

크기가 다른 두 입자계의 최소유동화속도 결정 및 유동화 특성

차왕석 · 홍성창* · 오광중** · 도동섭

고려대학교 공과대학 화학공학과

*경기대학교 공과대학 환경공학과

**부산대학교 공과대학 환경공학과

(1992년 5월 6일 접수, 1992년 10월 1일 채택)

Minimum Fluidization Velocity and Fluidization Characteristics of Binary Particle System

Wang Seog Cha, Sung Chang Hong*, Kwang Jung Oh** and Dong Sup Doh

Dept. of Chem. Eng., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

**Dept. of Environ. Eng., Kyonggi Univ., Suwon 440-270, Korea*

***Dept. of Environ. Eng., Pusan Nat'l Univ., Pusan 609-735, Korea*

(Received 6 May 1992; accepted 1 October 1992)

요 약

내경이 0.109 m인 기-고유동층에서 큰 입자(0.175 mm)로 이루어진 계에 크기가 작은 입자(0.359 mm, 0.194 mm)의 분율을 변화시킴에 따라 나타나는 층분리 현상을 차압전달기로 측정하여 압력요동의 평균압력과 표준편차를 이용하여 분석하였다. 크기가 작은 입자의 분율에 따른 최소유동화속도 변화를 규명하였고, 또한 층내에서 일어나는 기포의 운동과 입자혼합을 표준편차로서 해석하였다. 실험결과 균일입자로 이루어진 계에서만 적용되었던 압력요동의 표준편차와 유속과의 관계로부터 최소유동화속도를 결정하는 방법은 크기가 다른 두 입자계까지 적용될 수 있음을 알 수 있었으며, 입자크기 차이에 의한 층분리 현상을 압력요동으로 예측할 수 있다.

Abstract—Segregation phenomena occurred from variations of fine particle fractions(0.359 mm, 0.194 mm) in a 0.109 m ID fluidized bed of coarse particle(0.715 mm) were measured by a differential pressure transducer and were analyzed by the standard deviation and mean pressure of pressure fluctuations. The variations of minimum fluidization velocity according to fine particle fractions were investigated and the fluidized bed behaviors such as bubble motion and particle mixing were interpreted by the standard deviation. The method for determination of a minimum fluidization velocity from the linear relationship between standard deviation and air velocity which has been applied only for the uniform sized particle system could also be applied in the binary system. Segregation phenomena occurred by the difference of particle size could also be predicted by the pressure fluctuations.

1. 서 론

유동화장치는 층내의 물질전달과 열전달이 빠르며

비교적 조업이 간단하고 규모가 큰 반응기에도 적용될 수 있기 때문에 화학반응기로 뿐만 아니라 물리적 조업에도 많이 이용되고 있다.

기포의 거동은 유동층에서의 고체입자들의 혼합에 많은 영향을 미치므로 기포의 거동에 의해 발생하는 압력요동을 측정하여 유동층내부의 거동을 예측할 수 있다.

유동층에서 압력요동은 층내의 압력, 층의 형태, 입자의 특성과 유체흐름 조건 등의 복잡한 함수로 나타나는데 주요인으로는 기포의 거동이다[1, 2].

한편 압력요동의 특성을 이용한 기포의 연구들은 단일입자를 대상으로 한 경우가 대부분이었으나[3-5] 석탄연소, 고형폐기물 처리 등에 이용되는 실제유동층은 거의 다 입자계에서 이루어지고 있다[6, 7]. 다입자계에서는 입자크기, 형태 등이 복잡하게 연관되므로 인해 층내의 거동도 매우 복잡하게 된다. 이러한 다입자계의 거동의 해석은 binary system의 해석으로부터 얻어질 수 있다.

일반적으로 binary계에서 최소유동화속도는 두 조성 성분과 조성비에 따라 변하고 또한 입자크기비가 큰 경우 층내에서 층분리가 일어나 조성비가 위치에 따라 변하게 되어 최소유동화속도 뿐만 아니라 층내의 혼합 특성에도 상당한 영향을 미치게 된다.

고체혼합과 층분리가 일어나는 계에서 일정한 유속에서의 고체혼합도는 상당히 중요한 인자이며[8], 또한 혼합계에서 상호작용하는 입자들의 유동화특성을 나타낸다.

본 실험에서는 균일입자계에서만 적용되어오던 압력요동의 특성치인 표준편차를 유속과 연관시켜 최소유동화속도를 구하는 방법을 binary계에도 적용하고자 하였으며, 층내의 입자크기 차이에 의한 유동화특성을 압력요동의 표준편차, 평균압력, 그리고 층내의 혼합특성, 공극률로서 해석하고자 하였다.

