

## 균일입자계 유동층연소로의 최소유동화 속도에 관한 연구

조병렬 · 김광렬\*

한국 원자력 연구소, \*충북대학교 공과대학 환경공학과

### The minimum fluidized velocity in fluidizing combustion bed of uniform particle size distribution system.

Byung-Real Jo, Kwang-Yul Kim\*

*Korea Atomic Energy Research Institute, Taejeon, Korea*

*\* Department of Enviromental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 360-763, Korea*

#### Abstract

The pressure fluctuations in a gas-solid fluidized bed has been analysed using statistical method interpreting fluidized bed behavior. The performing statistical analysis of the pressure fluctuations in a fluidized bed of 6.7cm-ID, using uniform particle size of 115 to 1015 $\mu$ m in diameter. The fluidized gas used air(velocity 0.1~1.2m/sec) at settled bed height to diameter ratios which is L/D=1.0. Then, the pressure fluctuations measured by DPT(differantial pressure transducer). The measuring characteristic values of pressure fluctuation were the mean value and standard value, and also, it has been found that the standard deviation of the pressure fluctuations can be effectively used to predict minimum fluidizing velocity and to explain the fluidized phenomena.

#### I. 서 론

유동화 현상은 반응기에 고체입자를 넣고 유체를 서서히 증가시키면 고체입자가 서서히 움직이며 유체와 같은 거동을 하는데 이와 같은 현상을 말하며 일반적으로 유입되는 유체가 기체이면 기-고 유동층, 액체이면 액상유동층이라고 하며, 이 액상 유동층에

기체를 유입시키는 것을 삼상유동층이라 한다. 이러한 유동층은 층내의 물질전달과 열전달이 빠르며 비교적 조업이 간단하고 규모가 큰 반응기에도 적용할 수 있기 때문에 화학 반응기로 뿐만 아니라 물리적 조업에도 많이 이용되고 있다<sup>1-9)</sup>.

한편 산업 발달로 인한 에너지 소비의 증가는 석유 자원 및 화석 연료의 고갈에 대비한 대체 에너지

자원의 개발을 필요로 하게 한다. 이에 대한 연구로 부존자원의 이용 측면에서 저품질 무연탄의 연소 및 석탄의 액화공정이 있으며, 석유의 대체 에너지 측면에서 합성가스, 메탄올, 포름알데하이드 등과 같이 탄소가 하나인 물질로부터 탄소와 탄소가 결합 하는 물질 즉 탄화 수소를 합성하는 C<sub>1</sub> 화학에 대한 연구가 크게 주목을 받고 있다<sup>10-12)</sup>. 저품질 무연탄 연소 및 촉매를 이용한 가솔린 합성에서는 효과적인 물질 전달 및 열전달과 조업의 유연성 때문에 유동층 기술이 이용되고 있다. 특히 미국의 Mobil 사에서는 Si/Al비가 높고 열적으로 안정성이 뛰어난 ZSM-5 촉매를 개발하여 메탄올로부터 가솔린을 합성할 수 있는 공정을 개발하여, 새로운 석유 화학 자원의 개발이라는 관점에서 각광을 받았다<sup>13-14)</sup>. 그러나 이와 같은 공정은 고온 상태에서 진행되기 때문에 유동층 내부의 유동상태를 해석하는 것이 매우 어려운 문제이며, 실제 무연탄 연소공정에서의 무연탄의 크기 및 분포를 갖는 계와 메탄올 전환 반응에서 사용하는 촉매의 크기와 분포를 갖는 계에 대한 유동층 연구 결과는 거의 보고된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 내부를 볼 수 없는 계에 적용 가능한 방법으로 균일입계를 선정하여 평균입자 크기를 변화시켜 측정된 유동층의 압력 변동 신호의 통계치를 이용하여 최소 유동화 속도를 측정하였으며, 실험으로 측정하여 얻은 결과와 비교 분석하여 최소 유동화 속도를 예측할 수 있는 방법을 제시 하였다.

