

流動層 豫備煨燒機의 流動特性에 關한 研究

李 正 洙 金 相 敦

<東洋세멘트三陟工場> <韓國科學技術院>

1. 서 론

유동화 예비하소기(MFC)의 설계조건을 살펴보면 유동화 공기유속은 820°C 조건에서 1.19m/sec 이고 freeboard에서의 空氣流速은 2 차공기 효과에 의해서 850°C 조건에서 3.54m/sec 이다. 시멘트 원료 입자의 평균입자직경이 30 μ m라 할 때 이 입자의 종말속도(Ut)는 2cm/sec 가 된다. 따라서 MFC의 조업 공기유속이 Ut의 약 60배 정도에 있다고 볼 수 있다. 이 점으로 보아서 유동화 예비하소기는 보통의 유동층과는 다른 고속 유동층에 속함을 알 수 있다. 따라서 유동화 예비하소기의 제반 특성을 이해하기 위해서 우선 시멘트 원료 입자와 공기에 대한 고속 유동층의 유동특성에 관한 연구가 필요하다고 보겠다.

본 연구에서는 시멘트 원료 입자와 공기계의 bubbling bed 와 turbulent bed 의 경계유속 Vc (slug breakdown velocity) 를 구하여 보고 bubbling, turbulent 및 fast beds 의 유동 특성을 살펴 보았다. 또한 위의 기본자료를 바탕으로 시멘트 원료 입자와 공기계의 수직관에서의 유동방식 도표(flow regime diagram) 를 작성하였다. 이 유동방식 도표작성 방법은 입자직경이 작은 fine particles (or non-choking system) 에 적용될 수 있는 것이며 유동방식 도표가 작성되면 조업하고자 하는 고체입자 속도와 기체속도가 주어짐에 따라 대강 수직관 내에서의 유동방식을 예측할 수 있다.

2. 이론적 배경

수직관에서 고체입자가 공기 등의 기체에 의해서 유동화되면서 이송될 때 주어진 고체입자의 물리적 성질과 수송량 및 기체의 속도에서 어떤 유동방식이 나타날 것인가를 예측하는 것은 대단히 중요하다. 이때 예측할 수 있는 유동방식으로는 희박상 유동(dilute phase flow), 농후상 유동(dense phase flow), 충전층 유동(packed bed flow)의 세가지로 분류될 수 있다.¹⁾

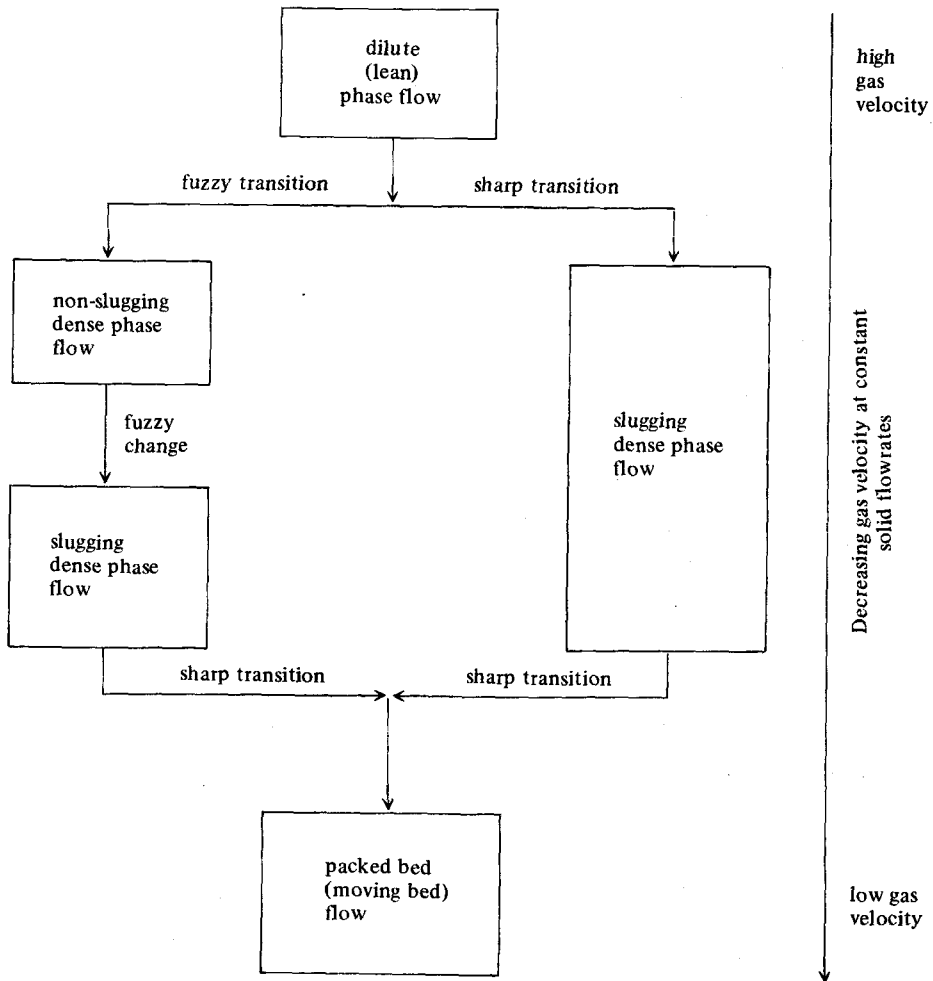
희박상 유동은 공기량에 대한 고체입자 수송량의 비(load ratio, R)가 작아서 고체입자의 체유량비(hold-up ratio)가 작고 공기유속이 큰 편이다. 농후상 유동은 R