2. 이론적 고찰

유동층의 가시적인 무제와 같은 평균압력은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\mu_r = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt \quad (1)$$

유동층내의 압력요동특성을 나타내는 표준편차는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$S.D. = \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [X(t) - \mu_r]^2 dt \right]^{0.5} \quad (2)$$

식 (2)에서 구한 표준편차는 유동층내에서 관측시간, T 동안에 압력요동에 의하여 발생된 전체에너지의 합을 의미한다.

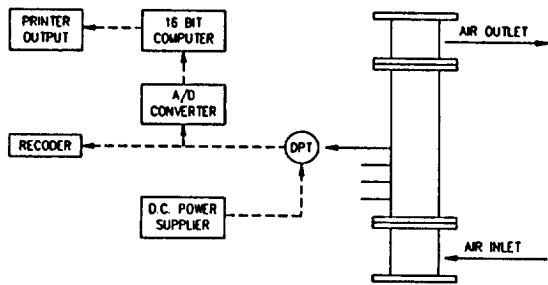


Fig. 1. Schematic diagram of experimental units.

Puncochar 등[5]이 제시한 최소유동화속도 결정방법에서 유속과 표준편차와의 관계는 다음과 같다.

$$S.D. = A + B \cdot U_m \quad (3)$$

위 식에서 group B 입자의 경우 $U_{mb}/U_{mf} = 1$ 이므로 $S.D. = 0$ 일 때의 유속이 최소유동화속도이므로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$U_{mf} = -A/B \quad (4)$$

공극률은 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\epsilon = 1 - \frac{1}{(\rho_s - \rho_g)} \left(\frac{\Delta P}{\Delta H} \right) \quad (5)$$

식 (5)에 적용함에 있어 각 유속에서 ΔH 를 구하기가 어렵고 부정확하다. 그러나 2개의 압력전달기를 이용하여 두 전달기 간의 거리와 각 위치에서의 평균압력의 차를 ΔP 로 하면 쉽게 사용할 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

3-1. 실험장치

본 실험에서 사용한 장치는 Fig. 1과 같으며 크게 유동층부와 측정부로 나누어져 있다. 유동층부는 가스공급장치와 유동층으로 구성되어 있으며, 15 hp의 공기압축기를 이용하여 유동층에 공기를 공급하였다. 유입공기는 유동층기벽과 입자간의 정전기현상을 줄이기 위하여 유동층에 공급되기 전에 증습기를 통과시켜 상대습도가 50%가 되도록 하였다. 유동층은 층내 현상을 관찰할 수 있는 내경 0.109 m, 높이 1.8 m의 아크릴관을 사용하였으며 압력요동을 측정하기 위하여 분산판으로부터 추방향으로 0.025 m 간격으로 측정구를 설치하였다.

기체분산판은 pore크기 100 μ m, 두께 1.5 mm Vyon porous plastic plate를 사용하였으며 개공비는 약 3%이다.

측정부는 압력요동을 측정할 수 있는 차압전달기와 측정된 압력요동신호를 처리할 수 있는 부분으로 구성되어 있고 차압전달기의 최대측정허용범위는 1.25 kPa 이다.

층내로 삽입시키기 위한 probe는 내경 2 mm, 외경 4 mm, 길이 0.2 m의 stainless steel관을 사용하여 차압 전달기의 +극에 연결시켰으며 -극은 대기중에 노출시켰다.

또한 probe끝은 유동화입자가 들어가지 않도록 200 mesh망으로 봉하였다. 차압전달기를 excitation시키기 위한 전원을 공급하기 위해 DC power supplier를 설치하였으며 측정된 압력요동의 analog data는 12 bit A/D converter를 이용하여 digital data로 변환시켰으며 이 data를 처리분석하기 위하여 PC(personal computer)를 연결하였다.

3-2. 실험방법

3-2-1. 압력요동실험

실험은 유동층에 입자크기가 다른 두 시료를 일정비율로 넣은 후 회분식으로 실시하였으며 압력요동의 측정은 모든 실험에서 차압전달기의 probe를 각 위치의 층 중심에 설치하여 실시하였다.

차압전달기에는 power supplier를 이용하여 15 volt의 일정전원을 공급하였으며 보정은 고정층에서 manometer로부터 얻은 압력강화와 동시에 차압전달기에서 얻은 data를 회귀분석하였다. 압력요동의 측정은 sampling time을 sampling theorem의 정의를 이용하여 10 ms로 하였으며 sampling data의 수는 1024개로 하였다.

실험은 일정조건에서 한번에 1024개씩 15번 sampling 하여 PC를 이용하여 압력요동의 통계학적 특성치를 IMSL computer program package(Texas, Huston)를 이용하여 얻었다.