## II. 실험 장치 및 방법

### 1. 실험 장치

본 연구에 사용한 실험 장치는 Fig. 1과 같으며 크게 나누어 유동화계와 측정 장치계로 구성되어 있다. 유동화계는 공기를 압축하는 공기압축기 (compressor), 공기의 압력을 일정하게 조절하여 주는 정압계 (regulator), 유동화 공기의 흐름 유속을 측정할 수 있는 유량계, 유동화 가스에 습기를 제공하는 증습기, 유동상태를 양호하게 유지시켜 주는 기체 분산판, 유동층 본체 및 집진기 등으로 이루어져 있다. 공기 압축기는 3마력짜리를 사용하였으며, 정압기는 범위가 0~10kg/cm<sup>2</sup>이다. 유량계는 hot wire anemometer와 flow meter kit를 이용하여 조정

한 (calibration) 오리피스 메타를 사용하였고, 유량은 불 형태의 체크 밸브를 이용하여 조절하였다. 증습기는 내경이 10cm이고 높이가 90cm인 아크릴관에 1.5cm×1cm 원통형 스텐레스 스틸망을 충진시키고 물을 넣어 유동화기체가 통과시 기포를 발생하며 증습될 수 있도록 하였으며, 유동층 본체는 층내부 현상을 관찰할 수 있도록 내경 7cm, 높이 140cm인 아크릴 관으로 제작하였다. 차압전달기(differential pressure transducer)의 위치를 변경할 수 있도록 외경 1cm, 길이 3cm인 아크릴 관을 유동층 분산판위로 1.5cm 간격으로 10군데 설치하였다. 사용한 기체 분산판은 유동층내의 고체 입자들의 유동현상이 양호한 sintered glass filter를 사용하였으며 집진기는 유출되는 입자가 거의 다 회수될 수 있도록 아크릴 관으로 제작하여 사용하였다. 측정계는 차압전달기, DC power 공급기, A/D 변환기, 개인용 컴퓨터, 프린터 등으로 구성되어 있다. 차압 전달기는 Validyne engineering corp. model P305D를 사용하였으며, 부착시킨 tap은 내경이 4mm이고 외경이 6mm인 동관을 이용하였고 tap 끝 부분은 고체 입자가 들어 가지 못하도록 200mesh 스텐레스 스틸망을 순간 접착제로 부착시켰다. DC power 공급기는 sorensen DGR 20-25B를 사용하였으며 15볼트를 공급하여 여기시켰다. 차압전달기에서 나오는 신호를 A/D 변환기를 사용하여 개인용 컴퓨터에서 읽어 들여 데이터를 처리하였다.

### 2. 실험 방법

본 연구에 사용한 시료는 진밀도가 2.67g/cm<sup>3</sup>인

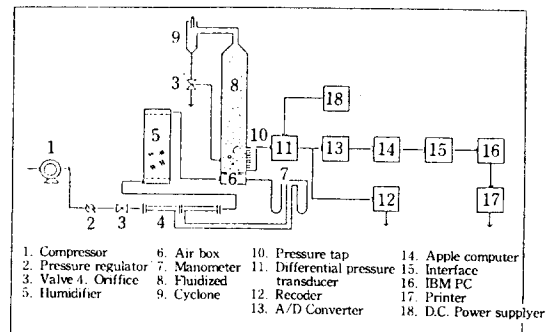


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus

시멘트 몰탈 압축 강도 시험용인 주문진 표준사이다. 분포계로는 U.S. standard 16mesh부터 140mesh까지의 체위에 표준사를 놓고 진동기를 이용하여 25분간 체를 진동시킨후 분류한 균일 입자들을 사용하였다.

