隔壁으로 여러 槽를 連成함으로서 裝置規模를 順次로 擴大하는 것이 있다.

本 研究에서는 Fig. 1과 같이, 4槽를 連成한 裝置를 써서 scale-up 했을 때에, 2槽連成裝置⁵⁾에서 測定된 混合速度가 規模를 橫方向으로 擴大한 3 내지 4槽連成 裝置에서 再現되는지의 如否를 檢討하였다.

即 各 槽 內의 流動化狀態가 이 方式에 依한 橫方向의 規模擴大에 따라 顯著하게 變한다면 粒子混合速度에도 顯著的 變化가 測定될 것이며, 反對로 流動化 狀態에 變化가 없으면 同一한 粒子의 混合速度를 얻을 수 있

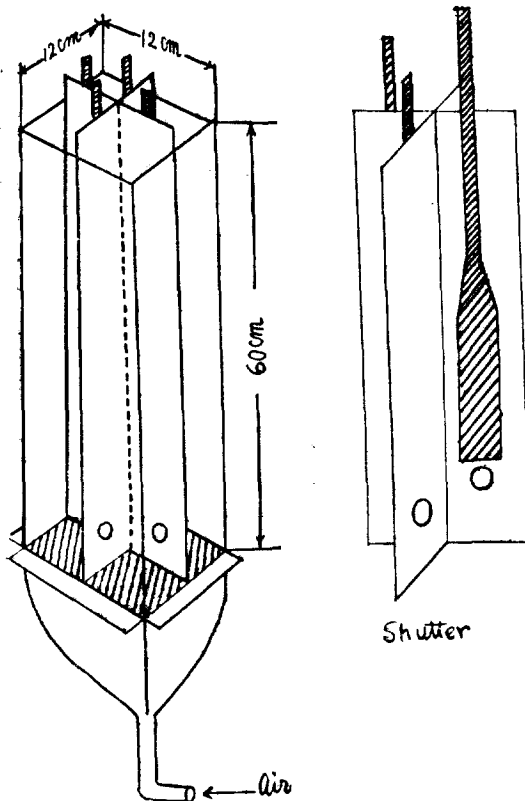
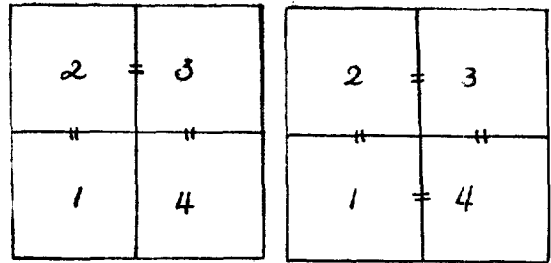


Fig. 1. Scaled up Apparatus (N=4)

• =印은 隔壁間의 開孔을 表示한다.

•• 이 경우의 結果式은 J. K I, Ch. E 2. 88 (1964)에서 式 (2) (3) (4) (5)이다. 例로서는 Fig. 4 및 Fig. 5의 實驗曲線參照. 단 兩圖는 $k=3.2 \times 10^{-3} [\text{sec}^{-1}]$ 인 경우이다.



(a) Connection in series (b) Connection in ring form

Fig. 2. Scale-up Model (N=4)*

으리라는 點에 着眼하여 一連의 實驗을 했다.

3 및 4槽를 連成한 裝置(Fig. 1)에서, 우선 第1槽에 tracer를 投入했고 各 column間의 有孔隔壁의 shutter를 時間에 따라 同時に 開孔하여 各 column中 tracer (NaCl)의 分配率을 測定하였다.

基礎方程式

各種을 連成하는 데는, Fig. 2에서 (a)와 같이 線形連成의 경우와 (b)의 環狀連成의 경우를 들 수 있다.

各 槽 內 粒體의 重量을 M_i , 各 隣接槽 間의 開孔面積을 a_{ij} , 單位開孔面積 當 單位時間 當의 粒體의 移動速度를 W_{ij} , 各槽의 tracer의 分配率을 z_i 로 둘 때 粒體混合 基礎方程式은 各槽의 物質收支式으로부터 다음과 같다.

