

기-고 유동층에서 입자크기가 축방향 압력요동에 미치는 영향

홍성창 · 오광중* · 최청송** · 도동섭

고려대학교 공과대학 화학공학과

*부산대학교 공과대학 환경공학과

**서강대학교 이공대학 화학공학과

(1989년 7월 20일 접수, 1991년 2월 11일 채택)

Effects of Particle Size on Pressure Fluctuations along the Axial Direction in a Gas Fluidized Bed

Sung Chang Hong, Kwang Joong Oh*, Cheong Song Choi** and Dong-Sup Doh

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

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

***Dept. of Chem. Eng., Sogang Univ., Seoul 121-742, Korea*

(Received 20 July 1989; accepted 11 February 1991)

요 약

내경이 0.109 m인 기-고 유동층에서 입자크기가 각각 0.715, 0.359 및 0.194 mm인 세종류의 균일 크기의 모래입자를 사용하여 축방향에 따른 압력요동을 차압전달기로 측정하여 통계학적 특성치의 하나인 표준편차와 power spectrum의 분포를 이용하여 분석하였다. 입자크기가 압력요동에 미치는 영향을 유속과 초기층높이에 따라 규명하고 이를 이용하여 기포의 운동과 입자 혼합 등의 유동층 내부의 거동을 예측하였다. 실험결과 입자의 크기가 압력요동에 큰 영향을 미쳤으며 일정 유속에서 압력요동의 크기가 최대값을 갖는 위치에서 spectrum의 분포가 가장 넓고 복잡하게 나타났으며 이것으로부터 이 지점에서 기포가 가장 격렬한 운동을 하며 입자의 혼합이 가장 좋음을 알았다.

0

Abstract—The pressure fluctuations along the axial distance above the distributor were measured by a differential pressure transducer in a 0.109 m ID fluidized bed of sand particles(0.715, 0.359 and 0.194 mm). The pressure fluctuations were analyzed by the standard deviation and the distribution of power spectrum. The effect of particle size on the pressure fluctuations was investigated with different gas velocities and static bed heights to interpret the fluidized bed behavior such as bubble motion and particle mixing. The amplitude of pressure fluctuation was greatly affected by the particle size and exhibited a maximum value at which the distribution of power spectrum has the most wide and complicate peaks, thus, the most vigorous bubble motion and particle mixing took place at that position in a fluidized bed.

1. 서 론

유동층 반응기에서 내부의 현상을 예측, 진단하는

방법에 대하여는 많은 연구가 되었다[1-4]. 대표적인 방법으로는 X-ray, 광 sensor, resistivity probe, capacitance probe 등이 있으나 사용에 있어 반응기의

재질, 온도, 유동화 물질의 물성 등의 여러 제한요소가 있다. 이에 비해 압력전달기를 이용하여 유동층내의 압력요동을 통계학적으로 분석하여 얻은 정보로부터 유동층 내부의 거동을 예측하는 방법은 제한성이 매우 적으므로 널리 사용되고 있다. 유동층내의 압력요동은 유동층의 형태, 압력강하, 입자특성, 기체흐름 형태 등의 영향을 받는다[5]. 그러나 압력요동의 주요인은 기포의 거동으로 알려져 있다[6, 7]. 유동층에서 기포는 분산 판근차에서 기체-고체의 밀도차에 의한 고체의 진동으로 공극이 생기며 이것이 성장하여 발생한다. 그러므로 유동층 하부의 압력요동은 초기 기포의 발생에 의해 지배되므로 입자의 밀도가 일정하다면 입자의 특성 즉, 구형도의 분포, 입자의 크기에 따른 공극율과 입자의 치밀도(compactibility)에 의하여 매우 큰 영향을 받을 것이다. 그러나 기포가 생성된 후 상승하여 합체와 붕괴를 하는 영역에서는 합체와 붕괴시 발산하는 에너지와 pressure wave의 확산 정도가 압력요동의 크기를 결정지어 준다. 이 pressure wave는 emulsion phase를 통해 전달되므로 emulsion phase의 공극율이 증가하거나 입자의 밀도가 감소하면 약화된다[8]. 그러므로 유동층내의 압력요동의 크기에 two phase theory의 특성을 적용하고 압력요동의 크기와 진동수에 따른 에너지 상태를 나타내는 power spectrum의 분포를 이용하면 기포와 유동화 입자의 거동을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 균일밀도의 입자를 대상으로 유동층 하부의 초기 기포의 생성에 영향을 주는 jet zone과 기포의 합체와 붕괴가 일어나는 영역에 입자의 크기, 유속, 초기충돌이 미치는 영향을 분산판으로부터의 높이에 따른 압력요동의 크기와 power spectrum의 분포를 해석하여 층내의 기포와 유동화 입자의 거동을 예측하고자 한다.

