

단 신

## Gaussian 분포의 입자군의 표준편차에 따른 최소유동화속도

장현태 · 박태성\* · 차왕석\*\*†

한서대학교 화학공학과  
356-706 충남 서산시 해미면 대곡리 360  
\*에너지기술연구원 이산화탄소처리 및 저감기술개발 사업단  
305-343 대전광역시 유성구 장동 71-2  
\*\*군산대학교 토목환경공학부  
573-701 전라북도 군산시 대학로 1170  
(2008년 1월 17일 접수, 2008년 4월 1일 채택)

## The Minimum Fluidization Velocity of Gaussian Distribution Particle System According to Standard Deviation

Hyun Tae Jang, Tae Sung Park\* and Wang Seog Cha\*\*†

Dept. of Chem. Eng., Hanseo University, Seosan, Choongnam 356-706, Korea  
\*Carbon Dioxide Reduction Sequestration R&D Center, Korea Institute of Energy Research,  
102 Gajeong-ro Yuseong-gu Daejeon 305-343, Korea  
\*\*Dept. of Civil and Environ. Eng., Kunsan Nat'l University, Kunsan 573-701, Korea  
(Received 17 January 2008, accepted April 1 2008)

### 요 약

내경 0.109 m의 유동층에서 다입자경 모래에 대한 압력요동의 표준편차와 유속간의 선형회귀분석을 이용한 최소유동화속도 측정법의 적용성을 조사하였다. 다입자경 모래를 평균입자크기가 같은 Gaussian 분포에서 입자분포의 표준편차에 따른 최소유동화속도를 측정하고, 측정치를 타 연구자들의 식과 비교 검토하였다. 압력요동의 표준편차 값 선형회귀분석법과 층내 압력강하로부터 구한 최소유동화속도를 구하였다. 최소유동화속도 결정에서 유속 범위는 혼합도가 낮은 유속범위와 free bubbling 영역 이상을 제외한 범위값 이어야 하며, 이 유속범위에서 측정위치는 혼합이 양호한 층 중앙이 가장 적절하다.

**Abstract** – The present study investigated the applicability of the minimum fluidization velocity measuring method using linear regression analysis between the standard deviation of pressure fluctuation and gas velocity in multi-particle sand on a fluidized bed 0.109 in inner diameter. We measured minimum fluidization velocity according to the standard deviation of particle distribution in Gaussian distribution. The measured value compared with other researchers' equations. The minimum fluidization velocity derived from the linear regression analysis of the standard deviation of pressure fluctuation and pressure drop inside the bed. We also found that the minimum fluidization velocity of a multi-particle system using the standard deviation of pressure fluctuation must be measured at freely bubbling region.

Key words: Minimum Fluidization Velocity, Pressure Fluctuation Properties, Gaussian Distribution, Fluidized Bed

### 1. 서 론

유동층에서 최소유동화속도에 관한 연구는 활발히 진행 중이며, 특히 균일입자계의 최소유동화속도는 많은 연구가 이루어져서 정량화된 수식 및 정확한 측정 방법[1-10]이 제시되고 있다. 그러나 실제로 대부분의 산업용 유동층의 경우 균일입자계가 아닌 밀도와 크기가 다양한 다입자계의 유동층으로 존재한다. 따라서 이러한 다입

자계 혼합물의 최소유동화속도의 규명에 대한 연구가 필요하며, 많은 연구자들에 의하여 다입자계의 최소유동화속도에 관한 연구가 이루어지고 있다. 현재까지 최소유동화속도의 측정방법[2, 6, 8]으로 가장 널리 사용하는 것은 압력강하를 이용하는 법[4]과 압력요동의 표준편차와 유속과의 선형관계를 이용한 최소유동화속도의 측정방법을 제시하였다.

따라서 본 실험에서는 압력요동의 표준편차를 이용한 최소유동화속도 측정방법을 이용하여 동일한 평균입자 크기를 가지나 Gaussain 분포의 표준편차가 0.1에서 0.8의 범위에서 변화할때 각 입자분포에서의 최소유동화속도를 측정하였다.

†To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: wscha@kunsan.ac.kr

‡이 논문은 서강대학교 최청송 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2-1. 실험장치

공기압축기를 이용하여 유동층에 공기를 공급하였으며, 유동층 기벽과 입자간의 정전기 현상을 줄이기 위하여 유입공기의 상대습도가 50%를 유지하도록 하였다. 유동층은 층내 현상을 관찰 할 수 있는 내경 0.109 m, 높이 1.8 m의 아크릴관으로 제작하였고, 기체 분산판은 지름이 1 mm인 구멍이 345개 뚫린 개공비가 3%인 다공판을 사용하였다. 외벽에는 압력전달기(pressure transducer, PT)의 측정위치를 변경할 수 있도록 외경 0.01 m, 길이 0.01 m 아크릴관을 사용하여 분산판으로부터 0.025 m 간격으로 4개의 측정관을 설치하였다.

