

氣·固系流動層의 2 相間氣體交換係數와
接觸示數와의 關係

南 宮 寔*. 文 世 基**

Correlation of the Gas-Solid Contacting Index and
the Gas Cross Flow Coefficient of a Gas Fluidized Solid Bed

by

Shik NamKoong* and Sei Ki Moon**

* Dept. of Chem. Eng., School of Eng., Seoul University

** Dept of Chem. Eng., School of Eng., Hanyang University

ABSTRACT

We have reported that the gas-solid contacting index(V_c) is eligible to evaluate the fluidization quality of a gas fluidized solid bed, which is obtained easily from the analysis of the current method oscillogram.

In the range of gas velocity ratio to minimum fluidization velocity of the particle(U_0/U_{mf}) from 1.5 to 7.0. It was found that there is a linear relationship between the gas cross flow coefficient(K_g) and the gas-solid contacting index(V_D), and that the proposed contacting index was one of the most useful and simplest index for the prediction of the fluidization quality.

序 論

流動層 反應裝置의 設計資料를 얻기 위해서는 특히 流動層內에서의 氣泡의 舉動, 粒子의 舉動, 粒子 및 流體의 混合等 諸現象間의 相互 關連性이 要求된다. 또한 觸媒에 의한 氣相 反應의 경우 連續相과 氣泡相 사이에서의 氣體 交換이 중요함을 前報에서 發表했다. 即 流動化 狀態가 目的하는 어떤 反應에 적합한가 어떤가를 定量的으로 알아야할 必要가 있는 것이다.

따라서 流動層內의 粒子 gas 體間의 氣體 移動 現象이나 總括的 反應速度의 問題를 理論的으로 究明해야 함은 물론 그렇게 하기 위해서는 粒子群과 gas 體와의 本質的인 相對運動이나 接觸의 現象을 正確히 把握해야 하는것이 先決 問題이다.

流動層內의 粒子 密度나 壓力이 時間的으로 變動하는 流動化의 狀態를 檢知함과 同時에 氣泡의 크기나 上昇速度等を 測定하는 研究가 Morse²⁾, Hanson³⁾, Davidson⁴⁾ 및 南宮^{5, 6)} 등에 의해 提案되었다. 南宮^{2, 5, 6)} 등에 의한 研究는 Morse²⁾, Hanson³⁾ 등의 方法을 改良한 것이며 Morse²⁾ 및 Hanson³⁾ 등이 Uniformity Index 를 定性的인 것이라 한다면, 南宮^{5, 6)} 등이 提案한 Slugging Index, Velocity Index 및 Mixing Index 등은 定性的인 것과 同時에 半定量的인 意味를 갖고 있음을 알수있다.

實驗 및 實驗方法

實驗 裝置는 Fig. 1에 表示 했으며 實驗 條件은 Table. 1 과 같다.

* 서울工大

** 漢陽工大

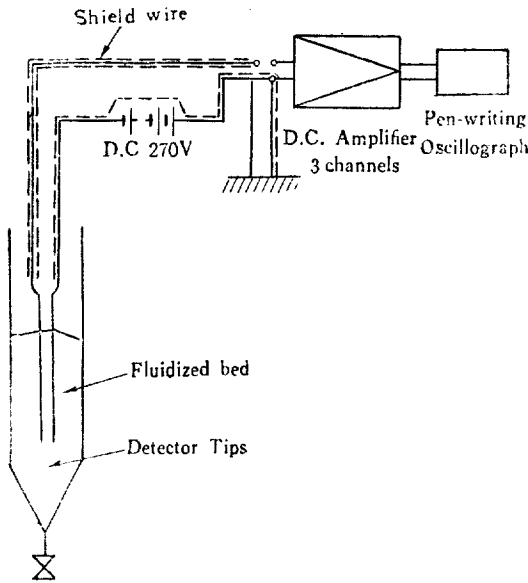


Fig. 1. Sketch of the Leak-Current Meter

流動層은 二次元 流動層으로서 Demension 은 $30\text{cm} \times 2.5\text{cm} \times 80\text{cm}$ 이고 4mm 두께의 板유리로 만들었다.