2. 이론적 고찰

일반적으로 유동층내의 압력요동은 stationary ergodic random process로 알려져 있다. Random variable은 정적 성분과 동적 성분으로 구성되어 있으며 전자는 유동층의 가시적인 무게와 같은 평균압력을 나타내며 식(1)과 같이 표현된다.

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

후자는 유동층내의 압력요동 특성을 나타내며 그 크기는 표준편차로 표현될 수 있으며 식(2)와 같이 정의된다.

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

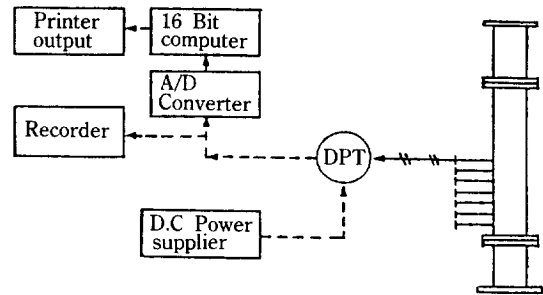


Fig. 1. Schematic diagram of experimental units.

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

Power spectral density function은 random data의 시간 영역함수를 빈도수 영역으로 변환시킨 함수이며 auto-correlation function의 Fourier transform한 것으로 다음의 식(3)과 같다.

$$G_x(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \exp(-i 2\pi f \tau) d\tau \quad (3)$$

여기서 $R_x(\tau)$ 는 auto-correlation function으로 다음의 식(4)와 같다.

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) \cdot X(t+\tau) dt \quad (4)$$

Power spectral density function은 주어진 조건에서 각 frequency의 에너지 분포를 나타낸다. 상세한 random signal의 해석은 Bendat와 Piersol[9]에 의해 기술되어졌다.

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 유동층 기벽과 입자간의 정전기 현상을 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 아크릴 관을 사용하였으며 압력요동을 측정하기 위하여 분산판으로부터 측방향으로 0.025 m 간격으로 측정구를 설치하였다. 기체 분산판은 Atlas Minerals and Chemical Co.의 pore 크기 100 μ m, 두께 1.5 mm Vyon porous plastic

Table 1. The properties of sample particle

Particle size(mm)	ϵ_{mf}	U_{mf} (m/s)
0.715	0.449	0.36
0.359	0.465	0.12
0.194	0.520	0.047

plate를 사용하였으며 개공비는 약 3%이다.

측정부는 압력요동을 측정할 수 있는 차압전달기(Differential Pressure Transducer)와 측정된 압력요동신호를 처리할 수 있는 부분으로 구성되어 있다. 차압전달기는 Validine Model P305D를 사용하였으며 최대측정허용범위(working capacity)는 1.25 kPa이다. 층내로 삽입시키기 위한 probe는 내경 2 mm, 외경 4 mm, 길이 0.2 m의 stainless steel관을 사용하여 차압전달기의 +극에 연결시켰으며 -극은 대기중에 노출시켰다. 또한 probe의 끝은 유동화 입자가 들어가지 않도록 200 mesh 망으로 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 처리 분석하기 위하여 PC(personal computer)를 연결하였다.

3-2. 실험방법

실험은 유동층에 일정크기의 시료를 넣은 후 회분식으로 실시하였으며 압력요동의 측정은 모든 실험에서 차압전달기의 probe를 각 위치의 층 중심에 설치하여 실시하였다. 차압전달기에는 power supplier를 이용하여 15 volt의 일정 전원을 공급하였으며 보정은 고정층에서 manometer로부터 얻은 압력강하와 동시에 차압전달기에서 얻은 data를 회귀분석하였다[10]. 압력요동의 측정은 sampling time을 sampling theorem의 정의를 이용하여 10 ms로 하였으며 sampling data의 수는 1024개로 하였다. 실험은 일정조건에서 한번에 1024개씩 15번 sampling하여 PC를 이용하여 압력요동의 통계학적 특성치를 IMSL computer program package (Texas, Huston)를 이용하여 얻었다.

