

## 2차원 유동층에서 압력과 공극의 요동

서용철·박헌휘

한국에너지연구소 방사성폐기물관리부  
(1988년 8월 31일 접수, 1988년 12월 5일 채택)

### Pressure and Porosity Fluctuations in Two-Dimensional Fluidized Beds

Yong-Chil Seo and Hun-Hwee Park

Radwaste Management Division, KAERI, Dae-Duk Dan-Ji P.O. Box 7, Tae-Jon, Korea  
(Received 31 August 1988; accepted 5 December 1988)

#### 요 약

기포 생성을 위한 단일 젯트 노즐을 가진 2차원 유동층에서 압력변환기와 감마선 감쇄방법을 이용하여 압력과 공극의 요동을 측정하였다. 측정된 결과는 Fast Fourier Transform(FFT)을 이용한 Power Spectrum Analyzer로 해석되었다. 층내의 여러 곳에서 압력과 공극의 요동을 초기층의 높이가 11-40 cm인 범위와 젯트의 유속이 1-10m/s인 범위에서 각각의 함수로 그 특성을 규명하였다. 층내에서 공극의 주진동수는 층내의 여러 곳에서 일정한 값을 갖는 압력의 진동수와 같은 것으로 정의될 수 있었다. 기포의 상승속도와 이동거리의 관계의 변형식으로 이 주진동수를 표시할 수 있었다. 주진동수는 초기층의 높이에 따라 감소하며 젯트의 유속에 따라 증가하며 또한 입자의 물성치의 함수임을 알 수 있었다. 어떤 한 지점에서의 압력 요동의 진폭은 고속영화촬영에 의해 측정된 기포의 크기의 함수로 표시될 수 있었다.

**Abstract**—Pressure and void fluctuations were measured with a pressure transducer and with a  $\gamma$ -ray attenuation device in a two-dimensional fluidized bed with a jet. The results were analyzed using a power spectrum analyzer with Fast Fourier Transform. Pressure and void fluctuations along the height of the bed were characterized as functions of static bed heights in the range of 11-40 cm and of jet velocities in the range of 1-10 m/s. The major frequency of void fluctuations in the bed could be defined as the same frequency of pressure fluctuations having unique value at every location of the bed. The major frequency could be correlated as functions of static bed heights and properties of solid, after modifying the correlations of bubble rise velocity and travelling distance. The major frequency decreases with static bed height and increases with jet velocity. The amplitude of pressure fluctuations at a certain location was found to have a relationship with the bubble size measured using a high speed movie camera.

#### 1. 서 론

유동층(fluidized bed)은 지난 30여년동안 유동층이 갖는 여러가지의 장점들, 예를 들면 접촉면적의 향상에 따른 열 및 물질전달속도의 증가와 고체입자의 유동성으로 인해 각광을 받고 있다. 또한 응용분야도 다양하

여 각종 화학반응로에 이용되며 최근에는 저질탄 또는 폐기물을 연소와 소각 등에서도 활용되고 있다. 액체, 슬러지 및 유동성을 갖는 작은 입자형의 고체 폐기물을 낮은 온도에서도 쉽게 소각시키며 때로는 층내 물질을 산성 성분과 중화할 수 있는 알칼리성 고체를 사용하여 유해성 산성가스를 소각과 동시 제거하는 등의 장점들



가지므로 효과적인 소각을 가능케 한다. 방사성폐기물 분야에도 미국과 몇개국[1-3]에서 현재 유동층을 이용한 소각 기술의 상용화 및 연구를 실시하고 있다.