Table 1. Operation Conditions

流動層	二次元 流動層($30\text{cm} \times 2.5\text{cm} \times 80\text{cm}$)
使用分體	Kaolin size 30~60mesh. $\bar{d}_p = 4.23 \times 10^{-2}\text{cm}$ $\rho_p = 2.35$ $U_{mf} = 3.1\text{cm/sec}$ $\epsilon_o = 0.66$ $\alpha = 0.062$ $L_o = 19.7$
	石灰石 size 60~100mesh. $\bar{d}_p = 1.99 \times 10^{-2}\text{cm}$ $\rho_p = 1.77$ $U_{mf} = 1.4\text{cm/sec}$ $\epsilon_o = 0.32$ $\alpha = 0.18$ $L_o = 22.5\text{cm}$
流體	Air($20 \sim 25^\circ\text{C}$)
流速	$4.8 \sim 9.7\text{cm/sec}$

分散板은 銅板에 $0.5\text{mm}\phi$ 의 hole을 約 300個를 配置한 多孔板 두장을 使用했으며 均一한 流動化 狀態를 얻고자 그사이에 20~30 mesh의 sand를 充填하였다. 檢知部는 Fig. 2와 같다.

檢知部 兩極間에는 270 volt의 直流 電源을 連結했으며 粉粒體가 極에 接觸했을때 이외에서의 流動層內에 유도 되는 모든 charge를 없애기 위해서 Fig. 1의 點線과 같이 earth 했다.

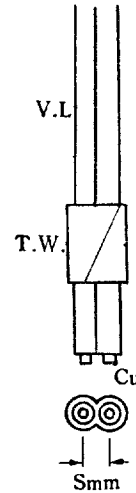


Fig. 2. Leak-Current Detection Probe
V.L: Vinyl Shield Electric Lead
T.W: Authesine Tape Winding
C.U: $1.5\text{mm}\phi$ Core

實驗結果 및 考察

粒子 舉動의 解析에 對한 南宮^{5,6)} 등의 提案을 고려 해보면 檢知端에 粒子가 接觸하게 될때 그에 인가한 電源과의 回路가 close 됨으로 Oscillograph 상에는 peak를 나타나게 되는데 그들은 이 peak의 진동數와 진폭 變化로 부터 時間과 空間의으로 變動이 심한 流動層의 現象을 다음과같은 示數를 提案하여 說明하였다. 이때 Oscillograph에 나타난 代表的인 peak를 Fig 3에 表示했다.

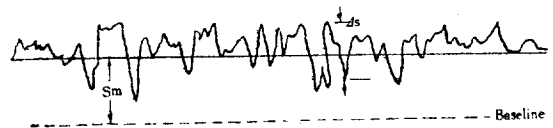


Fig. 3. Pen Oscillogram

Fig. 3에서 ΔS 는 Oscillogram에 나타난 진폭이며 S_m 는 base line으로부터 peak 中心線까지의 거리이고

n 는 1 sec 동안의 振動數이다.

이때 C_s 를 Slugging index, Ω 를 Velocity index, Ω^* 를 Mixing index 라 하면 이들은 各各 다음과 같이 定義된다.

$$C_s = \frac{\lambda_t}{n_m} [-] \dots\dots\dots (1)$$

$$\Omega = \frac{\Delta S}{S_m} n_m [\text{sec}^{-1}] \dots\dots\dots (2)$$

$$\Omega^* = \left(\frac{\Delta S}{S_m} \right) \left(\frac{n_m}{\lambda_t} \right) [-] \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{여기서 } n_m = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T n_i [\text{sec}^{-1}] \dots\dots\dots (4)$$

$$\lambda_t = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (n_i - n_m)^2} [\text{sec}^{-1}] \dots\dots (5)$$

流速과 檢知端의 位置를 軸方向으로 移動시키면서 測定한 結果를 Table. 1, Table. 2, 에 表示했다.

Table. 2 Measured Index Value for Kaolin

$$\nu = \frac{Z}{u_o} \Omega$$

n_m	L_f u_o	0	5	10	15
	4.8	8.5	6.1	4.7	3.4
	6.0	10.8	6.3	4.2	3.2
	7.2	9.2	5.1	4.5	3.6
	8.6	8.2		4.7	
	9.7	7.6	5.6		3.5
λ_t	4.8	0.50	1.04	0.63	0.49
	6.0	0.87	1.10	0.43	0.40
	7.2	0.83	1.56	0.83	0.64
	8.6	0.95		0.64	
	9.7	0.82	1.02		0.50
C_s	4.8	0.059	0.176	0.134	0.144
	6.0	0.081	0.175	0.103	0.125
	7.2	0.090	0.360	0.185	0.175
	8.6	0.116		0.136	
	9.7	0.108	0.182		0.143
Ω	4.8	3.07	8.48	6.38	7.87
	6.0	8.64	12.35	6.43	7.89
	7.2	7.64	12.40	6.75	8.64
	8.6	9.84		7.26	
	9.7	14.14	12.10		7.70
Ω^*	4.8	6.14	8.30	10.5	16.6
	6.0	9.92	11.21	14.9	21.7
	7.2	9.25	8.68	8.12	13.7
	8.6	10.35		11.35	
	9.7	10.90	11.85		15.4