I) 線形連成의 경우** II) 環狀連成의 경우

$N=4$ 일 때 基礎方程式은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} M_1 \frac{dz_1}{d\theta} &= W_1 a_{12} (z_2 + z_4 - 2z_1) \\ M_2 \frac{dz_2}{d\theta} &= W_2 a_{23} (z_3 + z_1 - 2z_2) \\ M_3 \frac{dz_3}{d\theta} &= W_3 a_{34} (z_4 + z_2 - 2z_3) \\ M_4 \frac{dz_4}{d\theta} &= W_4 a_{41} (z_1 + z_3 - 2z_4) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

初期條件은 $z_1=1, z_2=z_3=z_4=0$

(1)式을 初期條件에 依하여 풀면

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= \frac{1}{4} (1 + e^{-4k\theta} + 2e^{-2k\theta}) \\ z_2 &= z_4 = \frac{1}{4} (1 - e^{-4k\theta}) \\ z_3 &= \frac{1}{4} (1 + e^{-4k\theta} - 2e^{-2k\theta}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

實驗結果 및 檢討

(1) $N=2$ 의 경우 裝置構造 因子에 對한 影響을 檢討하기 위하여 開孔의 位置, 開孔 面積 및 靜止層高對 筒徑比(L_D/D)를 變更시켜서 混合速度를 測定한 것이 Table 1이다. Table 1의 結果를 Fig. 3와 같이 plot

(2) 一連의 研究에 있어서 使用한 tracer 로서의 食鹽 粒子의 適否를 檢討한 것이 Table 2이다. Table 2에 의하면 粉體가 glass powder인 경우에는 食鹽粉子가 tracer로서 適當함을 알 수 있다.

U [cm sec ⁻¹]	$L_0/D=1$		$L_0/D=2$		
	$a_\phi=3.14\text{cm}^2$ $h=60\text{mm}$	$a_\phi=6.28\text{cm}^2$ $h=60\text{mm}$	$a_\phi=6.28\text{cm}^2$ $h=60\text{mm}$	$a_\phi=6.28\text{cm}^2$ $h=80\text{mm}$	$a_\phi'=6.28\text{cm}^2$ $a_\phi''=6.28\text{cm}^2$ $h'=60\text{mm}$ $h''=80\text{mm}$
3.75	—	2.5	—	—	—
7.5	4	5	4	—	—
10	—	—	—	—	9
12.5	15	15	13	—	—
15	15	—	—	—	—
18.7	20	20	20	—	—
20	—	—	—	20	20
25	35	30	23	—	—
30	—	—	—	30	—
37.5	—	30	—	—	—

$u_0 = 10 \text{ [cm/sec]}$
 $W = 3.6 \text{ [kg/m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}]$
 $\alpha \phi = 3.14 \times 10^{-4} \text{ [m}^2]$
 $M = 3.5 \times 10^{-11} \text{ [kg]}$
 $\frac{W}{\alpha \phi} = 3.2 \times 10^{-3} \text{ [sec}^{-1}]$

θ (degrees)	u_1 (normalized)	u_2 (normalized)	u_3 (normalized)
0	1.0	0.0	0.0
50	0.85	0.15	0.02
100	0.75	0.25	0.03
150	0.65	0.28	0.05
200	0.58	0.28	0.08
250	0.52	0.28	0.10
300	0.48	0.28	0.12
350	0.45	0.28	0.14
400	0.42	0.28	0.16

A graph showing the relationship between W (Y-axis, logarithmic scale from 0.5 to 100) and u (X-axis, linear scale from 0 to 10). The graph contains several data series for different values of h and a . A line is drawn through the data points for $h=60$ mm and $a=6.28$, labeled $W = 0.75 \cdot u^{0.166}$. The data points are as follows:

Symbol	h (mm)	a	W (approx.)	u (approx.)
▲	60	6.28	1.2	1.5
×	50	3.14	1.5	2.5
○	60	6.28	1.8	3.5
△	80	6.28	2.2	4.5
□	60	6.28	2.5	5.5
△	80	6.28	3.0	6.5
△	80	6.28	3.0	7.5
△	80	6.28	3.0	8.5

Legend:

- ▲ $h=60$ mm $a=6.28$ $L_p=1$
- ×
- $h=60$ mm $a=6.28$ $L_p=2$
- △ $h=80$ mm $a=6.28$ $L_p=2$
- $h=60$ mm $a=6.28$ $L_p=2$

$u = 10 \text{ [Cm Sec}^{-1}\text{]}$
 $W = 36 \text{ [kg m}^{-2} \text{Sec}^{-1}\text{]}$
 $q\phi = 3.14 \times 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$
 $M = 3.5 \times 10^{-4} \text{ [kg]}$
 $k = \frac{W}{q\phi} = 3.2 \times 10^{-3} \text{ [Sec}^{-1}\text{]}$

The graph shows the relationship between reduced viscosity η_{sp}/c and concentration c for a 10% solution of polyacrylamide in water. The y-axis represents η_{sp}/c (labeled η_{sp}) and ranges from 0.0 to 1.0. The x-axis represents concentration c (labeled A) and ranges from 0 to 400. A solid curve starts at (0, 1.0) and decreases. Four data series are plotted: Z_1 (circles), Z_2 (crosses), Z_3 (triangles), and Z_4 (squares).

	60~100mesh	60~140mesh	100~140mesh
Glass powder	3.3	2.5	1.4
NaCl	3.3	2.2	1.2

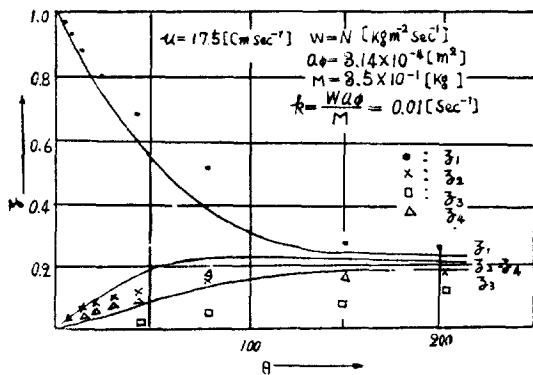


Fig. 6. z_j vs θ in Case of Connection in Ring Form ($N=3$)

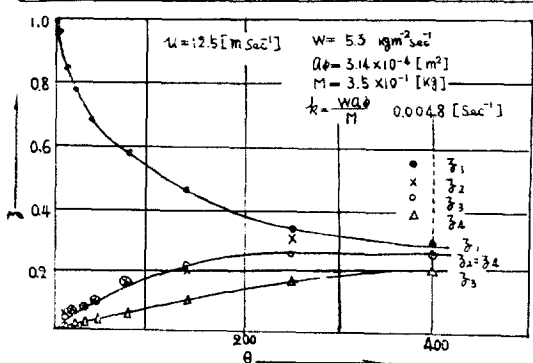


Fig. 7. z_j vs θ in Case of Connection in Ring Form ($N=4$)

即 Fig 4, 5 는 線形連成의 한 例를 plot 한 것이고, Fig 6, 7 은 環狀連成의 한 例를 plt 한 것이다. 여기서 理論値는 曲線으로 表示했고 實驗値는 點으로 表示했다.

Fig 4, 5, 6, 7 에 의하면, $N=2$ 의 경우에 있어서 實驗의으로 求해진 W vs u 의 關係式은 連成槽가 3 및 4 의 裝置에 있어서도 實驗誤差의 範圍 內에서 잘 適用된다는 것이 確認되었다.