기공 유동층(gas-solid fluidized bed)의 경우 공극과 압력은 쉬지않고 요동을 하게 된다. 이 요동은 유동층내에 특성을 규명하는 중요한 인자가 되며, 유동화 상태의 좋고 그름을 알아내는 기준치로 사용하기 위해 많은 연구자들이[4-10] 쉽게 측정할 수 있는 압력의 요동에 대해 연구하였다. 그러나 압력의 요동과는 반대로 공극 요동에 대한 측정과 연구는 그다지 없는 실정이다. Baumgarten과 Pigford[11]는 감마선 흡수기술을 이용하여 공극의 요동을 감시해 보았다. 그들은 밀도의 요동현상은 기포에 의한 것이며 유동층의 효율을 나타내는 기준이라고 하였다. Winter[9]는 기공 유동층내에 압력과 공극의 요동을 광전지 장치, 베타선 흡수장치, 전도도 측정장치를 같이 사용하여 측정하였으며 측정된 밀도의 결과로부터 기포의 크기를 추정하기도 했다.

수력학적 모델로부터 압력과 공극의 요동을 계산해 보려는 시도가 Ettehadieh[12]에 의해 실시되기도 하였고 또한 압력 요동의 경우 요동이 갖는 진동수가 여러 유동층내의 변수의 관계식으로 표현되기도 하였다[7, 10].

본 연구에서는 압력과 공극을 동시에 측정하기 위해 압력변환기와 방사성 동위원소인 Cs-137로부터 발생하

는 감마선을 이용하여 실험하였으며, 측정된 요동을 Fast Fourier Transform(FFT)을 이용하여 power spectrum을 계산함으로써 진동수를 알아 내었다. 공극과 압력 요동간의 관계를 알아 보았으며 시각적인 방법인 영화촬영 기법으로 측정된 기포의 크기가 이 요동에 어떻게 관계하는 가를 알아보기 위해 압력 요동의 진폭과 기포 크기를 관계식으로 표현하여 보았다.

유동층내를 지배하는 공극 요동의 주진동수를 정의하여 이것이 압력 요동의 진동수와 같음을 보았으며 이에 대한 이론식을 관찰된 기포의 생성 및 이동으로부터 유도하여 계산치와 실험결과를 비교하여 보았다. 발생된 기포는 젯트의 노즐로부터 떨어져 나아가 상승 이동하며 주위의 유동층 기체 또는 연이어 상승하는 작은 기포와 합체 현상을 일으키며 큰 기포가 되어 층 상단부를 통과하며 마침내 표면에서 폭발하듯이 터지게 되며 층내의 압력 요동은 이러한 큰 기포의 상단부 움직임과 터지는 기포에 의해 지배된다. 그래서 이 기포의 관찰이 중요하게 되며 기포에 의한 공극 요동의 주진동수를 알아내기 위해 알려진 기포의 상승에 관한 상관식과 기포의 이동거리로부터 이에 대한 이론식을 유도하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 실험장치