3-3. 시료

본 실험에 사용된 시료는 진밀 수가 2624 kg/m³인 시멘트 몰탈 압축강도시험용 모래인 수산진 표준사로 Geldart[11]의 분류에 의하면 group B에 속한다. 실험에 사용한 입자는 크기에 따라 세종류이며 특성은 Table 1에 나타내었다. 각 입자들의 최소유동화속도는 Hong 등[12]에 의하여 제시된 압력요동과 유속의 관계로부터 구하였다.

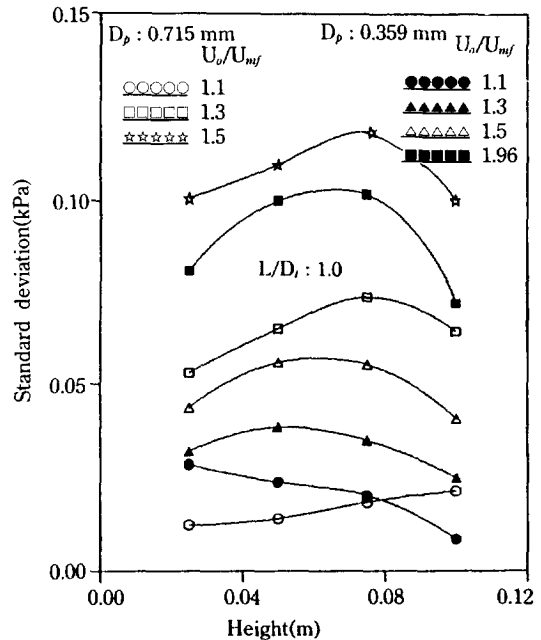


Fig. 2. Standard deviation of pressure fluctuations along the axial position of the bed.

4. 결과 및 고찰

4-1. 층내 높이에 따른 압력요동의 표준편차

Fig. 2-4는 각각의 일정 초기층높이에서 축방향에 따른 압력요동의 표준편차를 유속(U_o/U_{mf})의 변화에 대하여 입자크기가 0.715와 0.359 mm의 경우를 비교하여 나타낸 그림이다. Fig. 2에서 보면 낮은 유속($U_o/U_{mf}=1.1$)에서는 분산판으로부터의 높이가 증가함에 따라 0.715 mm 입자의 경우에는 표준편차가 단순 증가하였다. 그러나 유속이 증가하게 되면 표준편차의 높이에 대한 증가곡선의 기울기가 증가하며 이후 유속에 따라 표준편차가 최대값을 나타낸 후 다시 감소하였다. 이것은 낮은 유속에서는 초기생성기포가 작고 또한 서서히 상승하기 때문이다. 유속이 증가하게 되면 초기생성기포의 크기가 증가하며[3, 13] 생성된 기포가 상승하며 합체할 때 발생하는 에너지 발산에 의하여 압력요동이 커지기 때문이다. 또한 유속이 증가하면 생성기포의 크기와 합체의 빈도수가 증가하기 때문에 기울기가 커지게 된다. 입자의 크기가 0.359 mm의 경우에 낮은 유속에서는 표준편차가 분산판으로부터의 높이가 증가함에 따라 감소하였다. 그리고 유속이 증가하면 0.715 mm 입자와 같은 경향을 나타내며 표준편차가 증가한 후 감소하였다. 이것은 입자가 작은 경우에는 입자간 치밀도(compactibility)의 영향으로 유동층의 높이에 따른

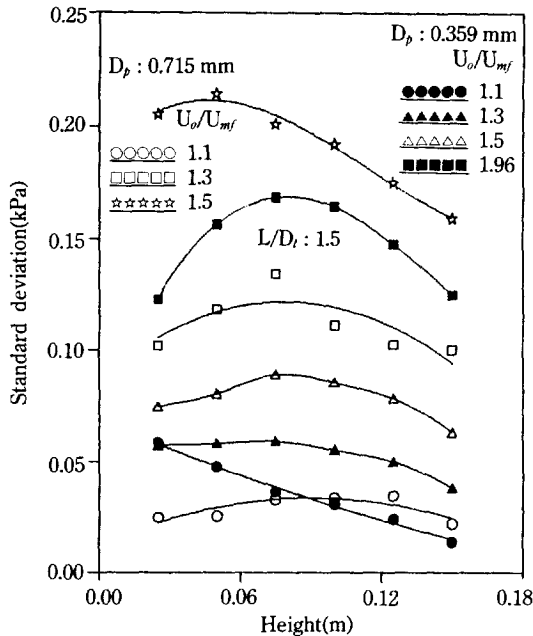


Fig. 3. Standard deviation of pressure fluctuations along the axial position of the bed.