(4) 流動層內 隔壁開孔을 通해서의 氣體의 舉動에 關한 研究⁷⁾에서, 流動層間에 shutter 를 부쳐 He, H₂ 등의 tracer 를 流動層에 impulse 狀으로 넣어 煙草用의 filter 를 부친 細管에 依하여, 層中 내지 層上에서 gas chromatograph 에 依한 應答을 보면서, tracer 를 送入한 column 1 과 shutter 및 開孔을 通해서 連成되어 있는 column 2 의 各部의 tracer 濃度를 檢知했다. 이때 記錄紙上의 column 2 과 column 2 에서 check된 peak 의 面積比로부터, 分流比 f 가 顯著하게 작으며 流速의 增大에 따라 粉粒體의 混合速度는 折點까지는 增大함에 비해, 分流比는 急激히 減少하는 것을 알 수 있다. 即有孔隔壁에 依한 氣固系流動層에서의 粉粒體의 混合은

任意的 調節에 따라 容易한 反面, 氣體는 普通의 流動化 反應裝置에서 要求되고 있는 piston flow 인 것이다.

結 論

(1) 實驗的으로 粒體混合速度를 測定함에 있어서 裝置의 構造因子인 開孔의 位置 및 斷面積 등의 混合速度에 미치는 影響을 檢討한 結果, 本文 中에서 記錄된 實驗範圍內에서는 이와같은 因子의 影響이 거의 없다는 것을 알았으며, 여기서 使用한 食用鹽粉體는 試驗粉體가 glass powder 인 경우 tracer 로서 適合하다는 것을 알았다.

(2) 實驗結果와, 위와 같은 各槽의 tracer 分率, $\{z_j\}$, 에 因한 理論式이 實驗 誤差範圍 內에서 잘 맞는 事實로부터, 이 scale-up 方式은 各槽 內의 流動化狀態를 實驗室의 小規模裝置의 것과 거의 同一하게 하는데 實用性이 있다는 것을 알려준다.

(3) 層內의 垂直隔壁의 開孔을 通한 流動氣體의 隣接槽 間의 交流가, $u/umf < 5.0$ 의 範圍 內에서 不過數% 程度이고, $u/umf > 10.0$ 에서는 거의 無視될 수 있음은, 이 方式이 流動化 觸媒反應裝置에 利用될 때, 反應氣體에 關해서는 보다 piston flow 의 特性이 確保되고 觸媒에 關해서는 層內 混合速度가 任意로 調節됨으로, 相當히 反應操作의 設計가 容易한 同時에 反應率을 높일 수 있을 것이 豫想된다.

記號說明

- u : Linear gas velocity, [cm sec⁻¹]
- umf : Minimum fluidization velocity
- z_j : Tracer fraction of j -th compartment
- a_0 : Opening area of hole of the internal wall, [m²]
- W : Rate of solids mixing [kg, m⁻² sec⁻¹]
- M_j : Mass of powder of j -th compartment, [kg]
- θ : Integral mixing time, [sec]
- N : Total number of compartment

k : Rate constant of solids mixing, [sec⁻¹], $k = \frac{W a_0}{M}$

參考文獻

- 1) 大前, 古川; 工化誌(日本) 56, p.909(1953)
白井隆他; 日本特許公告, 昭 28, 1863(1953)
- 2) 久保田, Osberg, 南宮; 化學工學協會(日本) 第 27 年會 講演 要旨, p.23(1962)
- 3) 早川, 渡邊, 杉本, 藤田; 化學協會(日本) 第 3 回總合 Symposium 講演 要旨, p.57(1964)
- 4) Volk, Johnson, and Stotler; Chem. Eng. Progr. Symposium Series, No.38. 58, 38(1962)
- 5) 南宮, 鄭; J.Korean Inst. chem. Eng. 2.87(1964)
- 6) 南宮, 大山, 石川; 化學協會(日本) 第 28 年會 講演 要旨, p.179, p.243(1963)
南宮他; 日本 特許出願中(1963 年 7 月 31 日)
- 7) 南宮, 柳; 韓國化學工學會臨時總會, 1964 年 11 月 8 日(釜山)