본 실험이 이용된 실험장치는 크게 2차원 유동층,

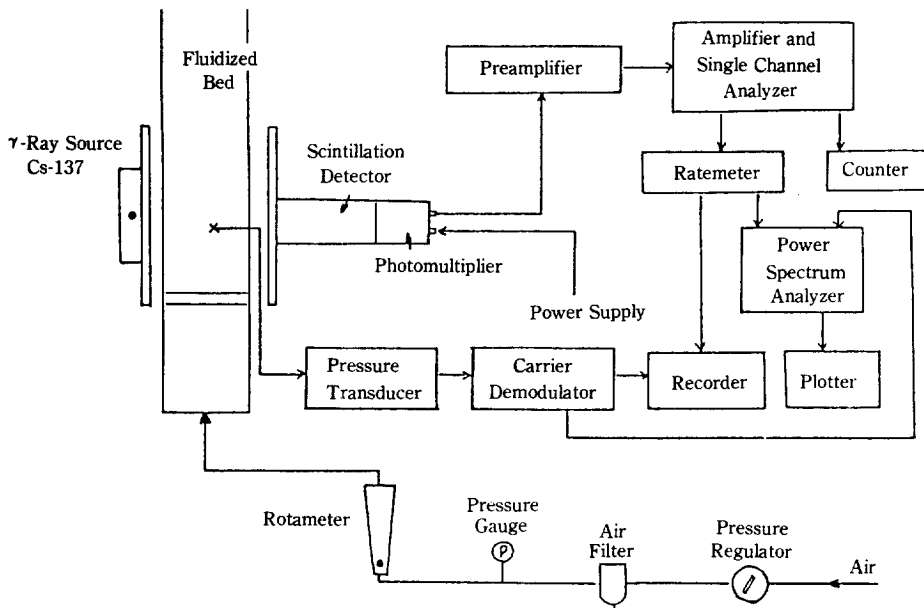


Fig. 1. A schematic diagram of the experimental set-up.



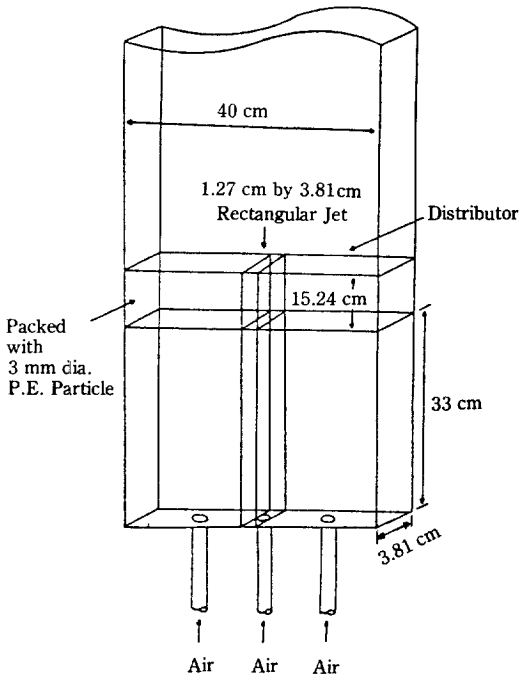


Fig. 2. Plastic two-dimensional bed with a slit jet.

감마선을 이용한 밀도측정장치, 압력변환기(pressure transducer)가 주를 이루는 압력측정장치, power spectrum analyzer로 구성되어 있다. 실험장치의 개요가 Fig. 1에 나타나 있으며, 2차원 유동층은 1.25 cm 두께의 아크릴로 만들어졌으며, 규격은 Fig. 2에 표시되어 있다. 2차원 유동층의 두께는 3.81 cm이고 폭은 40 cm이다. 유동층의 분배기(distributor)는 약 15 cm 정도의 충전층을 이용 분산판에 요구되는 압력차를 갖도록 하였으며 상단에는 층내 물질의 새어 나옴을 막기 위해 철망(100 mesh)으로 덮어 주었다. 기포 발생을 위한 젯트는 1.27 cm의 slit을 만들어 압축공기가 유동층 공기와는 별도로 들어가도록 설계되었다. 실험에 사용된 유동층내의 물질은 glass bead와 모래를 사용하였으며 이들의 물리적 성질이 Table 1에 나타나 있다.

Table 1. Physical properties of materials

Materials	dp ( $\mu\text{m}$ )	$\rho_p$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho_f$	$\epsilon_p$	$U_{mf}$ (m/s)
Glass bead	800	2450	1.0	0.388	0.421
Sand	603	2610	0.85	0.402	0.270