실험 방법은 유동층에 실험하고자 하는 고체입자를 넣은 다음 공기 압축기로부터 나오는 압축공기를 정압기로 일정하게 유지시키면서, 실험을 하고자 하는 유속으로 유량계를 사용하여 유량을 조절한 다음 증습기를 통하여 상대 습도가 50%로 증습된 공기를 유동층으로 공급하여 유동층내의 고체입자를 유동화시킨다. 고체입자가 분포를 갖고 유출이 있는 경우는 집진기를 사용하여 나오는 입자를 유동층으로 순환시키면서 실험을 수행하였다. 실험 조건 각각의 경우 유동층내의 압력 변화를 측정하기 위해 차압 전달기를 실험하고자 하는 위치에 고정시키고 DC power 공급기를 이용하여 차압전달기를 여기시켰다. 차압전달기에서 나오는 데이터를 개인용 컴퓨터를 사용하여 읽어 들였으며 IMSL 통계처리 프로그램을 이용하여 압력신호를 해석하였다. 본 연구에서 수행한 실험 조건중 충높이는 L/D=1.0, 유동화 유속비는 U/Umf=1.01~3.23이고, 입자크기 범위는 115~1015 $\mu$ m인 균일 입자계이다.

### III. 결과 및 고찰

유동층내의 압력 변동은 유동현상에 의해 영향을 받으며, 특히 기포의 거동 특성에 의하여 결정된다고 생각할 수 있다. Fig. 2는 유동층내의 압력변화를 DPT를 이용하여 전압으로 변환시켜 recorder를 사용하여 그린 그림이다. Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 압력 변동의 power spectrum은 압력 요동의 크기와 진동수에 따른 에너지 분포를 나타내는 것으로, power spectrum이 어떤 진동수에서 고유값을 갖는다는 것은 유동층내의 압력 요동에 주기적인 요소가 존재한다는 것을 보여준다. 즉 측정범위에서 기포의 생성과 거동이 규칙적으로 일어난다는 것을 시사해 주고 있다. 따라서 압력 요동의 power spectrum의 분석 결과는 유동층내의 기포거동에 중요한 자료를 제공할 수 있다.

즉 유동층내에서 일어나는 압력 요동에 대한 자료는 확률과 통계적 방법에 의해 해석할 수 있는

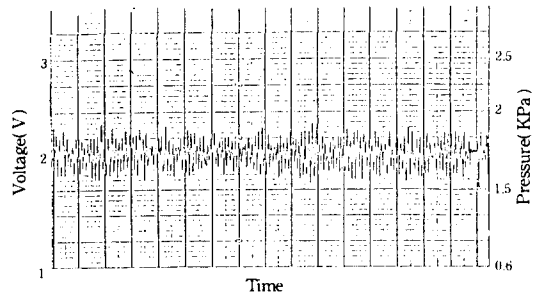


Fig. 2. Typical pressure fluctuation signal from the fluidized bed

random data이며, 유동현상이 random process의 결과로 나타나므로 유동화 현상이 정상상태에 도달하면 ergodic random process로 해석할 수 있고, 이계의 평균 값은 다음 식과 같이 계산할 수 있다<sup>9)</sup>.

$$Pm = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \dots\dots\dots(1)$$

여기서 Pm : 유동층 평균 압력

T : 관측 시간

P(t) : 시간 t에서 측정 압력

(1)식에서 구한 유동층의 평균 압력을 이용하여 유동층내의 압력 요동의 표준 편차를 구하면 다음 식과 같다.

$$Psd = [ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (P(t) - Pm)^2 dt ]^{1/2} \dots\dots(2)$$

본 연구에서는 유동층으로부터 얻은 압력 요동 데이터를 위에서 제시한 방법에 의해 압력 변동의 표준편차를 구하여 유동현상을 해석하였다.

#### 1. 압력측정 tap의 반경 방향 영향

Fig. 3은 균일 입자계의 유동층내의 압력 요동의 표준 편차에 대한 압력 tap의 반경방향 위치 변경에 대한 영향을 보여 주고 있다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 압력 tap의 위치가 낮은 곳에서는 유동층내의 압력 변동이 압력 tap의 반경 방향 위치에는 거의 영향을 받지 않으며, 압력 tap의 위치가 높은 곳에서는 유동층 내의 압력 변동이 유동층 기벽보다 층 내부에서 더 영향을 받는 것으로 나타났다. Mori 등에 따르면 유동층내의 반경방향 기포 분포는 유동층 기벽과