이 희박상 유동보다 큰 유동 방식으로 slugging dense phase flow와 non-slugging dense phase flow가 있다. Bubbles (or slugs)가 완전하게 나타나 bubbling bed 상태로 수송되는 것이 slugging dense phase flow이고 turbulent bed 나 fast bed 상태로 수송되는 것이 non-slugging dense phase flow라 한다.

희박상 유동에서 농후상 유동으로 변화할 때 slugging 현상이 명확히 나타나는 계가 있고 그렇지 않은 계로 나눌 수 있는데 전자를 choking system이라 하고 후자를 non-choking system이라 한다. 위 두 계를 도식화하면 <그림-1>과 같이 된다.

(1) Non-choking system

본 연구의 대상인 시멘트 원료입자와 공기계가 choking system인가 non-choking system인가를 구분하여 보는 것이 우선 과제라 하겠다.



<그림-1> Flow patterns in vertical fluidized bed

Yang²⁾의 기준에 의하면

$$U_t^2 / (g_D) > 0.12 \quad \text{for choking system} \quad \dots\dots\dots (1)$$

본 연구대상에 위의 기준을 적용시켜 보면

시멘트 원료입자의 평균입자 직경 $\bar{d} = 23.6 \mu\text{m}$

시멘트 원료입자의 종말 속도 $U_t = 4.21 \text{ cm/sec}$

수직관 직경 $D = 7.8 \text{ cm}$

$$U_t^2 / (g_D) = \frac{(4.21)^2}{(980)(7.8)} = 0.00232 < 0.12$$

따라서 본 연구대상은 non-choking system에 속함을 알 수 있다. 그러므로 각 유동영역을 경계짓는 식은 3 가지가 필요하게 된다.

(2) 희박상 유동과 non-slugging dense phase flow의 경계에서는 다음의 두가지 가정을 도입할 수 있다.

<가정 1> 두 유동영역 사이에서의 경계공극률 ϵ_c 는 0.97 이다.

즉, $\epsilon_c = 0.97$

<가정 2> 두 유동영역 사이의 경계에서 공기유속 V_{ch} 는 ϵ 이 1에 접근할때의 slip velocity U_{sl}^* 로 본다. 즉,

$$V_{ch} = U_{sl}^*$$

Non-choking system에서 U_{sl}^* 은 Lewis³⁾ 등에 의해서 다음의 관계식을 만족하고 있음을 알 수 있다. 즉,

$$U_{sl}^* = \left[\frac{4}{3} \frac{(\rho_s - \rho_g)gd_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

<가정 1>, <가정 2>에 의해서 희박상 유동과 non-slugging dense phase flow 사이의 경계에서 다음의 식이 成立한다. 즉,

$$V_g / \epsilon_c - V_s / (1 - \epsilon_c) = U_{sl}^* \quad \dots\dots\dots (3)$$

위의 (3)식을 loading ratio R에 대해서 정리하면

$$R = 0.031 (\rho_s / \rho_g) [1 - 0.97 / V_g^+] \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서 $V_g^+ = V_g / U_{sl}^*$

또한 loading R은 V_g^+ 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$R = \frac{w_s}{\rho_g U_{sl}^*} \frac{1}{V_g^+} \quad \dots\dots\dots (5)$$

(3) Non-slugging dense phase flow 와 Slugging dense phase flow의 경계

Slugging dense phase flow에서 Non-slugging dense phase flow로 변화될 때의 조건이 유동층에서 slugs가 깨어지는 지점의 조건과 같다고 볼 수 있으므로 두 flows

의 경계에서는 다음의 식이 성립한다. 즉,

$$V_g / \epsilon_s - V_s / (1 - \epsilon_s) = V_c / \epsilon_s \dots\dots\dots (6)$$