3-2-2. 혼합도 측정 실험

유동화조업시 시간에 따른 높이별 입도분포를 알아보기 위하여 내경 0.109 mm, 두께 0.01 mm인 아크릴판 10개를 축방향으로 연결하여 혼합도측정을 위한 Fig. 2와 같은 장치를 만들었다.

실험은 입자크기가 다른 두 종류의 시료를 V-mixer로 30분간 완전혼합시킨 후 혼합된 상태로 유동층에 일정비율로 넣은 후 각 유속별로 10분간 유동화시킨 다음 순간적으로 유동화를 중단시킨 다음 단으로 구성 column을 분해하여 맨 윗단(0.1 m부분)부터 차례로 시료를 채취하고 이를 체분석하여 높이별 입자분포를 확인하였다. 시료의 양은 0.715 mm입자를 $L/D=1$ 로 하였을 때의 무게인 1500 g이었으며 작은 입자(0.359 mm, 0.194 mm)의 분율은 무게분율로 0.1, 0.2, 0.3으로 변화시

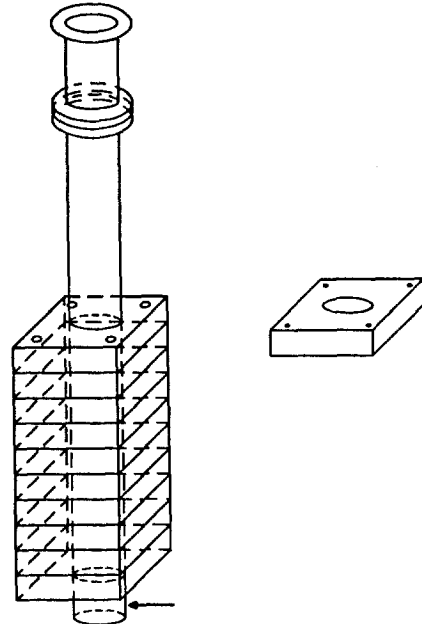


Fig. 2. Apparatus for measuring the fine particle fraction in a binary system.

켰다.

3-3. 시료

본 실험에 사용된 시료는 진밀도가 2624 kg/m^3 인 시멘트 몰탈 압축강도시험용 모래인 주문진 표준사로 Geldart의 분류에 의하여 group B[9]에 속한다.

큰 입자(coarse particle)는 0.715 mm(0.84-0.59 mm), 미세입자(fine particle)는 0.359 mm(0.42-0.297 mm), 0.194 mm(0.21-0.177 mm)를 사용하였는데, 이는 bubbling region에서는 입자크기가 약 2배 이상일 경우 입자혼합이 잘 되지 않으므로 이 현상을 파악하고자 크기비가 2배, 4배인 입자를 선택하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 최소유동화속도의 결정

Fig. 3은 binary계에서 입자크기비가 큰 경우(0.715 mm, 0.194 mm)와 작은 경우(0.715 mm, 0.359 mm)에 대해 압력요동 측정위치에 따른 표준편차의 유속에 대한 영향을 나타내었는데 유속이 증가하여도 표준편차와 유속과의 직선관계가 계속 유지되어 최소유동화속도를 얻을 수 있으나 기울기가 변하는 지점이 존재하여 선형회귀분석에 의한 결정에 유속의 제한성이 있음을 알 수 있었다. 따라서 압력요동의 표준편차와 유속과의

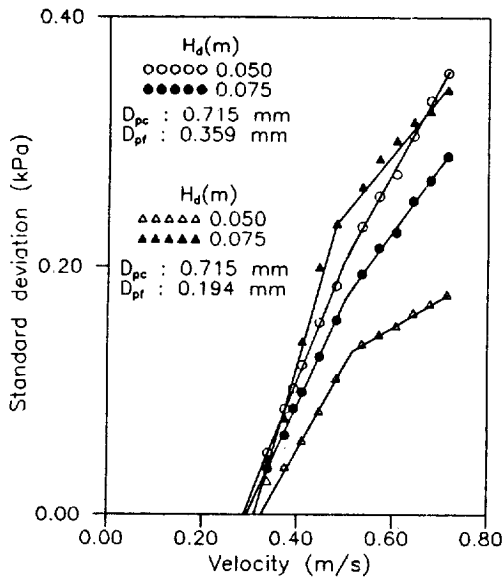


Fig. 3. Standard deviation vs. air velocity with height above distributor (fine fraction: 0.2).

직선관계로부터 최소유동화속도를 결정할 때 기율기가 변하기 이전의 유속만을 대상으로 선형회귀하여야 함을 알 수 있다. 유속과 압력요동의 표준편차와의 직선관계의 기율기가 변하는 전환점에 대한 고찰을 하기 위하여 유속에 따라 두 직선의 식을 회귀분석하여 교점의 전환유속을 구하여 유동층에서 기포계산에 가장 보편적으로 사용되고 있는 Darton 등[10]의 관계식을 이용하여 전환유속에서 기포크기를 추정하였는데 계산결과 D_b/D_i 가 약 0.25에 접근함을 알 수 있었다.