Table 3. Measured Index Value for CaCO₃

	L_f u_o	0	5	10	15	20
n_m	4.8			5.5	6.1	4.0
	6.0		4.5	5.6	5.3	3.6
	7.2	5.3	5.4	5.3	4.7	4.0
	8.6	5.9	5.1	4.1	4.2	3.5
	9.7	5.6		4.1	4.0	3.4
λ_t	4.8			0.90	0.64	0.50
	6.0		0.50	0.77	0.78	0.48
	7.2	0.45	0.49	0.66	0.78	0.50
	8.6	0.70	0.60	0.53	0.78	0.68
	9.7	0.8		0.78	0.67	0.66
C_s	4.8			0.16	0.11	0.13
	6.0		0.11	0.14	0.15	0.13
	7.2	0.85	0.91	0.13	0.17	0.13
	8.6	0.14	0.12	0.13	0.19	0.18
	6.7	0.14		0.19	0.17	0.20
Ω	4.8			3.02	3.43	4.59
	6.0		2.44	3.91	4.65	5.00
	7.2	1.68	3.20	3.59	4.34	4.98
	8.6	4.00	3.41	3.55	3.79	5.60
	9.7	4.10		3.70	3.12	5.1
Ω^v	4.8			3.35	4.87	9.2
	6.0		4.88	5.09	5.95	10.4
	7.2	3.72	6.52	5.44	5.57	10.1
	8.6	5.68	5.57	6.72	6.90	8.25
	9.7	5.15		4.89	4.72	7.73

Table. 2와 Table. 3에서 보면 平均振動數 n_m 은 分散板으로 부터의 높이가 높을수록 減少함을 나타내고 있는데 이것은 氣泡의 回合 model로부터 생각할때 실제로 檢知端에 충돌하는 粒子는 하나의 粒子群을 이루고 반복 하면서 일어나게되며 이것은 本研究者等이 提案한 二相 model에서 하나의 氣泡가 軸方向으로 上昇할때 그윗부분의 分體를 밀고올라 가게 되는데 이때 이 部分의 粒子密度는 流動層內의 어떤 部分에서 比較 크게 되므로 電氣回路를 close 하게 된다. 따라서 氣泡가 上昇하면서 氣泡 相互間에 融合이 일어난다면 分散板으로부터 높을수록 氣泡의 數는 감소하며 振動 即 氣泡徑이 增加하게 됨을 알수있다. 結局 速度示數에서 보면 n_m 값의 測定條件과 同一條件에서 Ω 가 分散板으로부터의 거리가 증가함에도 불구하고 n_m 의 값에 反해 서서히 실제로 振幅이 차차 증가함을 의미하고 있다.

또한 流速의 영향을 보면 振動數가 차차 증가함을

나타내고 있으며 속도示數가 차차 증가함을 나타내고 있다. 이것은 單位時間에 分散板에서 生成하는 氣泡의 빈도가 流速의 증가에 따라 증가한다는 것을 意味하며 실제로 分散板 直上에서의 氣泡 生成 빈도는 그곳을 通하는 流體量에 比例 함을 알수 있다.

한편 本研究者들은 南宮等이 提案한 index 中 velocity index 에 注目하여 다음과 같은 새로운 index 를 제안한다.

$$\nu = \Omega(L_f/U_0) \dots \dots \dots (6)$$

여기서 ν 를 流動化時 層內 濃厚相과 氣泡相間의 接觸示數(Contacting Index)라 한다.

또한 U_f/U_0 는 流動層內에서의 氣體의 체류 時間인 을 알수있다.

(6)式에 의해 計算한 軸方向의 接觸數를 Table. 4, Table. 5 에 表示했고 Fig. 4, Fig. 5 에 plot 했다.