여기서 ϵ_s 는 공기유속 V_c 에서의 공극률이다. 위의 (6)식을 loading ratio R에 대해서 다시 정리하면

$$R = \frac{(1 - \epsilon_s)}{\epsilon_s} (\rho_s / \rho_g) \left[1 - \frac{V_c}{U_{st}^*} \frac{1}{V_g^+} \right] \dots\dots\dots (7)$$

(4) Slugging dense phase flow와 충전층 유동 사이의 경계

위의 두 유동영역 사이의 경계조건은 최소 유동화 조건과 같다고 볼 수 있다. 따라서 이 경계에서는 다음의 식이 성립될 수 있다. 즉,

$$V_g / \epsilon_{mf} - V_s / (1 + \epsilon_{mf}) = V_{mf} / \epsilon_{mf} \dots\dots\dots (8)$$

여기서 ϵ_{mf} 는 최소 유동화 조건에서의 공극률이다. 위의 식 (8)을 loading ratio R에 대해서 다시 정리하면

$$R = \frac{(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}} (\rho_s / \rho_g) \left[1 - \frac{V_{mf}}{U_t} \cdot \frac{U_t}{U_{st}^*} \cdot \frac{1}{V_g^+} \right] \dots\dots\dots (9)$$

3. 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 장치는 투명한 plexiglas로 제작되었으며 장치의 schematic은 <그림-2>에 나와 있다. <그림-2>에서 왼쪽관이 주관(test column)으로 내경이 7.8 cm이고 분산판에서부터 높이가 600 cm이고 오른쪽관은 보조관으로 시료고체 입자의 저장 및 고체입자의 주입속도를 조절하고 내경은 16.8 cm이고 높이가 487 cm이다.

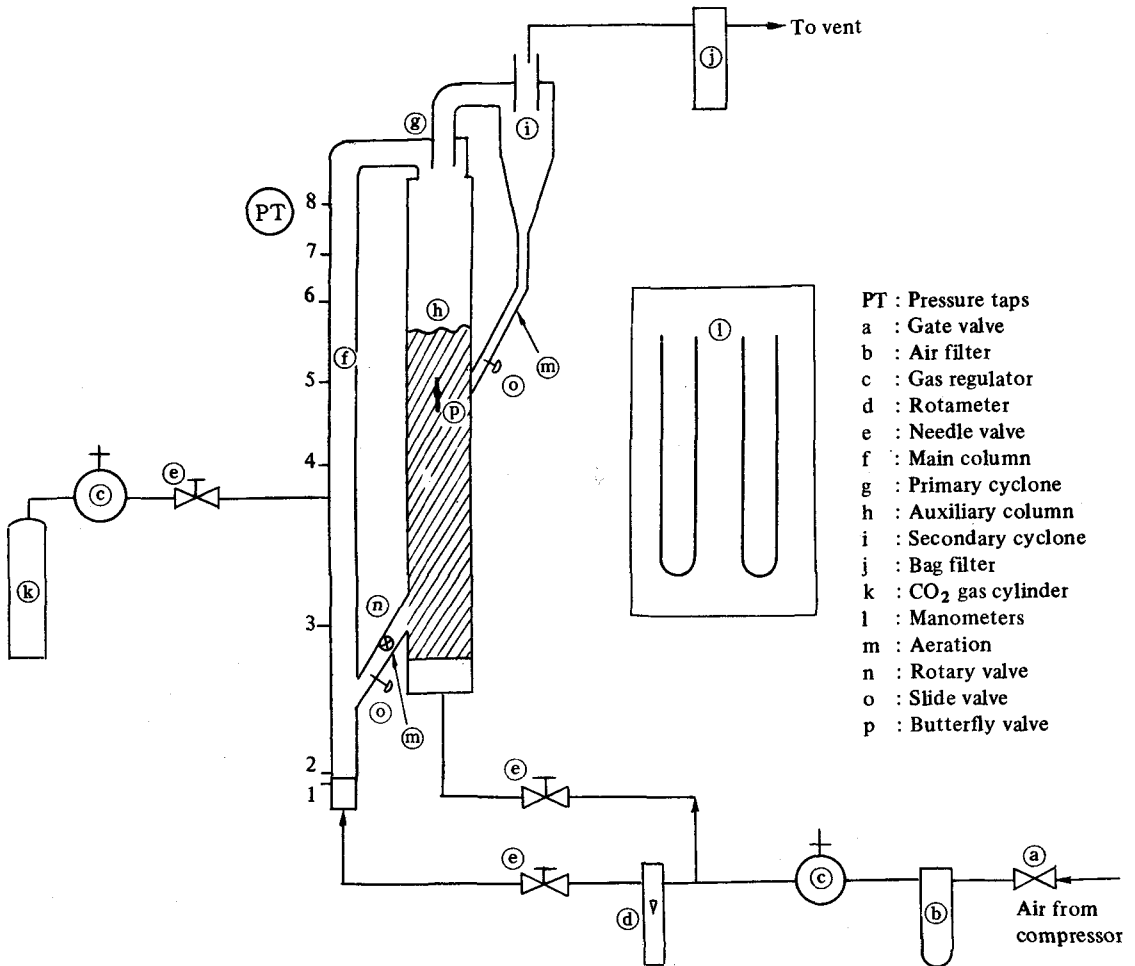
주관에서 압력강하를 측정하기 위해서 air chamber (1)와 분산판 바로 위 (2)와 분산판으로부터 150(3), 300(4), 390(5), 450(6), 500(7) 및 550(8) cm 지점에 pressure taps를 설치했고 압력강하는 CCl_4 manometer에 의해서 측정되었다.