이러한 결과는 가-고 유동층에서 freely bubbling과 slugging영역의 구분이 약 $D_b/D_i=0.2$ 에 따른다는 Chermisinoff[11]와 $D_b/D_i=0.15$ 라는 Drahos 등[12]의 연구결과를 적용한 결과 본 실험에서 얻은 압력요동의 표준편차와 유속과의 관계에서 나타난 기율기가 변하는 전환유속은 유동층의 상태가 freely bubbling을 유지하는 최대유속임을 알 수 있다.

이러한 영역에서 각 측정위치에 따라 표준편차와 유속과의 관계는 직선이 되나 표준편차가 0이 되는 지점은 조금씩 다르게 되어 압력요동 측정위치에 따라 최소유동화속도가 조금씩 차이가 나게 된다. 그래서 압력요동 측정위치는 홍 등[13]이 제시한 바와 같이 층의 중상부가 적당한데 이는 층높이에 따른 고체입자의 혼합도를 나타내는 Fig. 4에서 입자크기비가 큰 경우(0.715 mm, 0.194 mm)는 전반적으로 혼합이 잘 되지 않으나 입자크기비가 작은 경우(0.715 mm, 0.359 mm)는 분산판에 의한 영향을 많이 받는 층하부를 제외하고는 층중상부는

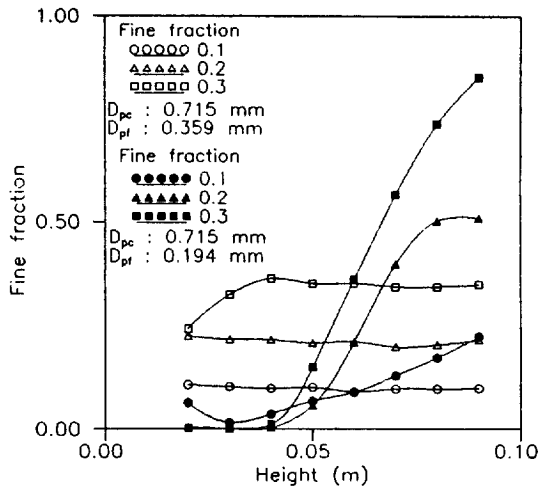


Fig. 4. Fine fraction vs. height above distributor with different size ratio (U_o/U_{mf} : 1.53).

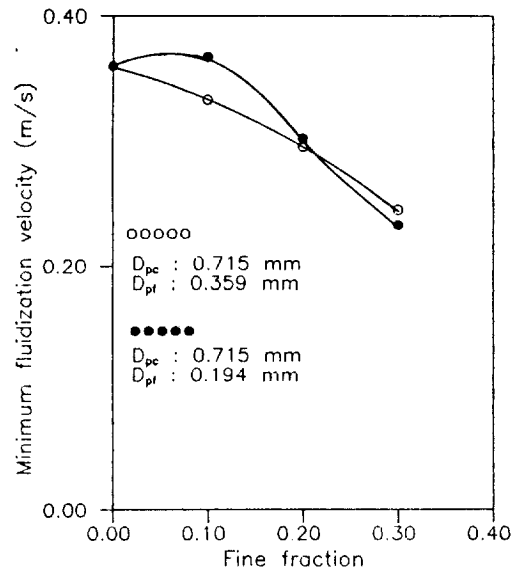


Fig. 5. The effects of fine fraction on minimum fluidization velocity.

유속에 관계없이 기포의 격렬한 함체에 의해 거의 완전한 입자혼합이 일어남을 보여주었다[14]. 그리고 Fig. 4, 6, 9에 나타난 U_{mf} 값은 본 실험의 각 binary계에서 실제 측정된 값이다.

Fig. 5는 작은 입자의 분율에 따른 최소유동화속도의 변화를 나타내었다. 0.715 mm, 0.359 mm 입자로 구성된 binary계에서는 작은 입자의 분율이 증가할수록 최소유동화속도는 감소함을 보여주었는데 이는 작은 입자 분율의 증가는 층내 평균입자크기의 감소와 입자간 치

Table 1. Comparison of U_{mf} results in binary system (particle size A: 0.715 mm, B: 0.359 mm, C: 0.194 mm)