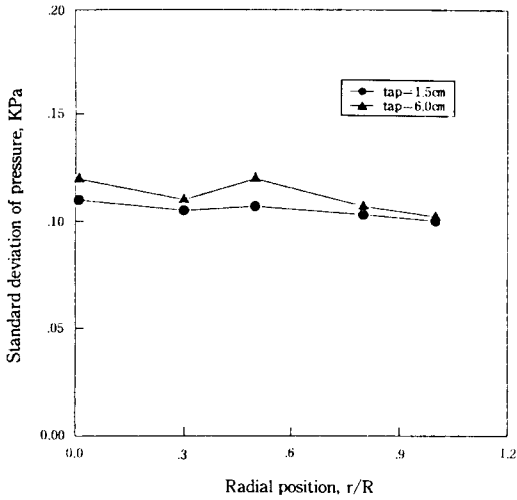


Fig. 3. Standard deviation of pressure fluctuation at specific radial positions in the fluidized bed

중간사이에서 최고값을 갖고 유동층 중심을 대칭으로 하여 같은 분포를 갖는다고 보고하였다<sup>15)</sup>. 이는 유동내의 반경 방향에 따라 기포거동으로 인한 압력 변화가 있음을 예시하고 있으나 본 연구결과는 이와 일치하지 않았다. 이와 같은 이유는 본 연구에서 사용한 유동층이 이들이 사용한 유동층보다 직경이 작고, 측정 압력이 유동층내의 총 압력변화를 나타내기 때문으로 생각된다.

2. 압력측정 tap의 축방향 영향

Fig. 4는 압력 tap의 축방향 위치에 대한 균일 입자계의 유동층내의 압력 변동을 보여 주고 있다. 유동층내의 압력 변동은 압력 tap의 위치가 기체분산판 위에서 높아질수록 증가하다가 압력 tap의 위치가 어느 정도 이상에서는 그 변화 정도가 적은 것으로 나타났다. 이는 유동층의 어느 높이(약 4.5cm) 이상에서는 기포의 합체와 분출로 인해 생긴 유동층내의 압력 변동이 거의 같음을 시사하고 있다. 유동층내에서 기포 거동에 의한 압력 변동으로 나타나는 특성치는 유동층에서 기포의 생성과 소멸에 의해 영향을 받으며, 이때 기포(bubble)의 생성은 기체 분산판위에서 유동화 기체와 고체의 밀도차 등에 의해 고체의 진동으로 공극(cavity)이 생기고, 이것이 성장

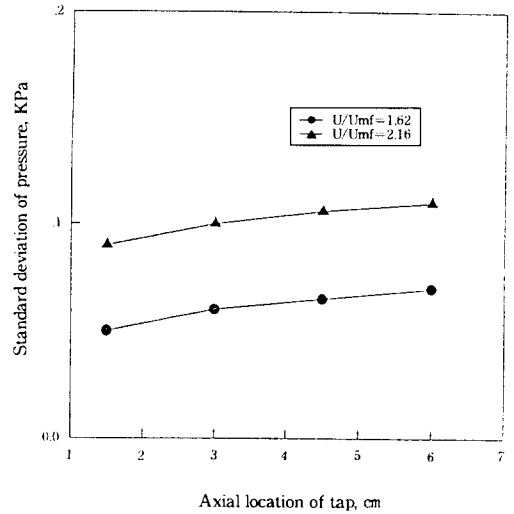


Fig. 4. Standard deviation of pressure fluctuation at specific vertical positions in fluidized bed

하여 발생한다. 유동화 기체 분산판 근처에서의 압력 요동 특성은 초기 기포의 생성에 의해 영향을 받을 것으로 생각되며, 유동화 고체 입자의 밀도가 일정한 한종류의 시료라면 고체 입자 크기 및 분포 등에 영향을 받는다. 또한 생성된 기포는 합체와 붕괴를 거듭하며 유동층 상부로 움직이는데 이 때 기포의 거동에 의해 발생한 에너지는 확산 전달에 의해 유동층 압력 요동 크기에 영향을 준다. 발산 에너지는 유동층의 농후상(emulsion phase)을 통해 전달되는 속도가 크므로 유동화 상태가 양호하면 압력 변동 또한 적은 것으로 사료된다.