본 연구에 사용된 원료 입자와 공기의 물성치는 <표-1>에 나와 있으며 시멘트 원료 입자는 동양시멘트 삼척공장의 제 1, 2호 원료 분쇄기에서 생산된 것을 사용했다.

4. 실험 결과

(1) Slug breakdown velocity (V_c)의 측정

Bubbling bed와 turbulent bed의 경계속도 V_c 를 구하기 위해서 공기 유속을 증가시켜 주면서 분산판 양단의 압력강하 변화(pressure drop fluctuation)를 측정하면 <그림-3>과 같이 된다. slug가 커지면서 slugs의 수축·팽창의 폭이 커지므로 공기유속이 증가하면서 압력강하 변화도 커지게 되어 V_c 근처에서 가장 커지다가 slugs가 깨지면서 다시 감소하게 된다. <그림-3>을 볼것 같으면 공기유속이 39 cm/sec



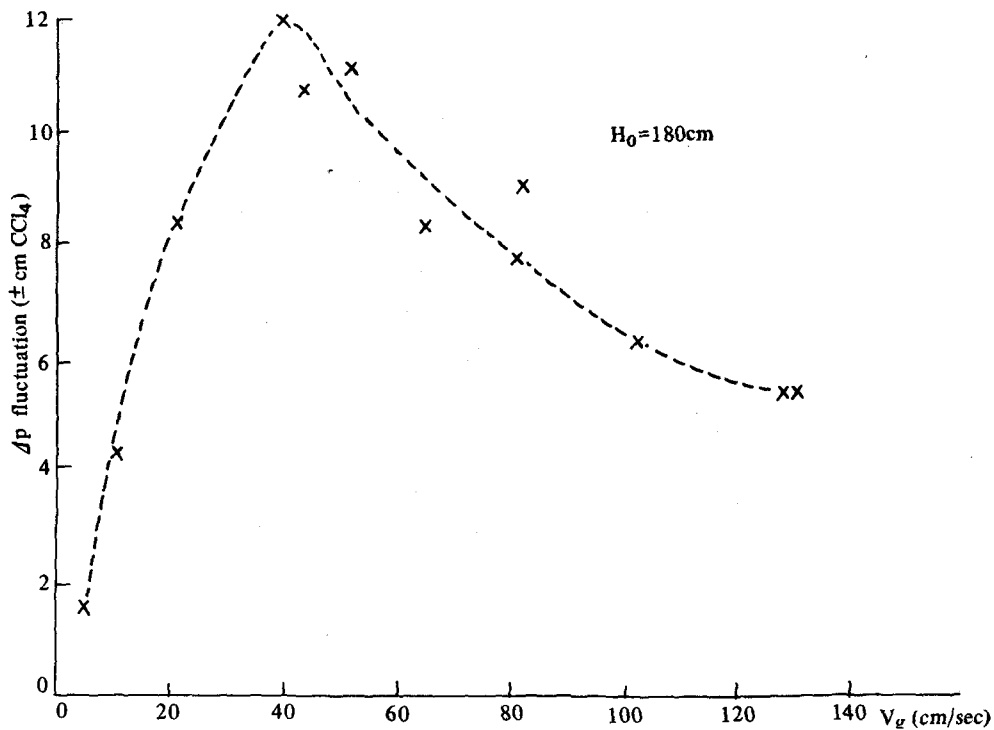
<그림 - 2> Schematic diagram of experimental apparatus

근처에서 압력강하 변화가 가장 심하게 나타났다. 이로부터 slug가 깨어지는 속도 V_c 는 약 39 cm/sec 라고 볼 수 있다.