Binary mixture	Fraction of fine particle	Goossens		Kumar		Cheung		Chiba		Thonglimb		This work
		U_{mf} (m/s)	difference (%)	U_{mf} (m/s)	difference (%)	U_{mf} (m/s)	difference (%)	U_{mf} (m/s)	difference (%)	U_{mf} (m/s)	difference (%)	U_{mf} (m/s)
A & B	0.1	0.308	-7.23	0.35	+5.42	0.296	-10.84	0.305	-8.13	0.353	+6.33	0.332
	0.2	0.268	-3.25	0.312	+12.64	0.248	-11.42	0.264	-4.69	0.314	+13.36	0.277
	0.3	0.235	-7.48	0.28	+10.24	0.212	-16.54	0.23	-9.45	0.279	+9.84	0.254
A & C	0.1	0.244	-33.51	0.289	-21.25	0.296	-19.35	0.227	-38.15	0.289	-21.25	0.367
	0.2	0.175	-42.05	0.223	+26.16	0.18	-40.40	0.166	-45.03	0.215	-28.81	0.302
	0.3	0.130	-44.21	0.180	+22.75	0.135	-42.06	0.131	-43.78	0.164	-29.61	0.233

*(measuring height above distributor: 0.075 m)

Table 2. Various correlations for calculating the minimum fluidization velocity of binary mixture

Authors	Correlation	Definitions and comments
Goossens et al. (1971)	$U_{mf} = \frac{\mu}{\rho_G d_M} \{ (33.7^2 + 0.0408 Ga Mv)^{0.5} - 33.7 \}$	$Ga = \frac{d_M^3 \rho_G^2 g}{\mu^2}$; $M_v = \frac{\rho_M - \rho_G}{\rho_G}$ $d_M = \frac{R_o}{R_1} d^F d^P$; $\rho_M = \frac{x^F}{\rho^F} + \frac{(1-x^F)}{\rho^P}$ $R_o = (1-x^F) \rho^F_P + x^F \rho^P_P$ $R_1 = (1-x^F) \rho^F_P d^F + x^F \rho^P_P d^P$
Kumar and Sen Gupta (1971)	$U_{mf} = 0.0054 \frac{d_M^{1.34} (\rho_M - \rho_G)^{0.78} g^{0.78}}{\mu^{0.56} \rho_G^{0.22}}$	$d_M = \frac{1}{x^F/d^F + x^P/d^P}$ $\rho_M = x^F \rho^F_P + x^P \rho^P_P$ Not restricted to binary mixture
Cheung et al. (1974)	$U_{mf} = U^F_{mf} \left(\frac{U^P_{mf}}{U^F_{mf}} \right)^{1/P-2}$	$\frac{d^P}{d^F} < 3$
Chiba et al. (1979)	$U_{mf} = \frac{U^F_{mf}}{\left(1 - \frac{U^F_{mf}}{U^P_{mf}} \right) \cdot x_F + \frac{U^F_{mf}}{U^P_{mf}}}$	Recommended for solid particles completely segregating
Thonglimb (1981)	$Re_{mf} = (19.9^2 + 0.03196 Ga Mv)^{0.5} - 19.9$	

밀도를 증가시킴으로써 최소유동화속도가 감소하는 것으로 사려된다.

그리고 0.715 mm, 0.194 mm 입자로 구성된 계에서는 크기가 작은 입자의 분율이 비교적 적은 경우 작은 입자 분율에 크게 영향을 받지 않고 큰 입자로 이루어진 계에서의 최소유동화속도에 접근하는 경향을 보이고 있는데 이는 층높이에 따른 입자의 혼합정도를 나타낸 Fig. 4를 보아도 알 수 있었다. 이러한 층분리가 심하게 일어나고 층높이별 입자의 혼합도가 상당히 차이가 난 경우 압력요동을 이용해 최소유동화속도를 측정하고자 할 때 각 위치별 작은 입자분율이 다르므로 측정된 최소유동화속도는 엄밀히 말해 각 측정위치에서의 최소유동화속도를 나타낼 수 있으나 유동층 전체를 대표할 수 있는 값하고는 약간의 차이가 있음을 알 수 있었다.

Table 1은 크기가 작은 입자분율에 따라 최소유동화속도를 구하여 기존연구자들[15-19]의 상관관계식으로부터 얻은 결과와 비교하여 나타내었다. 기존의 연구자들은 유동화기체, 유동화물질의 종류 및 크기 등을 변경시키면서 유속에 대한 압력강하로부터 최소유동화속도를 측정하였고, 이 결과를 회귀분석하여 상관관계식을 얻었으며 이 결과식을 Table 2에 나타내었다. Table 1에서 0.715 mm, 0.359 mm 입자로 구성된 계에서 측정된 최소유동화속도는 기존의 연구자의 값과 비교시 오차가 15% 내외일 정도로 상당히 일치함을 보여주었고, 0.715 mm, 0.194 mm 입자로 이루어진 계에서는 층내의 혼합도가 높이별로 상당히 차이가 남에 따라 기존의 연구자의 결과와 약 20-45% 정도 차이가 발생했는데 이 중에서 Kumar 등[15]과 Thonglimb[16]의