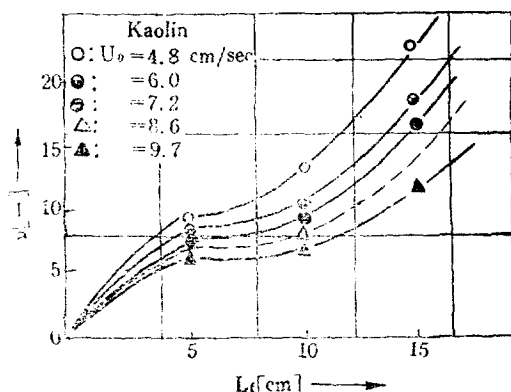


Fig. 4 Longitudinal Contacting Index for Kaolin

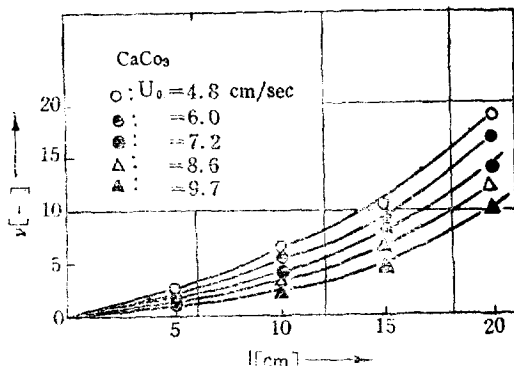


Fig. 5 Longitudinal Contacting Index for CaCO₃

Table. 4, 5 및 Fig. 4, 5에서 보면 流速의 증가에 따라 接觸示數가 감소함을 알수있다. 即 接觸示數가 減小한다함은 流動層 觸媒反應裝置의 경우 反應收率이

減少함을 意味하여 流動化 相態가 좋지 않다는 것의 미한다. Morse 等이 提唱한 uniformity index 를 생각해보면 流動層의 均一性과 uniformity index간에는 다음과 같다고 報告했다. 流動層의 均一性良好 약간중다 나쁘다. slugging uniformity index <1.0, 1~5, 5~60, 60>

여기에서 보면 流動化 狀態에 對한 正성적인 分類만 이 되어 있을 뿐이다. 한편 南宮等의 index 를 생각하면 $C_s=2.0$ $\Omega^*=0.33$ sedimentatic 를 생각하면 $C_s=1.46$ $\Omega^*=0.78$ slugging $C_s=1.04$, $\Omega^*=1.55$; slugging $C_s=0.50$, $\Omega^*=2.0$ fluidization 即 mixing index Ω^* 가 커지고 slugging index C_s 가 減少할수록 流動化狀態가 좋아짐을 의미하고 있다. 局所의 部分에서의 flow pattern 을 이들 index 로서 어느 程度 規定化할수 있다는데 중요한 意義를 가지며 南宮, 柳等에 의하면 mixing rate W_m 과 mixing rate Ω^* 가 다같이 10 이상인 경우 log-log paper 에서 直線關係를 나타내고 있다. 이들 값이 10 이하에서 直線關係가 이루어지지 않는것은 流動化 不均一性 即 良好한 流動化 狀態가 아니기 때문인 것으로 추측되며 mixing index 의 증가는 mixing rate 의 증가를 의미한다는 점에서 어느 程度 流動層內의 mixing 現象을 定量的으로 說明할수있다. 그러나 流動層은 反應裝置로 使用할 경우에는 反應收率의 成績을 評價할수있는 定量的인 表示가 要求되었다. 따라서 本研究에서는 前報⁹⁾한 二相間 gas 交換示數와 接觸示數를 Fig. 6 에 plot 했으며, Table. 6, 7 의 값과 같다.

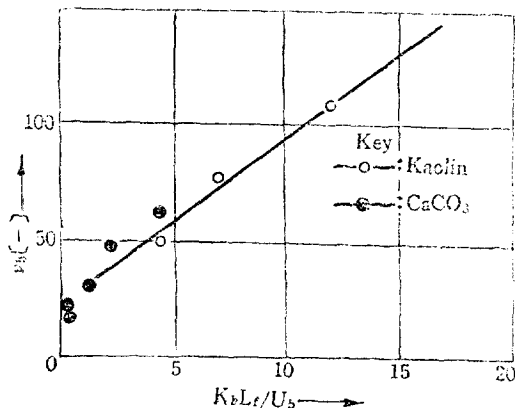


Fig. 6 Contacting Index based on Bubble vs $K_x L_x / U_0$

Table. 6

U_o	ν_b	$(K)_b$	L_f	U_B	$K_b L_f / \bar{U}_b$	$\bar{\Omega}$	δ
4.8	170	13.6	24.3	15.5	19.8	7.5	0.14
6.0	110	9.5	25.0	20.2	11.7	8.8	0.17
7.2	75	5.5	26.5	22.2	6.6	8.8	0.23
8.6	50	4.5	27.2	26.9	4.5	7.6	0.23
9.7	45	4.0	27.7	30.0	3.7	8.9	0.24