Cs-137 500 mCi인 방사성 동위원소를 사용하여 유동층을 통과한 후의 감쇄된 방사선의 강도(intensity)를 Beer's Law에 적용하여 층내 밀도를 측정하는 밀도측정장치를 이용, 공극의 요동을 측정하도록 하였다. Cs-137은 30년의 반감기와 방사되는 주에너지는 0.667 MeV이므로 짧은 기간의 실험중에는 일정한 방사능을 발생한다. 방사선원을 포함한 용기는 입구에 개폐 기능을 갖는 sliding gate가 있어 필요시에만 방사선을 방사할 수 있도록 되어 있다. 방사된 방사능은 유동층을 통과하여 바로 맞은 편에 부착된 NaI scintillation detector에 의해 통과 후의 방사능이 측정되게 된다. 방사선원과 detector는 같은 점에 위치하여 측정할 수 있다. 감지되어진 방사능은 바로 amplifier와 single channel analyzer(SCA)를 통과하고 ratemeter에서 아주 짧은 적분시간 상수로 구분 적분되어 digital signal을 만들어 기록이 되거나 바로 power spectrum analyzer로 계산되도록 되어 있다. 본 장치의 밀도와 기록된 signal과의 보정방법은 Gidaspow 등의 문헌[13]에 자세히 나와 있다.

압력 요동을 측정하기 위해 유동층의 벽에는 압력 측정 tap이 철망으로 덮여져서 부착되어 있다. 측정범위가  $\pm 0.035$  bar이고 오차가 0.5%인 고감도의 압력 변환기가 측정 tap에 연결된 튜브를 통하여 압력을 측정하며 바로 기록이 되거나 역시 power spectrum analyzer에 연결이 되어 계산되도록 되어 있다.

압력과 공극의 요동은 순간 시간에서 기록이 되기도 하며 FFT 방법을 이용한 power spectrum analyzer에 의해 시간 영역 정보(time domain data)를 진동수 영역 정보(frequency domain data)로 바꾸어지게 된다. 본 analyzer(Nicolett 100A)는 내장된 microprocessor를 이용 FFT를 계산하여 결과를 화면에 보여줌과 동시에 저장시켜 이를 plotter를 통해 도식할 수 있도록 되어 있다. 요동이 갖는 특성 또는 진동수를 이로부터 알아낼 수 있다.

기포의 크기는 모든 압력 공극의 요동을 측정하기 위한 장치를 제거하고 유동화를 시키면서 기포를 발생시키고 실행시간보다 4배 정도의 빠르기인 64 frames/s의 속도로 촬영을 하였다. 층 표면에 자(scale)를 부착하여 기포의 폭과 높이를 측정하여 면적을 계산할 수 있도록 하였다. 이로부터 기포의 상당 직경을 산출하게 된다.

## 2-2. 실험방법

유동층내에 고체 입자들을 넣고 각 입자에 대해 최소



유동화 속도를 알기 위해 공기의 유속을 변화시키면서 층내의 압력강하를 측정하였다. 좌우의 유동층에는 최소유동화 속도의 공기를 불어 넣으면서 slit을 통하여 젯트의 유속을 1.1m/s로부터 9.88m/s까지 변화시키면서 기포를 관찰하며 실험하였다. 감마선과 detector는 위아래로 높이를 변화시키면서 공극의 요동을 측정하였고 이때 사용된 ratemeter의 적분시간 상수는 0.01초였다. 또한 같은 점에서 평균 공극을 구하기 위해서는 약 30초 이상의 적분시간 상수를 이용, 측정하였다.

압력과 공극의 요동은 바로 2 channel 기록계에 의해 순간 요동이 기록되었고 번갈아 가면서 power spectrum analyzer에 연결시켜 spectrum을 계산하였다. 이 analyzer는 자동적으로 16개의 spectra를 계산하여 평균하므로써 spectrum을 매끄럽게 그리고 peak을 정확히 볼 수 있게 하였다. 각 요동의 진폭도 기록된 결과로부터 알아내었다.

촬영기술을 이용하여 기포의 크기를 측정하기 위해 16mm 촬영기로 흑백 film을 가지고 64 frames/s 속도로 영화촬영을 하였다. 영상기로 화면에 비추면서 화면을 정지시켜서 각 지점에서 약 6개 이상의 기포를 택하여 기포의 면적을 측정하였다. 이로부터 기포를 원형으로 가정하여 상당 직경을 구하였다.