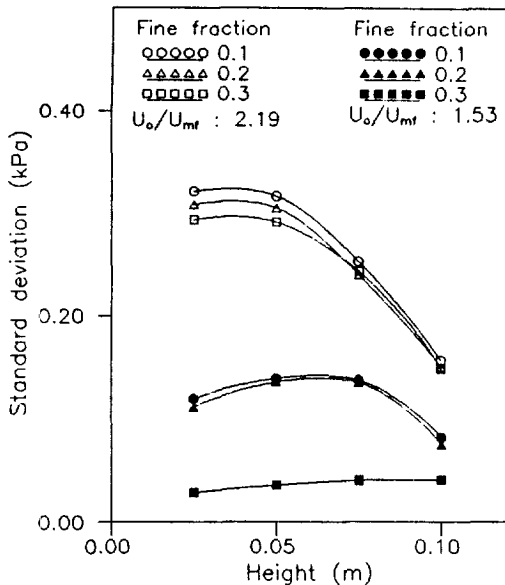


Fig. 6. Standard deviation vs. height above distributor with fine fraction (D_{pc} : 0.715 mm, D_{pf} : 0.359 mm).

결과와는 비교적 비슷한 값을 나타냄을 보여주었다.

4-2. 유동화특성

Fig. 6은 0.715 mm, 0.359 mm의 입자로 구성된 계에서 0.359 mm 입자의 분율을 0.1, 0.2, 0.3으로 변화시켰을 때 층높이에 따른 표준편차의 변화를 나타낸 그림이다. 층높이에 따른 표준편차가 변하는 형태에서 $U_o/U_{mf} = 1.53$ 근처의 값까지는 크기가 작은 입자의 분율이 0.3일 경우 0.1, 0.2 경우보다 표준편차에서 상당히 차이가 발생하나 $U_o/U_{mf} = 2.19$ 근처에서는 작은 입자분율에 관계없이 거의 비슷한 값을 나타내었다. 이는 유속이 증가할수록 층내의 혼합특성이 좋아져서 내부가 균일해지기 때문이다[20]. Fig. 7은 층높이별 공극률을 나타낸 그림인데 0.715 mm, 0.359 mm 입자로 구성된 계에서 0.025 m 간격으로 공극률을 측정한 결과 층상부의 공극률이 0.6 정도의 값으로 가장 높은 값을 보이며 0.025-0.075 m 사이의 공극률은 0.48-0.52 정도의 값을 보여주면서 유속에 따라 증가하는 경향을 보이는데 이것은 유속에 따른 초기 생성기포크기의 영향으로 유속이 증가함에 따라 공극률도 증가하기 때문이다.

앞에서 보여준 층높이별 고체입자의 혼합특성을 나타낸 Fig. 4에서 Chiba 등[18]이 제시한 것처럼 두 입자의 크기비가 1.68 정도이고 큰 입자의 최소유동화속도 이상이면 거의 완전 혼합이 일어난다고 하였는데 본 실험에서도 분산판의 영향을 받는 층하부에서 약간 벗

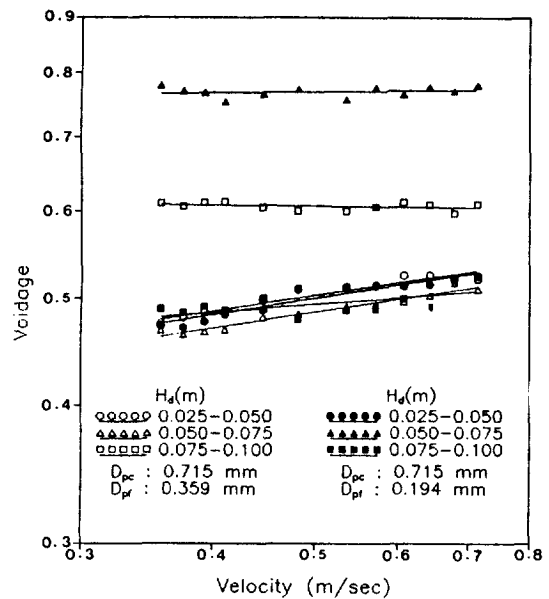


Fig. 7. Voidage vs. air velocity with height above distributor (fine fraction: 0.2).