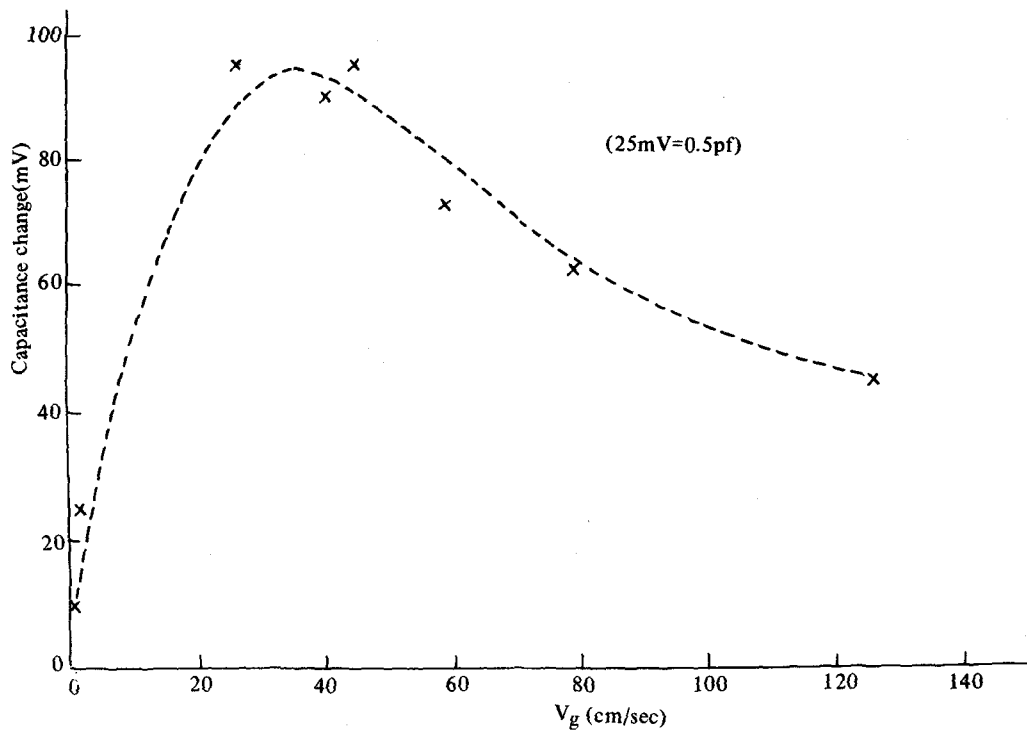
위의 결과를 확인하기 위해서 Capacitance probe를 이용해서 유동층의 균일성을 측정해 본 결과 <그림 - 4>와 같이 V_c 근처에서 유동층의 균일성이 가장 나쁘게 나타났다.

(2) Turbulent and fast beds

Turbulent bed에서 입자 주입량(W_s)을 변화시켜 주면서 일정 공기 유속에서 Pressure drop gradient ($\Delta P/\Delta L$)를 측정하면 대표적으로 공기유속이 129.6 cm/sec인 경