### 3. 주진동수(빈도)에 관한 이론

2차원 기고 유동층에서 젯트에 의해 기포(bubble)가 발생되어 상승하며 합체된 큰 기포는 유동층의 표면에서 폭발하듯이 터지게 된다. 이때 층내를 통과하여 터지는 기포의 빈도(frequency)는 유동층내에 존재하는 요동 또는 진동(flucuation)의 특성을 표시하는 하나의 변수가 된다. 또한 뒤의 실험결과에서 보듯이 표면상에서 폭발하는 기포의 빈도는 전체 유동층 반응기내의 압력 진동의 빈도와 일치하며 유동층내의 지배적인 진동 빈도수가 되므로 기포 또는 공극(porosity)의 빈도중 이와같은 큰 기포의 빈도를 층내를 지배하는 주진동수(major frequency)라고 정의할 수가 있다. 이 주진동수가 압력 진동의 진동수와 같으며 압력의 진동수는 층내의 어느 지점에서든지 동일한 값을 가지므로 이의 해석이 중요하게 된다.

젯트가 있는 2차원 기고 유동층에서 본 실험과 같은 투시 가능한 경우 기포를 관찰하여 보면 초기에 발생된

기포는 약간의 형성시간(formation time)을 가지면서 유동층내로 기체상이 침투를 하게 되는데 이것을 젯트 침투(jet penetration)라고 하며 일정한 깊이까지 침투한 후 젯트의 분사구로부터 떨어져서 층내로 상승한다. 상승하면서 주위의 농후상(dense phase)으로부터 기체를 흡입하거나 또 이어진 젯트의 작은 기포를 합체시켜서 큰 기포가 되어 올라가게 되며 이 기포가 얼마간 움직인 후 또는 움직이는 동안 다음 기포가 젯트에 의해 형성되기 시작하며 앞선 기포가 터지는 순간에 다음 기포가 노즐로부터 떨어져 상승하게 된다. 이와같은 현상은 기포유동층의 영역에서만 가능하다. 층의 높이가 높고 층의 폭이 작아서 기포가 커져 슬러깅(slugging)의 현상이 보이는 경우에는 적용이 되질 않게 된다.

이러한 관찰로부터 어떤 임의의 기포의 평균 상승속도를 그 기포의 이동거리로 나누어 주면 층 표면에서 폭발하는 기포의 빈도수를 알아낼 수 있다.

$$f_{\epsilon, M} = \frac{\bar{U}_B}{L_{mf}} \quad (1)$$

여기서  $\bar{U}_B$ 는 기포의 상승속도의 평균값으로서 기포는 층내를 이동하면서 합체현상과 농후상으로부터의 기체 유입으로 인해 점점 커져서 이동속도가 달라지게 되므로 이를 평균한 값이 되며  $L_{mf}$ 는 유동층의 최소유동화시의 높이이며 이를 기포의 이동거리로 가정하였다.

여러 연구자들에 의해 단일 기포의 상승속도는 일반적으로 다음과 같이 표현되었다.

$$U_B = k\sqrt{gD_e} \quad (2)$$

여기서  $D_e$ 는 기포의 상당반경으로 기포를 구(sphere)로 보았을 때 대응하는 기포의 반경을 말하는 것이며 2차원 유동층에서는 기포의 면적으로부터 구해낼 수 있게 된다.  $k$ 값은 Davidson과 Harrison[14]에 의해서 일반적으로 0.711으로 알려졌으나 최근 이 값이 실험값보다 높은 것으로 판명이 되면서 Geldart[15]의 구분에서 Group A와 B 입자에 대해서 0.5-0.66 사이의 값이 적용되는 것으로 나타난다[16].