3. 압력 변동의 표준 편차와 최소유동화 속도

Fig. 5는 균일입자계의 유동층을 이용하여 유동화 속도를 증가시키며 직접 측정된 최소 유동화 속도를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 균일계 입자인 경우에는 비교적 정확하게 실험적인 방법에 의해 유동층의 최소 유동속도를 측정할 수 있다. 한편 Fig. 6은 균일 입자계의 유동층내의 압력 요동의 표준 편차와 유동화 유속과의 관계를 보여 주고 있다. 이와 같은 결과를 이용하면 유동층내의 최소 유동화 속도를 압력 요동의 표준 편차와 유동화 속도의 관계로부터 기율기  $K_2$ 와 절편  $K_1$ 을 구하여 계산할 수

있다. 즉 최소 유동화 상태에서는 압력 요동의 표준 편차가 영이므로,  $U_{mf} = -K_1/K_2$ 의 관계가 있다. 앞의 실험적인 방법에서 구한 최소 유동화 속도값과 압력 변동의 표준편차로부터 구한 최소 유동화값을 비교하면 Fig. 7과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 유속변화에 의해 압력 강하로부터 측정된 최소 유동화 속도값

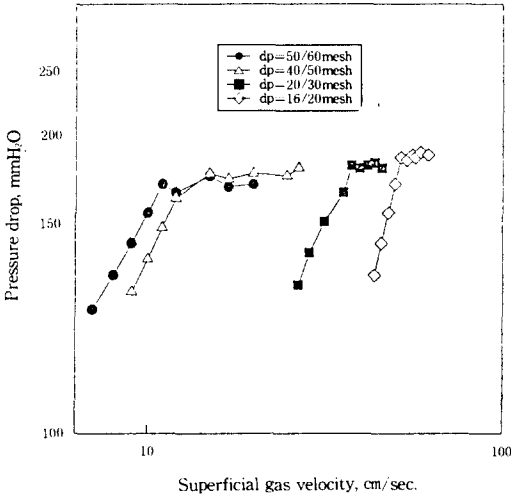


Fig. 5. Minimum fluidized velocity by pressure drop of superficial gas velocity

과 압력변동의 표준편차로부터 측정된 최소 유동화 속도값이 매우 잘 맞음을 알 수 있다. 현재까지 대부분의 최소 유동화 속도를 구하는 방법은 고정층으로부터 유속을 증가시킨 후 서서히 감소시키며 유속 압력 강하의 관계의 그림으로부터 구하였으며, 이는 균일계에는 비교적 잘 맞는다. 그러나 압력 변동의 표준편차로부터 최소 유동화 속도를 구하는 방법은 유동화 상태에서 직접 최소 유동화 속도를 구할 수 있기 때문에, 유동층 연소로나 유동층 촉매 반응기 조업 도중 유동층내의 고체입자 크기변화 및 유동화 현상을 예견하는데 유용할 것으로 생각된다. 한편 유동화속도와 최소 유동화 속도의 비,  $U/U_{mf}$ 가 일정한 경우 유동층내의 압력 요동의 표준편차는 유동화 고체 입자의 크기가 증가할수록 큼을 알 수 있다. 이는 Sadasivan 등<sup>4)</sup>이 보고한 바와 같이 유동화 고체 입자의 크기가 증가할수록 기포의 평균 직경이 증가한다는 것으로 설명할 수 있으며, 유동화 고체입자 크기가 감소하면 이와 반대의 경향이 나타남을 예측할 수 있다. 즉 큰 고체인 경우 유동화를 위해서는 많은 유동화 가스를 필요로 하며 유동화 가스의 증가로 기포의 직경이 커지며, 유동층내에서 이 기포의 거동으로 인한 에너지가 압력 변동의 표준편차증대에 기여하기 때문으로 해석할 수 있다. 이와 같은 현상은 유동층에서 일어나는 물리적 현상 즉, 최소 유