압력 강하 구배가 비선형 관계를 갖게 되어[14] 유동층 하부와 상부의 공극변화에 의해 유동층 내부에 bulk density 차가 발생하여 상부에서 하강한 유동화 입자가 분산판의 pore를 통과하는 공기에 의해 생성되는 jet를 방해하고 분산판 하부의 압력의 증가로 다시 jet가 발생하는 opening과 necking현상에 의하여 분산판 부근에서 압력요동이 증가하는 것이다[15]. 본 실험에서는 유동층 내부에 추적자를 투입하여 유속에 따라 추적자의 이동을 조사한 결과 유속이 낮은 경우 유동화 입자의 하강을 관찰할 수 있었으며 또한 이러한 jet의 opening과 necking현상에 의한 압력요동의 주진동수가 기포의 거동에 의한 주진동수보다 크게 나타난다는 최근의 연구 결과[15]와도 일치되는 것을 확인하였다[12, 16]. 유속이 상승하게 되면 유동화 입자의 혼합이 격렬하게 되어 분산판의 jet에 영향을 주게 되어 opening과 necking 현상이 압력요동에 미치는 정도가 약화되기 때문에 0.715 mm의 경우와 비슷한 경향을 나타낸다. 이러한 결과는 유속의 증가에 따라 유동층 분산판에서의 jet에 의하여 dead zone이 감소한다는 현상과도 일치한다[17].

Fig. 3, 4는 초기층높이를 $L/D=1.5$, 2로 증가시켰을 때의 분산판으로부터 축방향의 높이에 따른 표준편차를 나타낸 그림이다. 전체적인 경향은 Fig. 2와 같으나 0.715 mm의 경우 유속이 증가할수록 최대값을 갖는 위치가

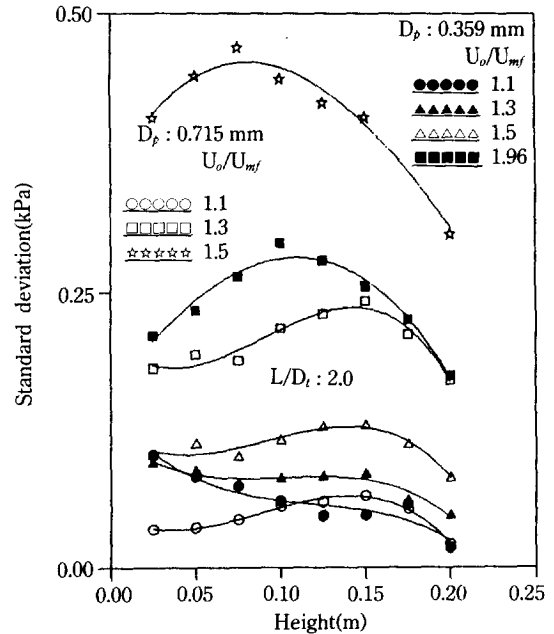


Fig. 4. Standard deviation of pressure fluctuations along the axial position of the bed.