<그림 - 3> Effect of gas velocity on pressure drop fluctuations at height of 180cm

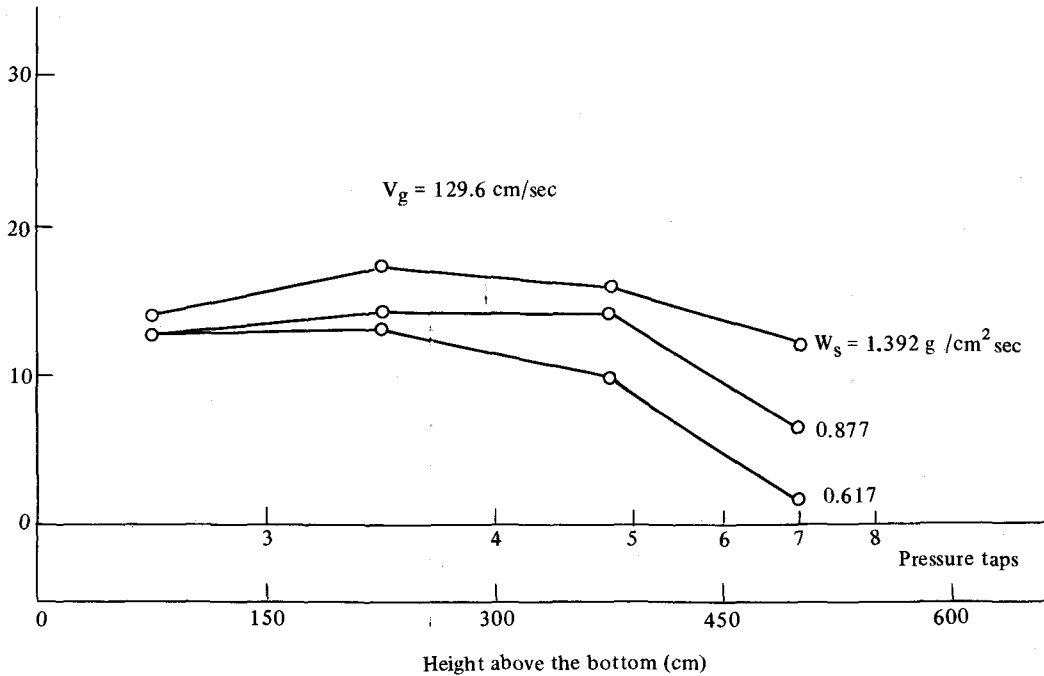


<그림 - 4> Effect of gas velocity on variation of capacitance change

<표-1>

Properties of cement raw meal and air

Cement raw meal		Physical properties	
Particle size distribution		Cement raw meal	Average particle diameter $d_p = 23.6 \mu\text{m}$ Particle density $\rho_s = 2.5 \text{ gm/cm}^3$ Loose packed density $\ell = 1.019 \text{ gm/cm}^3$
Particle (μm) size	Residue wt. %		
354	0.8		
250	2.05		
177	4.39		
147	7.17		
88	17.25		
53	28.26		
30	43.3		
23.1	50	Air	Air density $\rho_g = 0.0012 \text{ gm/cm}^3$ Viscosity $\mu = 0.00018 \text{ gm/cm} \cdot \text{sec}$
10	68.4		
5	79.4		



<그림-5> pressure drop gradient profile at different solid flow rates in turbulent bed

우에 <그림-5>와 같이 된다. <그림-5>에서 알 수 있듯이 입자 주입량이 작아지면 관의 500 cm 높이 근처의 $\Delta P/\Delta L$ 은 점차로 0에 가까워지고 있으나 관 밑부분의 $\Delta P/\Delta L$ 변화는 그다지 크게 나타나지 않고 있다. 이것은 Turbulent bed 상태에서는 입자 주입량을 증가시켜 주면 증가시켜준 입자량에 해당하는 입자들이 유동층에 머물게 되어서 유동층의 농도를 거의 변화시키지 않고 유동층 높이만을 증가시켜 주기 때문이다.

Turbulent bed 상태에서 공기유속을 점차 증가시키면서 수직관의 300 cm에서 450 cm 사이의 압력강하 구배를 측정하면 <그림-6>과 같이 된다. 일정공기 유속에서 입자 주입량에 따른 압력강하 구배를 살펴보면 공기유속 184.8 cm/sec 이후에는 입자 주입량에 따라서 상당히 민감하게 변화되고 있는 것을 알 수 있다. 이와같이 압력강하 구배가 공기유속과 입자주입 속도에 민감하게 변화하는 유동영역을 고속유동층이라고 부르며 유동층의 농도가 큰 유동영역을 Fast bed 라 부른다. Fast bed 영역에서 압력강하 구배($\Delta P/\Delta L$)를 공기유속과 입자 이동속도와 correlation 을 만들어 보면 다음과 같이 된다.

$$\Delta P/\Delta L = 3.75 V_g^{-2.94} W_s^{1.43} \dots\dots\dots (10)$$

여기서 $\Delta P/\Delta L$ 의 단위는 $1b/ft^3$ 이고 V_g 의 단위는 m/sec 이고 W_s 의 단위는 $gm/cm^2 \cdot sec$ 이다.

(3) 유동영역 도표(flow regime diagram)

위의 기본 자료들로 부터 시멘트 원료 입자와 공기계의 수직관에서의 각유동영역 사이의 관계식을 만들어 보면 다음과 같다.

- ① Dilute phase flow 와 Non-slugging dense phase flow ;