측정부는 압력요동을 측정할 수 있는 압력전달기(Valcom Co. LTD., model VPRN, 1 psi)와 측정된 압력요동 신호를 통계 처리할 수 있는 부분으로 구성되어 있다. 압력전달기의 측정관을 유동층 내의 중앙에 위치하도록 하였으며, 외경 4 mm, 길이 0.4 m의 stainless steel관을 사용하였다.

### 2-2. 실험방법

실험은 유동층내의 L/D가 1 인 상태에서 수행하였으며, Gaussain 분포의 동일한 평균입경에 대하여 Gaussain 분포의 표준편차를 조절하여 각 입자크기별로 혼합하였다. 입도분포는 식(1)과 같이 계산하였다. 각 입자크기 분포별로 혼합한 층물질을 유동층에 채우고 정해진 유속에서 유동화시킨 후 압력전달기를 이용하여 압력요동신호를 측정하였다. 측정이 끝난 후 유속을 변화시키고 정상상태에 도달한 후 다시 압력전달기를 이용하여 측정하였다. 이와 같은 방법으로 높은 유속에서 낮은 유속으로 점차 유속을 변경시켜가며 실험을 수행하였다. 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

또한 유동층에서 압력요동의 신호의 측정의 시간 간격은 sample theorem을 이용하여 10ms로 하였으며, sampling 갯수는 1024개로 하였다. 본 실험에서 분석에 사용한 압력요동의 통계적 처리는 아래와 같다. 압력요동의 표준편차 variance는 positive square root인 표준편차로 data signal의 intensity를 의미하며 식(2)와 같이 표현된다[7].

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(r-\bar{r})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

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

$$\mu_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt \quad (3)$$

Table 1. Experimental conditions

Operating variables	Operating conditions
Aspect ratio(L/D)	1
Gas Velocity(m/sec)	0.107 - 0.695
Particle Size(mm)	1.016, 0.774, 0.651, 0.548, 0.460, 0.359, 0.274, 0.214
Mean Particle Size(mm)	0.612
Standard Deviation of Gaussain Distribution	0.1 - 0.8

### 2-3. 시료

본 실험에 사용한 시료는 시멘트 몰탈 압축강도 시험용 모래인 주문진 표준사( $\rho_p=2620 \text{ kg/m}^3$ )이 사용되었고, Geldart의 분류로 Group B에 속한다. 밀도는  $2,620 \text{ kg/m}^3$ , 구형도( $\phi$ )는 0.67이다. 사용된 시료의 입도분포는 Fig. 1에 나타내었다.

## 3. 결과 및 고찰

단일입자계에서의 압력요동의 동적성분인 표준편차와 유속과의 직선관계를 이용한 최소유동화속도의 결정을 Puncocchar[10]등이 연구하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$S.D.(\text{standard deviation}) = A + B U \quad (4)$$

위식에서 S.D가 0이 되는 지점에서의 유속이 최소유동화속도로 할 수 있으므로  $U_{mf} = -A/B$ 로 정의하여 freely bubbling region에서의 값을 이용하여 최소유동화속도를 계산하였다.

Fig. 2는 각각의 분포에 대한 최소유동화속도를 측정하여 나타낸 그림이다. 각각의 값은 압력요동의 표준편차와 유속의 선형회귀분석으로 나타내었으며, 혼합이 낮은 유속범위와 freely bubbling 영역 이상에서는 직선을 나타내지 않으므로 이를 제외한 범위에서 외삽하여 구한 값이다. 그림에서 Gaussain 분포의 표준편차 증가됨에 따라 최소유동화속도가 감소됨을 알 수 있다. 이는 Fig. 3에 나타난 under size의 cumulative disiribution에서도 작은 입자의 분포 차이에서 쉽게 알 수 있다. Fig. 2에서 0.1에서부터 0.4까지는 minium fluidization velocity가 상대적으로 큰 폭으로 감소하고 있으나, 0.5에서 0.8 범위에서는 매우 작은 차이만을 나타내고 있다. 이는 작은 입자에 의한 층내의 공극률의 변화에 의하여 나타나는 것으로 사료된다. 이러한 결과는 이전에 제시된 식 1)들의 값과는 현저한 차이를 나타낸다. Leva[1]가 제시한 식을 제외하고는 동일한 값을 나타내며, Leva 식에서도 0.01 m/sec의 차이만을 나타낸다. 본 실험에 나