분산판쪽으로 하향하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 여러 연구자들의 결과[5, 18]와도 같다. 이러한 현상의 해석을 Drahos 등[18]은 최대값을 가지는 높이를 기포의 크기와 층의 직경비가 15% 이하를 갖는 freely bubbling height라 하였으나 이것은 Fig. 2, 3의 결과에서 알 수 있듯이 유속이 낮은 상태에서도 발생하므로 명확한 해석이 될 수 없다. Fan 등[5]은 이 현상의 원인을 층내의 bulk density의 변화에 의한 것이라 발표하였다. 즉 초기층높이가 증가하면 생성기포의 크기와 합체의 빈도수가 증가하기 때문에 유속이 증가할수록 기포의 합체 영역이 하부로 이동한다는 것을 나타내고 있다. 그러나 0.359 mm 입자의 경우에는 이러한 경향을 보이지 않고 있다. 이것은 입자가 작기 때문에 생성기포가 작게 되어 기포의 합체 영역에 영향을 주지 않는 것으로 생각된다. 그러나 유속이 계속 증가하면 같은 현상을 나타낼 것이다. Fig. 4에서 보면 0.359 mm의 경우에 낮은 유속($U_o/U_{mf}=1.1$)에서는 높이에 따른 표준편차가 앞의 경우와 같이 단순감소하나 유속이 증가할수록 최고점이 2개인 형태로 나타났다. 이러한 결과는 입자의 치밀도가 크기 때문에 초기층높이가 증가할수록 상대적으로 gas chamber의 압력강하가 더욱 커지게 되고 따라서 유동화 가스의 유입시 저항이 증대되어 분산판에서 생성된 jet의 길이가 증가하므로 Fig. 2에서 설명한 바와 같은 현상이 보다 높은 위치까지 영향을 미쳐서 유동화 상

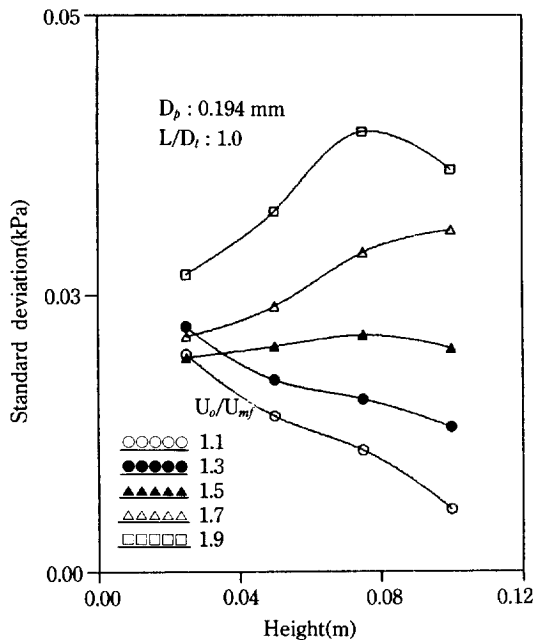


Fig. 5. Standard deviation of pressure fluctuations along the axial position of the bed.

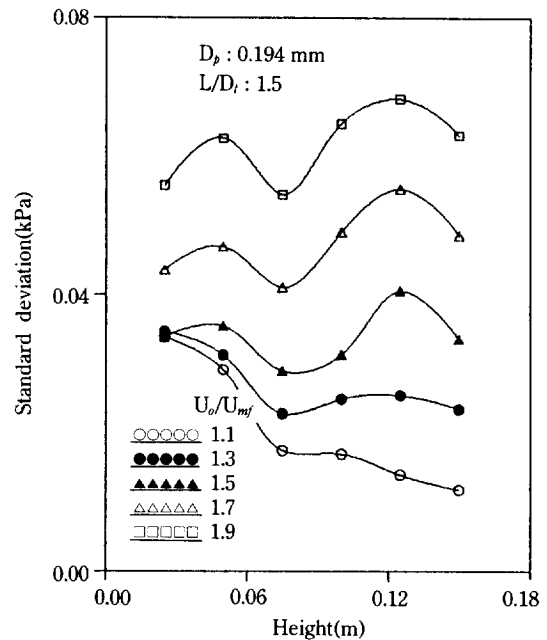


Fig. 6. Standard deviation of pressure fluctuations along the axial position of the bed.

태가 다른 영역을 형성하게 된다. 그러므로 입자의 치밀도가 큰 경우 초기층높이가 증가하면 유동층에는 기포의 거동과 입자의 혼합상태가 다른 영역이 층상, 하부에 존재하게 된다는 것을 보여주고 있다. 이러한 유동화 상태의 분리는 유속이 계속 증가하면 입자의 혼합이 매우 격렬하게 되어 점차 소멸될 것이다. 같은 현상이 Fig. 3에서 나타나지 않은 것은 층 하부의 영향이 매우 낮은 위치에만 미치기 때문이다. Fig. 2-4에서 보면 초기층높이가 증가할수록 같은 유속에서 표준편차의 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 초기층높이가 증가할수록 초기생성기포의 크기가 증가하여 압력요동이 커지기 때문이다[6]. 그림들에서 유속(U_o/U_{mf})이 1.3 이상의 경우 표준편차가 최대점을 갖고 이후 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이 최대점을 갖는 위치는 이론적 고찰에서 설명하였듯이 표준편차는 압력요동의 측정시간동안 발생한 전체 에너지의 합을 의미하고 또한 다음과 같은 유동화 입자의 운동에너지와 관계를 지어 설명할 수 있다. 유동층에서 고체입자의 기계적인 운동에너지는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다[19].