$$R = 64.6 [1 - 0.97/V_g^+] \dots\dots\dots (11)$$

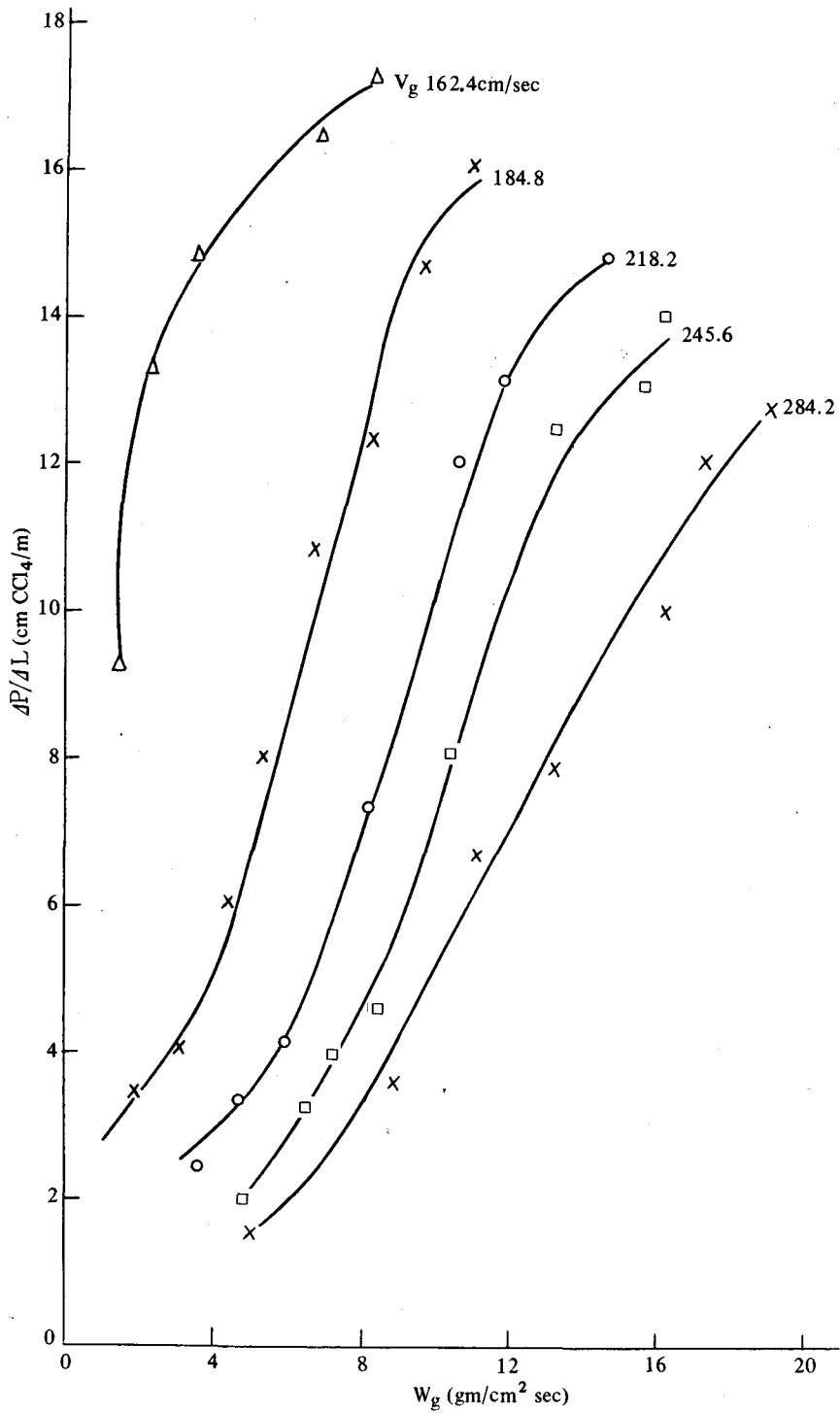
- ② Non-slugging dense phase flow 와 Slugging dense phase flow ;