$$U_{mf}=3.1[\text{cm/sec}]$$

$$\epsilon_0=0.66$$

Table. 7

U_o	ν_b	$(K)_b$	\bar{L}_f	\bar{U}_B	$K_b \bar{L}_f / \bar{U}_b$	$\bar{\Omega}$	δ
4.8	66.5	3.6	27.5	23.2	4.3	3.6	0.16
6.0	48.5	2.0	29.0	25.0	2.3	4.0	0.20
7.2	29.0	1.2	31.5	28.0	1.4	3.6	0.26
8.6	26.5	0.5	32.5	33.0	0.5	4.1	0.29
9.7	21.2	0.2	34.0	34.0	0.3	4.0	0.33

$$U_{mf}=1.4[\text{cm/sec}]$$

$$\epsilon_0=0.32$$

Table. 6 및 Fig. 6의 값은 Table. 2, 3의 velocity index의 充填層高의 平均值로부터 計算했으며 氣泡單位體積當의 값으로 나타냈다.

$$\text{即 } \nu_b = \frac{\nu}{\lambda} = (\bar{\Omega}/\delta)(L_f/U_o) \dots \dots \dots (7)$$

Fig. 6에서 보면 ν_b 와 二相間 gas 交換示數와의 사이에는

$$\nu_b = 7.7 K_b (L_f/U_o) + 20 \dots \dots \dots (8)$$

와 같은 關係式이 成立하며 $(K_b) \bar{L}_f / \bar{U}_b$ 가 零이라 함은 流速 U_o 가 大端히 큰 경우에도 接觸示數의 값이 20 정도이다. 대체로 이런 경우를 輸送層(transported bed)이라 하는데 이때 接觸示數의 값이 거의 一定하다 함은 流體中에 粒子가 共存해서 같이 行動을 하므로 流體의 速度에 거의 無關하게 一定할 것이라는 結論을 내릴 수 있겠다. 한가지 미비點은 分散板의 影響을 고려하지 않았다는 것이겠으나 이點에 對해서는 다음 기회에 보충하려 한다.

結 論

1. 流動層 觸媒反應裝置의 경우 氣泡相과 濃厚相간의 接觸示數를 다음과 같이 定義한다.

$$\nu_b = \left(\frac{\bar{\Omega}}{\delta} \right) (L_f/U_o)$$

2. 接觸示數와 二相間 gas 交換係數 \bar{K}_b 간에는 다음

관계가 成立한다.

$$\nu_b = 7.7 (K_b) (L_f/U_b)$$

3. ν_b 는 流動層 觸媒反應의 경우 反應收率의 成績이 우열을 意味하는 index 이다.

4. 輸送層의 경우에 接觸示數가 20 정도라 함은 이 경우에도 反應은 적으나마 進行이 된다고 말할수있다.

使用 記號

C_s Slugging index [—]

d_p Particle diameter [cm]

K_b Gas cross flow coefficient based on bubble [sec^{-1}]

L_f Height of fluidization [cm]

L_o Height of minimum fluidization [cm]

n_m frequency [sec^{-1}]

ΔS Amplitude [cm]

S_m Width of the center line and line [cm]

U_b Bubbles rising Velocity [cm/sec]

U_o linear Velocity [cm/sec]

α Volume ratio wake and bubble [—]

δ Fraction of bed cross section area of bubble phase [—]

ϵ_0 Void fraction of a static bed [—]

ρ_p Particle density [gr/cm^3]

ν Contacting index [—]

ν_b Contacting index based on bubble phase [—]

引用 文獻

1. 南宮 寔, 文世基; 化學공학 Vol 5 p. 7(1967)
2. Mores. R. D. and Ballon. C. O; Chem. Eng. Progr. 47. 199(51)
3. Hanson V. F. and, Friel. D. D.; Chem. Eng. Progr 45 491(49)
4. Davidson, J. F., Paul. R. C, Smith; Trans. Instn. Chem, Eng, London 37. 323. (59).
5. 南宮, 新井, 進藤; 化學工學協會 24年會講演 (1959)
6. 南宮 寔; 化學工學 25 630(1961)
7. 南宮 寔; 柳慶玉; 化學공학 Vol. 3 151(1965)
8. 南宮 寔 文世基; 化學공학 Vol. 5 97(1967)
9. 南宮 寔 鄭雨昌; 化學공학 Vol. 3 34(1965)