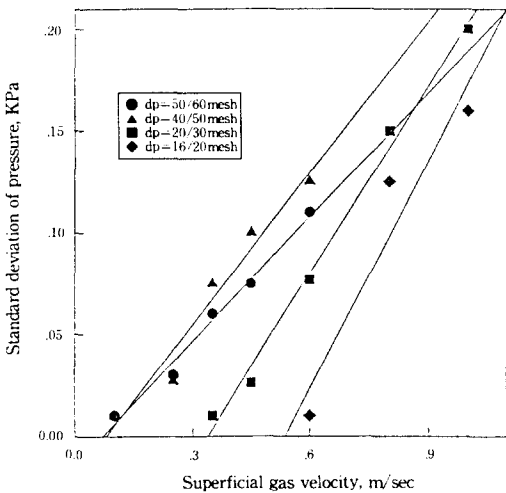
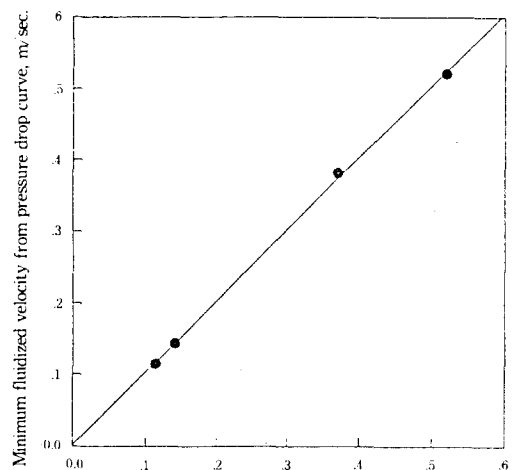


Fig. 6. Relationship between standard deviation of pressure fluctuation and superficial gas velocity



Minimum fluidized velocity from standard deviation of pressure, m/sec

Fig. 7. Relationship between minimum fluidized velocity from standard deviation of pressure and from pressure drop curve

동화 상태에서 기포가 생성되며, 이 기포의 거동이 유동층 압력 요동 특성에 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다.

#### IV. 결 론

내부를 볼 수 없는 계에도 적용 가능한 방법인 유동층의 압력변동 신호의 통계처리를 이용하여, 균일 입자계에서 얻은 결과를 통해 유동층 연소로의 유동화 현상을 해석하여 본 연구 범위에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 압력변동의 표준편차는 압력 측정 tap의 반경방향에는 거의 영향을 받지 않는다.
2. 압력변동의 표준편차는 유동층 일정 높이(4.5cm) 이상에서는 기포의 파괴와 합체현상이 동시에 나타나 거의 일정한 값을 갖는다.
3. 압력 변동의 표준 편차와 유속과의 관계에서 최소 유동화 속도를 구하는 데에 적용 가능하며, 압력 강하로부터 측정된 값과 거의 같다.

#### 참 고 문 헌

1. Liederman, D., et al. : In. Eng. Chem. Pro. Des. Dev., 17,340, 1978.

2. Straja : Chem. Eng. Sci. 44,49, 1989.
3. Jo, B. R. : "기체-고체 유고층의 압력 요동 특성" 고려대학교 PhD. Thesis, 1986.
4. Sadasivan, N., et al. : Pwod. Tech., 26,67, 1980.
5. Lirag, R.C. and Littman, H. : AIChE Symp. Ser., 67, 11, 1971.
6. Chiba, T. : et al. : J. Chem. Eng. Japan, 6, 78, 1973
7. Harrison, D., et al. : "Fluidized Particles", Cambridge University Press, New York, 1973.
8. Puncochar, M., et al. : Chem. Eng. Comum., 35, 81, 1985.
9. Oh, K. J. : 저품위 한국산 무연탄의 특성과 Screen 충전물이 유동층 연소로의 동특성에 미치는 영향, 고려대학교 PhD Thesis, 1985.
10. Ekinci, E., et al. : Powd. Tech. 61,185 1990.
11. Manohar, S. : Hydrocarbon Processing, June, 138, 1981.
12. Chang, C.D. : Cat. Rev. Sci. Eng. 25,1, 1983.
13. Argauer, R.J., et al. : U.S. Pat 3,702,886, 1972.
14. Anderson, J.R., et al. : J. Of. Catal. 61,477, 1980.
15. Mori, S. AIChE Symp. Ser. 80(241), 1984.