$$E(U_o) = E(U_{mf}) + W \quad (5)$$

여기서 W : 유동상태에서 특정지을 수 있는 inhomogeneity에 의한 energy contribution

위의 식(5)의 W 는 압력요동의 표준편차와 비례관계에 있다. 즉 $W \propto S.D.$ 이므로 표준편차가 클수록 고체입자의 운동에너지가 크다는 것을 식(5)에서 알 수 있다. 따라서 이들 그림에서 보면 표준편차의 최고점을 갖는 위치는 기포가 가장 격렬하게 합체하며 이로 인하여 고체입자의 혼합이 가장 우수하다는 것을 알 수 있다. 또한 이 최대점을 갖는 이후 표준편차가 감소하는 이유는 기포의 합체가 상대적으로 작고 또한 상당히 크게 성장한 기포에 의해 상부의 voidage가 증가하여 전달 매질의 밀도에 영향을 받는 압력요동의 wave가 약화되었기 때문이다[8]. 또한 같은 U_o/U_{mf} 에서 입자가 작은 것이 압력요동의 크기가 작음을 알 수 있다. 이것은 입자가 작을수록 생성기포의 크기가 작기 때문이다.

입자의 크기가 0.194 mm의 경우인 Fig. 5에서 보면 표준편차가 높이에 따라 감소하는 경향이 $U_o/U_{mf}=1.3$ 까지 나타났다. 이것은 입자의 크기가 상당히 작기 때문에 입자들의 치밀도가 더욱 커져 보다 높은 유속에서까지 jet의 opening과 necking 현상이 발생하기 때문이다. 그러나 유속의 증가에 따라 소멸됨을 알 수 있다. 또한 초기층높이는 $L/D=1.5$ 인 Fig. 6의 경우에서 보면 앞에서 설명한 Fig. 4의 경향을 확실하게 보여 주고 있다. 이러한 결과로부터 입자의 크기가 압력요동에 많은 영향을 미치는 것을 확인시켜 주고 있다.

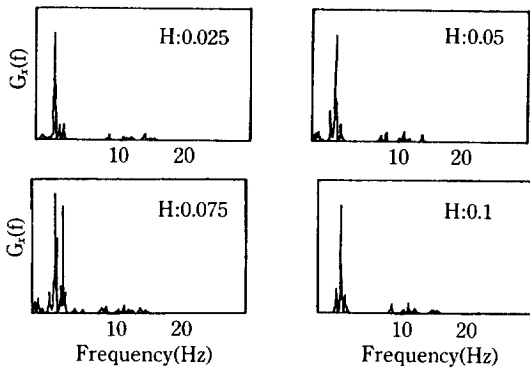


Fig. 7. Power spectrum distribution with height above the distributor ($D_p = 0.715$ mm, $U_o/U_{mf} = 1.3$, $L/D_i = 1.0$).

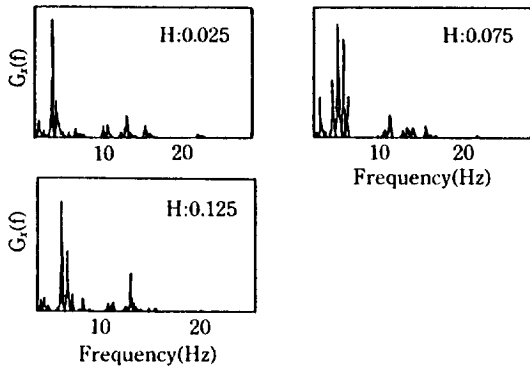


Fig. 8. Power spectrum distribution with height above the distributor ($D_p = 0.359$ mm, $U_o/U_{mf} = 1.96$, $L/D_i = 1.5$).