특별히 2차원 유동상의 경우 유동상 벽의 마찰에 의한 영향으로 0.5를 적용하는 것이 적당하였으며 실제 기포의 크기를 측정하기 위한 영화촬영의 방법에서 기포의 속도와 기포 크기와의 관계를 알아본 결과 본 실험조건에서의  $k$ 값은 Table 2에서 보듯이 0.505의 평균값을 찾았다.

기포의 크기에 대한 여러 실험에 의한 관계식이 있지



**Table 2. Estimated k values from the measured bubble diameters and bubble rise velocities at near the surface**

Materials	$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$V_{jet}$ (m/s)	$D_e$ (m)	$U_B$ (m/s)	k
Glass bead	800	3.55	0.1264	0.497	0.45
		5.77	0.1315	0.541	0.48
		9.88	0.1641	0.718	0.57
Sand	603	3.55	0.1190	0.497	0.46
		5.77	0.1262	0.600	0.53
		9.88	0.1714	0.708	0.54

만 젯트를 가진 유동층의 경우에 적용하기 위해 Gidaspow 등[17]은 Kato와 Wen의 관계식[18]과 Werther[19]의 관계식을 변형하여 표현하였다. 이중 Kato와 Wen의 식을 변형한 식이 층 높이의 변화에 대해 실험결과와 넓은 범위에서 잘 일치하였고 이는 다음과 같다.

$$D_e = D_{Bo} + 1.4 \rho_p d_p h \quad (3)$$

여기서  $D_{Bo}$ 는 초기 기포의 크기이고  $h$ 는 유동층내의 각 높이로써 각 높이에서의 기포의 크기를 알아낼 수 있다.

초기의 기포크기는 2차원 유동층에서 다음과 같다.

$$D_{Bo} = \frac{4}{\pi} \left( \frac{V_o}{\delta} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

여기서  $\delta$ : 2차원 유동층의 두께

$V_o$ : 초기의 기포의 부피

또한 기포의 생성 동안의 누출(leakage)을 고려하면 초기 기포의 부피는 다음과 같이 쓸 수 있다[20].

$$V_o = V_B - V_L \quad (5)$$

$$= 1.378 \frac{Q^{1.2}}{g^{0.6}} - \frac{0.9}{Q^{0.2} g^{0.4}} \left( \frac{1.378 Q^{1.2}}{g^{0.6}} \right) \quad (6)$$

여기서  $V_B$ : 주입 유량 전체에 의해 형성되는 기포의 부피 ( $\text{cm}^3$ )

$V_L$ : 기고 유동층에서 기포형성시 누출되는 부피 ( $\text{cm}^3$ )

$Q$ : 젯트에 의해 분사되는 공기의 양 ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )

결과적으로  $U_B$ 는 아래와 같다.

$$U_B = k \sqrt{g (D_{Bo} + 1.4 \rho_p d_p h)} \quad (7)$$

유동층내에서 평균 속도를 알기 위해 이를 높이에 대해 적분하여 적분 구간으로 나누어 준다.

$$\begin{aligned} \bar{U}_B &= \int_0^{L_{mf}} k \sqrt{g (D_{Bo} + 1.4 \rho_p d_p h)} dh / L_{mf} \\ &= k \frac{0.476 g^{\frac{1}{2}}}{\rho_p d_p L_{mf}} \{ (D_{Bo} + 1.4 \rho_p d_p L_{mf})^{\frac{3}{2}} - D_{Bo}^{\frac{3}{2}} \} \quad (8) \end{aligned}$$

(1)과 (8)을 같이 쓰면

$$f_{\epsilon, M} = 0.476 k \frac{g^{\frac{1}{2}}}{\rho_p d_p L_{mf}} \{ (D_{Bo} + 1.4 \rho_p d_p L_{mf})^{\frac{3}{2}} - D_{Bo}^{\frac{3}{2}} \} \quad (9)$$