$$R = 520.8 [1 - 0.486/V_g^+] \dots\dots\dots (12)$$

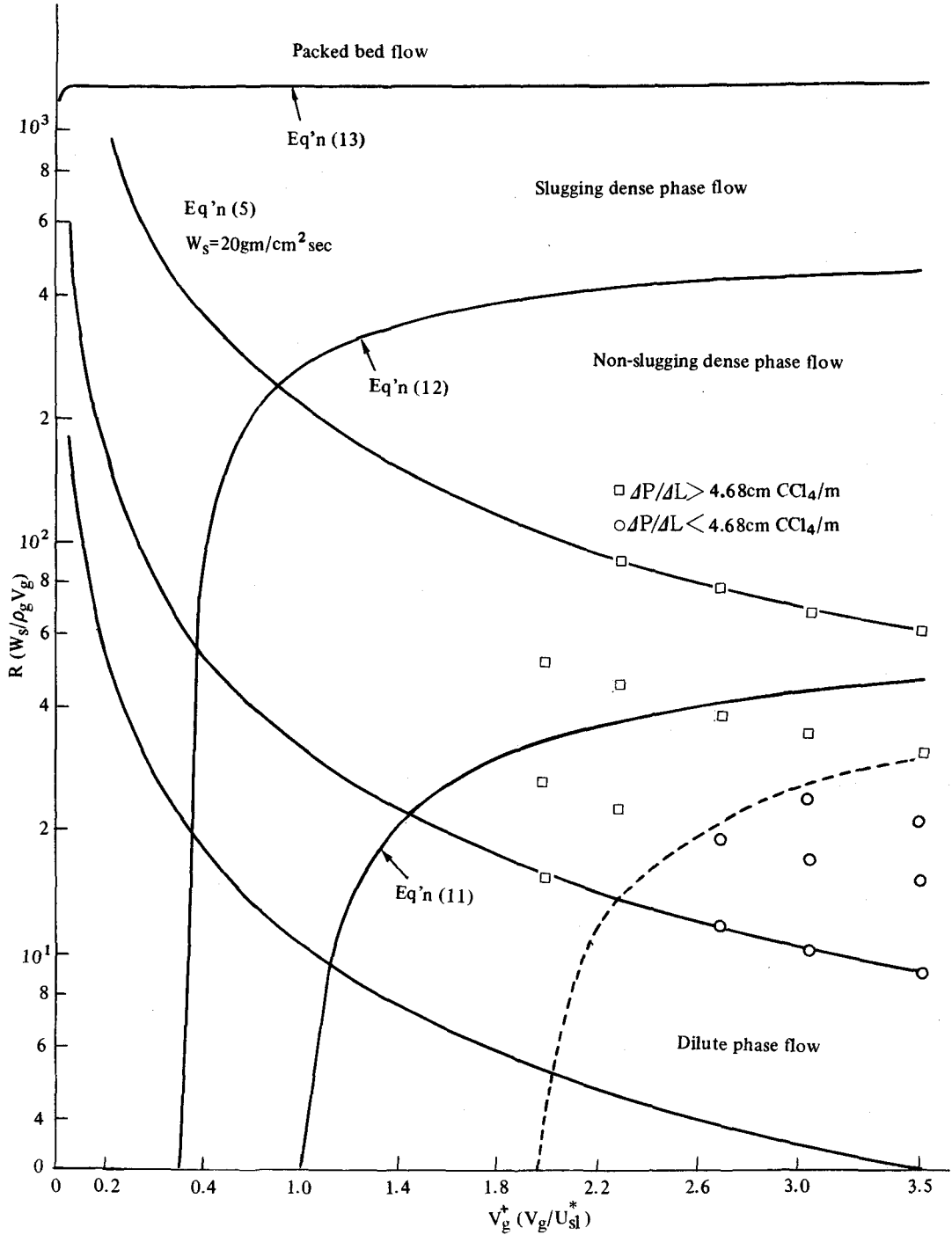
- ③ Slugging dense phase flow 와 Packed bed flow ;

$$R = 1,388.9 \left[1 - \frac{1}{1,747 V_g^+} \right] \dots\dots\dots (13)$$

위의 관계식들을 이용해서 유동방식 도표를 만들면 <그림-7>과 같이 된다.



<그림 - 6> Effect of solid flow rate on pressure drop between 300-450cm height



<그림 - 7> Flow regime diagram

술어 및 약어 해설

D	bed diameter	(cm)
dp	particle diameter (volume-surface mean diameter)	(cm)
g	gravitational constant	(cm/sec ²)
Ho	initial bed height	(cm)
L	bed height	(cm)
R	loading ratio (= $W_s/\rho_g Vg$)	(-)
U_{sl}^*	slip velocity at $\epsilon \rightarrow 1$	(cm/sec)
Ut	terminal velocity	(cm/sec)
Vc	slug breakdown velocity	(cm/sec)
Vch	boundary velocity between dilute phase and non-slugging dense phase flows	(cm/sec)
Vg	superficial gas velocity	(cm/sec)
Vg^*	dimensionless gas velocity (= Vg/U_{sl}^*)	(-)
Vmf	minimum fluidization velocity	(cm/sec)
Vs	solid linear velocity	(cm/sec)
Ws	solid rate per unit time per unit area	(gcm/cm ² ·sec)

Greek Letters

ϵ	bed porosity	(-)
ϵ_c	bed porosity at choking point	(-)
ϵ_{mf}	bed porosity at minimum fluidizing condition	
ϵ_s	bed porosity at slug breakdown condition	
μ	gas viscosity	(gm/cm·sec)
ρ_g, ρ_s	densities of gas and solid	(gm/cm ³)

参 考 文 献

- 1) L.S. Leung, "Vertical Pneumatic Conveying: A Flow Regime Diagram and a Review of Choking versus Non-choking systems", Powder Technology, 25, 185 (1980).
- 2) W.C. Yang, "A Mathematical Definition of Choking Phenomenon and a Mathematical Model for Predicting Choking Velocity and choking Voidage", AIChE J., 21, 1,013 (1975).
- 3) W.K. Lewis, E.R. Gilliland and W.C. Bauer, "Characteristics of Fluidized Particles", Ind. Eng. Chem., 41, 1,104 (1949).