4-2. 층내 높이에 따른 power spectrum의 분포

Fig. 7은 초기층높이가 $L/D_i = 1$ 일 때 일정유속에서 0.715 mm 크기의 입자에 대한 power spectral density function을 측정높이에 따라 나타낸 그림이다.

Power spectrum은 앞에서 설명하였듯이 주어진 조건에서 빈도수의 함수로 유동층내에서 발생한 에너지 분포를 나타내므로 spectrum의 peak가 넓은 형태일수록 측정위치에서 여러 가지의 다양한 빈도수를 가지는 기포와 고체간의 복잡한 현상이 일어나고 있음을 의미한다 [12, 20]. Fig. 7에서 보면 0.075 m의 높이에서 얻어진 spectrum이 가장 넓고 복잡한 분포를 가지고 있음을 알 수 있다. 또한 이 높이는 Fig. 3에서 압력요동의 표준편차가 최대값을 나타내는 위치와 일치하고 있다. 따라서 압력요동의 표준편차가 가장 큰 높이에서 기포가 가장 격렬한 운동을 하며 이로 인하여 야기된 고체입자의 혼합이 가장 우수하다는 앞의 설명과 일치하는 결과이다.

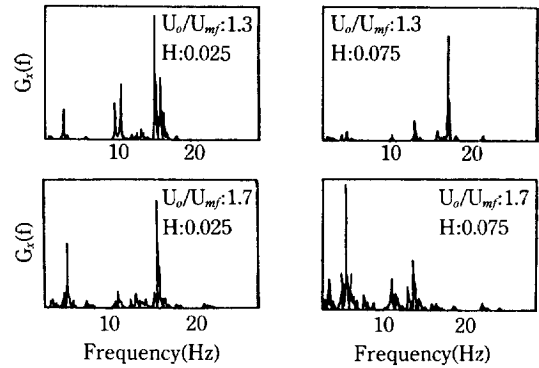


Fig. 9. Power spectrum distribution with height above the distributor ($D_p = 0.194$ mm, $L/D_i = 1.0$).

Fig. 8에는 0.359 mm 입자의 경우 초기층높이가 증가하였을 때의 spectrum을 나타내었다. 앞의 결과와 같이 표준편차가 최대값을 갖는 위치에서 spectrum의 분포가 가장 넓고 복잡하게 나타났다. 또한 초기층높이가 높아지면 초기생성기포의 크기가 증가하므로 작은 spectrum peak들은 소멸되나 주진동수 주변의 peak들이 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 9는 입자의 크기가 0.194 mm의 경우 spectrum의 분포를 나타낸 그림이다. $U_o/U_{mf} = 1.3$ 에서는 분산판으로부터 0.025 m에서의 spectrum이 0.075 m보다 넓게 분산되어 나타났다. 이것은 Fig. 5에서 하부의 압력요동의 표준편차가 상부보다 크게 나타나는 것을 잘 설명하여 주는 결과이다. 또한 주진동수가 분산판으로부터 높은 위치까지 약 16 Hz로 나타났다. 따라서 분산판에서 발생하는 jet의 opening과 necking이 압력요동에 미치는 영향이 크다는 것을 의미한다.

그러나 유속이 $U_o/U_{mf} = 1.9$ 로 증가하면 유동층의 상부에서 bed의 층표면을 빠져나가는 기포에 의한 압력요동이 우세하게 되어 jet에 의하여 발생하는 현상은 하부에서만 나타나고 층상부로 올라갈수록 기포의 합체에 의한 고체입자의 복잡한 거동이 spectrum에 나타나게 된다. 이러한 결과는 Fig. 5의 결과와도 일치하는 것이다.

전체적으로 power spectrum의 분포로부터의 결과는 앞의 압력요동의 표준편차로부터 유동층의 내부의 거동에 대한 예측을 잘 설명하여 주고 있다.