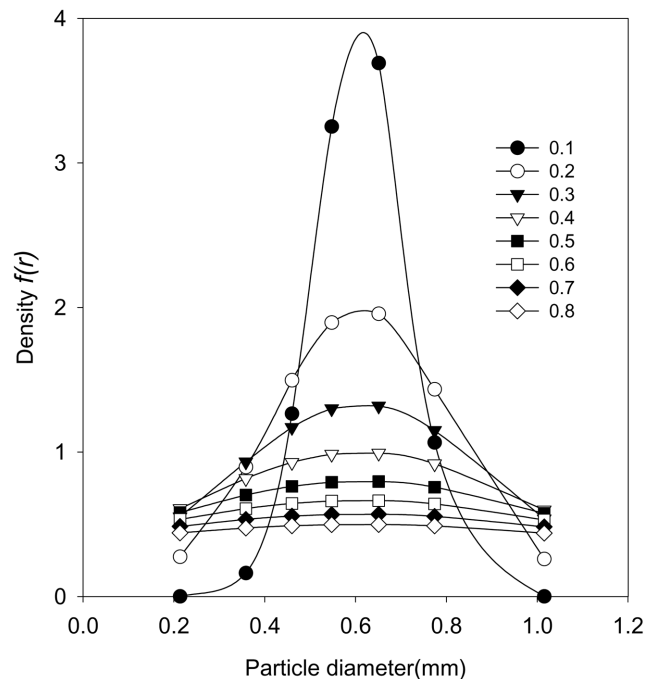


Fig. 1. Particle size distribution for gaussian.

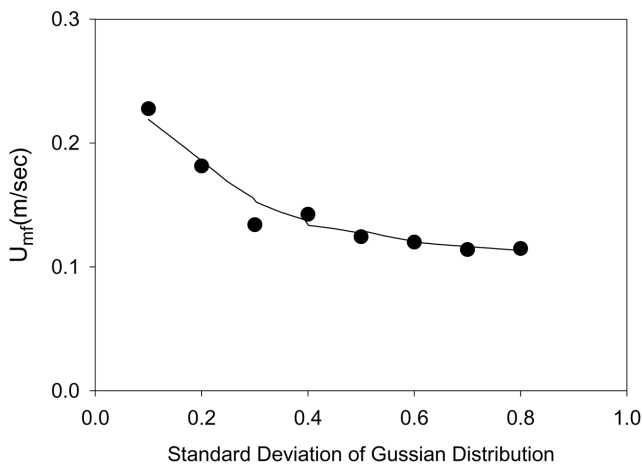


Fig. 2. The variation of minimum fluidization velocity according to standard deviation of gaussian distribution.

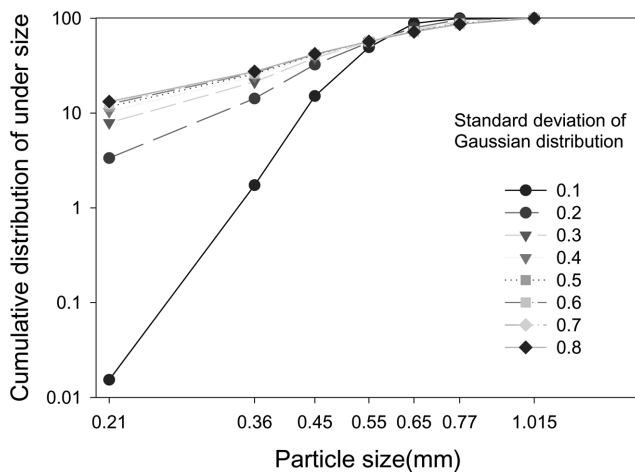


Fig. 3. Particle size distribution according to for standard deviation of gaussian distribution.

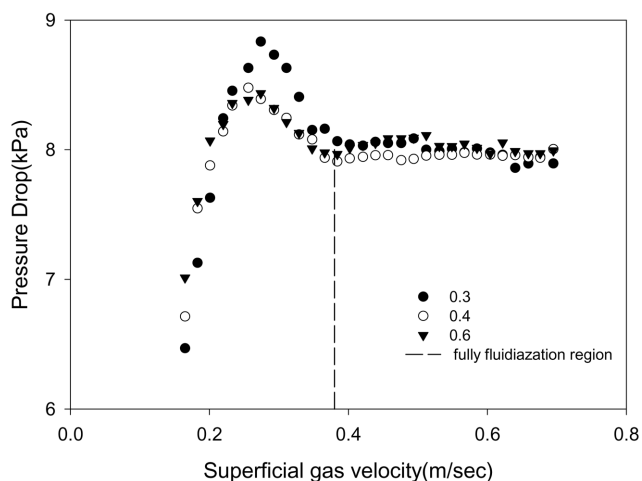


Fig. 4. Pressure drop across the in-bed region according to superficial gas velocity.