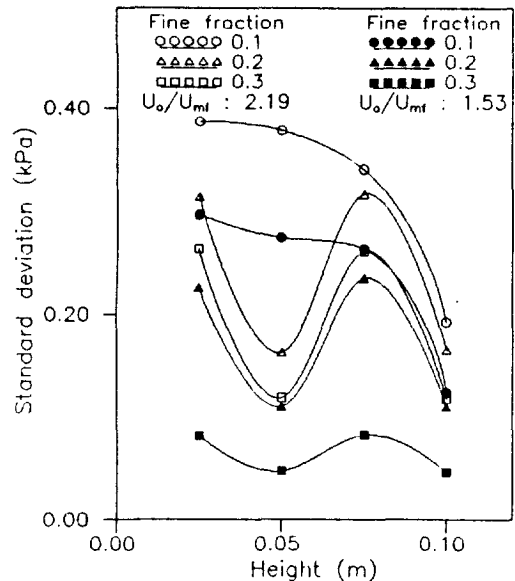


Fig. 8. Standard deviation vs. height above distributor with fine fraction (D_{pc} : 0.715 mm, D_{pf} : 0.194 mm).

어난 것을 제외하고는 전 유속에서 완전혼합이 일어남을 알 수 있었다.

Fig. 8은 0.715 mm, 0.194 mm의 크기를 가지는 입자로 구성된 계에서 0.194 mm 크기를 가지는 입자의 분

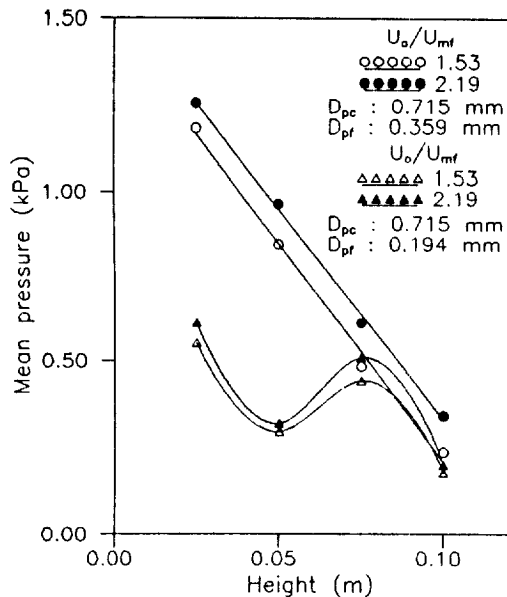


Fig. 9. Mean pressure vs. height above distributor with air velocity (fine fraction: 0.3).

율을 0.1, 0.2, 0.3으로 변화시켰을 때 층높이에 따른 표준편차의 변화를 나타낸 그림이다. 크기가 작은 입자의 분율이 0.1인 경우를 제외하고는 전 유속에 걸쳐 층높이가 0.025, 0.075 m인 지점에서는 표준편차의 값이 거의 같은 최대치를 나타내나 0.05, 0.1 m인 지점에서는 최소치를 나타내었다. 이는 Cheung[19], Donsi[21] 등이 언급한 바와 같이 입자크기비가 큰 경우 두 입자의 완전혼합은 이루어지지 않고 작은 입자들이 큰 입자 사이를 빠져나와 층상부에 마치 packed bed를 형성한 것같은 층분리가 일어나기 때문이라고 사려된다. 그래서 두 층이 분리됨으로 인해 표준편차의 값이 감소, 증가, 감소하는 형태를 보였다. 이러한 현상은 Fig. 9에 나타난 층높이별 평균압력을 나타낸 그림에서 알 수 있었다.

입자혼합이 양호한 0.715 mm, 0.359 mm로 구성된 계에서는 층높이별로 평균압력이 일정하게 감소하나, 0.715 mm, 0.194 mm로 구성된 계에서는 유동화시 상부에서 심한 층분리가 일어나 상부와 하부로 두 개의 층으로 구분되고 두 개의 층으로 구분되는 부분은 상당히 dilute한 것으로 나타났다. 이렇게 두 개의 층으로 구분되는 dilute한 부분때문에 0.05 m 부분에서 압력이 강하하고 상부층을 형성하는 부분인 0.075 m 부분에서 압력이 증가하게 된다. 이러한 dilute한 부분에서는 표준편차에서도 감소하게 된다.

이러한 층분리 현상과 두 개의 층으로 나누어지는 부분은 dilute한 상태임을 층높이별 공극율을 나타낸

Fig. 7 중에서 0.715 mm, 0.194 mm로 구성된 계에서 알 수 있었다. 작은 입자의 분율에 관계없이 전 유속에서 상, 하부층을 형성하고 있는 0-0.05 m, 0.075-0.1 m 지역에서의 공극률은 균일입자나 크기비가 크지 않은 binary계에서의 공극률과 비슷한 0.48-0.52 사이의 값을 가지나 두 층으로 나누어지는 부분인 0.05-0.075 m 사이의 부분에서는 공극률이 0.8 정도의 값을 가질 정도로 dilute한 상태임을 알 수 있었다. 층높이별 입자의 혼합 정도를 나타낸 Fig. 4에서 작은 입자크기가 0.194 mm인 계에서 Nienow 등[22]이 제시한 것처럼 입자크기비가 크면 bubbling region에서는 입자의 균일한 혼합이 잘 이루어지지 않음을 보여주었다. 그림에서 처럼 층하부는 큰 입자가 주를 이루고 층상부는 작은 입자들이 주를 이루고 있음을 알 수 있으며, 또한 작은 입자의 분율이 작을수록 입자가 더욱 혼합되지 않음을 알 수 있었다. 또한 대부분의 유속에서 작은 입자의 분율에 상관없이 층높이 0.05 m까지는 큰 입자가 거의 주를 이루고 그 이상에서는 작은 입자로 구성되고 있음을 확연히 알 수 있다.