5. 결 론

기-고 유동층에서 입자의 크기가 압력요동에 미치는 영향을 규명하고 또한 이를 이용하여 유동층 내부의 거동을 이해하기 위해 압력요동의 크기 즉 표준편차와

power spectral density function의 분포 자료로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

유동층에서 측정위치의 에너지 상태를 나타내는 압력요동의 power spectral density function의 분포는 표준편차의 값이 최대값을 갖는 위치에서 가장 넓게 나타난다. 따라서 일정유속에서 압력요동의 표준편차의 값이 최대치를 갖는 위치에서 기포가 가장 격렬한 거동을 하며 이 지점에서 유동화 입자의 혼합이 가장 좋다. 또한 입자의 크기는 유동층에서 기포와 고체입자의 거동에 큰 영향을 미치고 이러한 영향은 입자의 크기가 작을수록 심해지고 초기층 높이가 증가할수록 분산판으로부터 비교적 높은 영역까지 나타나며 유속이 증가하면 감소한다.

NOMENCLATURE

D	: bed diameter [m]
D_p	: particle diameter [μm]
$E(U_o)$: mean mechanical energy per unit volume at superficial gas velocity U_o [kJ/m^3]
$E(U_{mf})$: mean mechanical energy per unit volume at minimum fluidizing velocity [kJ/m^3]
f	: frequency [Hz]
$G_x(f)$: power spectral density function
H	: measuring height above the distributor [m]
L	: static bed height [m]
$R_x(\tau)$: autocorrelation function
T	: observation time [s]
t	: time [s]
U_o	: superficial gas velocity [m/s]
U_{mf}	: minimum fluidization velocity [m/s]
W	: energy contribution due to inhomogeneity [kJ/m^3]
$X(t)$: measured pressure fluctuations in a fluidized bed [kPa]
S.D.	: standard deviation of pressure fluctuations [kPa]
ϵ_{mf}	: bed voidage at minimum fluidizing condition
P_m	: mean pressure of pressure fluctuations [kPa]

REFERENCES

- Row, P. N. and Mason, H.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **59**, 177(1981).
- Yosui, G. and Johnson, L. N.: *AIChE J.*, **4**, 445 (1958).
- Choi, J. H., Son, J. E. and Kim, S. D.: *J. Chem. Eng. Japan*, **21**, 171(1988).
- Geldart, D. and Kelsey, J. R.: *Powder Tech.*, **6**, 45 (1972).
- Fan, L. T., Tho-Ching Ho, Hiraoka, S. and Walawender, W. P.: *AIChE J.*, **27**, 388(1981).
- Sadasivan, N., Barreteau, D. and Laguerie, C.: *Powder Tech.*, **26**, 67(1980).
- Kang, W. K., Sutherland, J. P. and Osberg, G. L.: *Ind. Eng. Chem. Fundamentals*, **6**, 499(1967).
- Gregor, W. and Rumpf, H.: *Powder Tech.*, **15**, 43 (1976).
- Bendat, J. S. and Piersol, A. G.: "Random Data Analysis and Measurement Procedures", Wiley-Interscience, New York, (1971).
- Svoboda, K., Cermak, J., Hartman, M., Drahos, J. and Selucky, K.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **22**, 514(1983).
- Geldart, D.: *Powder Tech.*, **7**, 285(1973).
- Hong, S. C., Jo, B. R., Choi, C. S. and Doh, D. S.: *Powder Tech.*, **60**, 215(1990).
- Darton, R. C., LaNauze, R. D., Davidson, J. F. and Harrison, D.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **55**, 274 (1977).
- Verloop, J. and Heertjes, P. M.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 1035(1974).
- Vaccaro, S., Musmarra, D., Cosntanza, F., Filla, M. and Massimilla, L.: in Fluidization VI, ed. Grace, J. R., Schemilt, L. W. and Bergougnou, M. A., Engineering Foundation, New York, 245(1989).
- Hong, S. C., Oh, K. J., Choi, C. S. and Doh, D. S.: in Proceedings of the Second Asian Conference on Fluidized Bed and Three Phase Reactors, ed. Yoshida, K. and Morooka, S., Tokyo, 22(1988).
- Wen, C. Y., Krishnan, R., Khosravi, R. and Dutta, S.: in Proceedings of the Second Eng. Found. Conf. Fluidization, Cambridge Univ. Press, 32 (1978).
- Drahos, J., Cermak, J. and Schugerl, K.: *Chem. Eng. Comm.*, **65**, 49(1988).
- Furukawa, J. and Ohmae, T.: *Ind. Eng. Chem.*, **50**, 821(1958).
- Lirag, R. C. and Littman, H.: *AIChE Symp. Ser.*, **67**, 11(1971).