타난 최소유동화속도의 차이는 작은입자의 분율에 의하여 입자간의 치밀도의 변화에 의해 기인됨을 Fig. 4의 유속에 따른 압력강하의 그림에서 알 수 있다. 치밀도가 증가됨에 따라 최소유동화속도

부근의 유속에서 Gaussian 분포 표준편차(standard deviation of gaussian distribution)가 작은 경우가 압력강하가 매우 크게 나타나고 있으며, 이는 Rowe의 치밀도[9]에 의한 유동화속도의 변화 결과와 일치한다.

이는 Puncocchar와 Drahos의 결과[10]인 압력요동의 표준편차의 origin을  $U_o - U_{mf}$ 로 표현한 것과도 잘 일치한다. 또한 Fig. 4의 최소유동화속도 부근에서 Gaussian 분포 표준편차 증가함에 따라 미세 입자의 비율이 증가되어 치밀도(effiveness density)가 증가하므로 압력강하가 증가함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

평균입자크기는 같으나 Gaussian 분포 표준편차(standard deviation of gaussian distribution)가 다른 입자군에 대하여 압력요동의 표준편차를 이용한 최소유동화속도의 측정 결과 Gaussian 분포 표준편차에 따라 차이를 나타낸다는 것을 알 수 있었다.

압력요동의 표준편차를 이용한 이성분계의 최소유동화속도 측정 시 혼합이 이루어지지 않는 낮은 유속범위와 freely bubbling영역 이상의 유속에서의 압력요동의 표준편차값은 외삽에서 제외 되어야 함을 알 수 있었다.

#### 감 사

이 논문은 서강대학교 최청송 교수님의 세심한 지도로 완성되었으며, 이에 저자들은 무한한 감사를 표합니다.

#### 사용기호

- A : constant
- B : constant
- U : superficial gas velocity [m/s]
- $\mu_x$  : mean pressure [kPa]
- T : observation time [sec]
- S.D. : standard deviation [kPa]
- t : time sec
- X(t) : simple time history at time t

#### 참고문헌

- Davidson, J. F., Clift, R. and Harrison, D., "Fluidization," 2nd ed. Academic Press, London(1985).
- Hong, S. C., Jo, B. R., Doh, D. S. and Choi, C. S., "Determination of Minimum Fluidization Velocity by the Statistical Analysis of Pressure Fluctuations in a Gas-solid Fluidized Bed," *Powder Technol.*, **60**, 215-221(1990).
- Verloop, J. and Heertjes, P. M., "Periodic Pressure Fluctuations in Fluidized Beds," *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 1035-1042(1974).
- Chiba, S., Chiba, T., Ninow, A. W. and Kobayashi H., "The Minimum Fluidisation Velocity, Bed Expansion and Pressure-drop Profile of Binary Particle Mixtures," *Powder Technol.*, **22**, 255-269 (1979).
- Cheung, L., Ninow, A. W. and Rowe, P. N., "Minimum Fluidisation Velocity of a Binary Mixture of Different Sized Particles,"

- Chem. Eng. Sci.*, **29**, 1301-1303(1974).
6. Cha, W. S., Hong, S. C., Oh, K. J. and Doh, D. S., "Minimum Fluidization Velocity and Fluidization Characteristics of Binary Particle System," *HWAHAK KONGHAK*, **30**(3), 641-648(1992).
7. Bendart, J. S. and Piersol, "Random Data," John Wiley, New York(1971).
8. Abdulrahim Ahmad Alzahrani and Noor Wali, M. M., "A Study of Pressure Drop Fluctuations in a Gas-solids Fluidized Bed," *Powder Technol.*, **76**, 185-189(1993).
9. Rowe P. N. and Yacono C. X. R., "The Bubbling Behaviour of Fine Powders When Fluidised," *Chem. Eng. Sci.*, **31**(12), 1179-1192(1976).
10. Punčochář, M. and Drahoš, J., "Origin of pressure fluctuations in fluidized beds," *Chem. Eng. Sci.*, **60**(5), 1193-1197(2005).