5. 결 론

(1) 균일입자로 이루어진 계에서만 적용되었던 압력요동의 표준편차와 유속과의 직선관계로부터 최소유동화속도를 결정하는 방법은 binary계에서도 잘 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

(2) 입자크기 차이가 큰 계(0.715 mm, 0.194 mm)에서 층분리 현상은 압력요동특성치인 평균압력과 표준편차로부터 알 수 있었다.

(3) 입자크기 차이와 작은 입자분율에 따른 층내의 유동화특성을 층내의 혼합특성으로 확인할 수 있었다.

사용기호

- A, B : constant
- D_b : bubble size in a fluidized bed [mm]
- D_{pc} : diameter of coarse particles [mm]
- D_{pf} : diameter of fine particles [mm]
- D_t : bed diameter [m]
- ΔH : distance between two measuring positions [m]
- H_d : measuring height of pressure fluctuations above distributor [m]
- ΔP : pressure drop between two measuring positions [kPa]
- S.D. : standard deviation of pressure fluctuations [kPa]
- t : time [sec]
- T : observation time [sec]

U_{mb} : minimum bubbling velocity [m/s]
 U_{mf} : minimum fluidization velocity [m/s]
 U_o : superficial gas velocity through the distributor [m/s]
 $X(t)$: single recorded pressure fluctuation date [kPa]
 ε : bed voidage
 ρ_g : gas density [kg/m³]
 ρ_s : solid density [kg/m³]
 μ_r : mean value of pressure fluctuations [kPa]

참고문헌

1. Fan, L. T., Ho, T. C., Hiraoka, S. and Walawender, W. P.: *AIChE J.*, **27**, 388(1981).
2. Fan, L. T., Ho, T. C. and Walawender, W. P.: *AIChE J.*, **29**, 33(1983).
3. Lirag, R. C. and Littman, H.: *AIChE Symp. Ser.*, **67**, 11(1971).
4. Verloop, J. and Heertjes, P. M.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 1035(1974).
5. Puncochar, M., Drahos, J., Cermak, J. and Selucky, K.: *Chem. Eng. Commun.*, **35**, 81(1985).
6. Park, D. and Lee, J. K.: *Fuel*, **68**, 1180(1989).
7. Brunner, C. R.: *Environmental Progress*, **8**, 163(1989).
8. Carsky, M., Pata, J., Vesely, V. and Hartman, M.: *Powder Technol.*, **51**, 237(1987).
9. Geldart, D.: *Powder Technol.*, **7**, 285(1973).
10. Darton, R. C., LaNanze, R. D., Davidson, J. F. and Harrison, D.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **55**, 274(1977).
11. Cheremisinoff, N. P.: "Encyclopedia of Fluid Mechanics", 4, Gulf Publ., Huston, 853(1986).
12. Drahos, J., Cermak, J. and Schügerl, K.: *Chem. Eng. Commun.*, **65**, 4(1988).
13. Hong, S. C., Jo, B. R., Doh, D. S. and Choi, C. S.: *Powder Technol.*, **60**, 215(1990).
14. Peeler, J. P. K. and Huang, J. R.: *Chem. Eng. Sci.*, **44**, 1113(1989).
15. Kumar, A. and Sen Gupta, P.: *Indian J. Technol.*, **12**, 225(1974).
16. Thonglimp, V.: Docteur-ingenieur Thesis, Institut National Polytechnique, Toulouse(1981).
17. Goosens, W. R. A., Dumont, G. L. and Spaepen, G. L.: *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, **67**, 38(1971).
18. Chiba, S., Chiba, T., Nienow, A. W. and Kobayashi, H.: *Powder Technol.*, **22**, 255(1979).
19. Cheung, L., Nienow, A. W. and Rowe, P. N.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 1301(1974).
20. Beeckmans, J. M. and Stahl, B.: *Powder Technol.*, **53**, 31(1987).
21. Donsi, G., Ferrari, G. and Formisani, B.: *Powder Technol.*, **55**, 153(1988).
22. Nienow, A. W., Rowe, P. N. and Chiba, T.: *AIChE Symp. Ser.*, **74**, 45(1978).