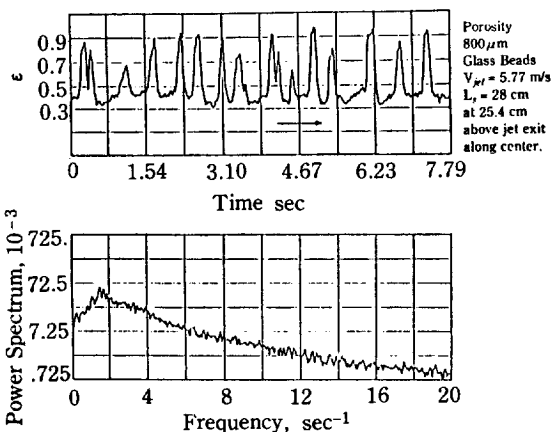
이중  $D_{Bo}$ 는 식 (5)로부터 구해낼 수 있다.

k 값을 0.5로 보고 이를 대입하면 다음과 같은 식으로 공극 요동의 주진동수이며 층내의 지배 진동수인 압력 요동의 진동수가 표현된다.

$$f_{\epsilon, M} = 0.238 \frac{\sqrt{g}}{\rho_p d_p L_{mf}} \{ (D_{Bo} + 1.4 \rho_p d_p L_{mf})^{\frac{3}{2}} - D_{Bo}^{\frac{3}{2}} \} \quad (10)$$

#### 4. 실험결과 및 고찰

Glass bead 800  $\mu\text{m}$ 과 모래 603  $\mu\text{m}$ 로 유동층의 초기 높이를 17.5 cm로부터 40 cm까지, 젯트의 유속은 1.1 m/s부터 9.87 m/s까지 변화시키면서 압력과 공극의 요동을 관찰하였다. 전형적인 공극과 압력의 요동과 각각의 FFT에 의한 power spectrum이 Fig. 3과 4에 나타나 있다. 본 그림은 power spectrum analyzer에 입력된 요동과 이로부터 계산된 power spectrum을 도식한 것으로 spectrum이 분명한 peak를 보이고 있다. Peak에서의 진동수가 해당되는 요동의 진동수가 된다.



**Fig. 3. A typical plot of porosity fluctuations with power spectrum.**



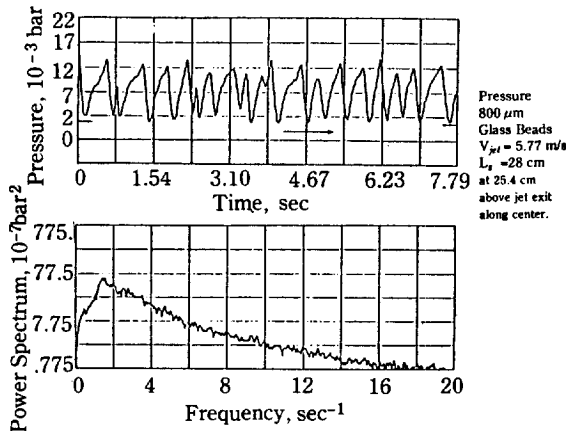


Fig. 4. A typical plot of pressure fluctuations with power spectrum.

#### 4-1. 유동층 초기 높이에 따른 공극의 주진동수의 변화

공극의 주진동수와 유동층 초기 높이의 관계에 대한 실험치와 이론식(Eq. 10)을 함께 Fig. 5에 도식하였다. 본 실험에 사용된 입자의 경우 약 4.3%의 층높이 팽창이 관찰되었으므로 이를 이론식에 대입하여 계산하였다. 주진동수는 층높이의 증가에 따라 감소함을 보였으며 유도되어진 이론식과 잘 일치함을 보였다.

#### 4-2. 젯트 유속과 주진동수

이론식으로부터 젯트의 유속은 초기 기포 크기에 영향을 주게 되며 젯트 유속이 증가할 때 주진동수는 증가하게 되는 것을 실험결과가 이론식의 계산치와 함께 도식이 되어 있는 Fig. 6에서 볼 수 있다. 젯트의 유속

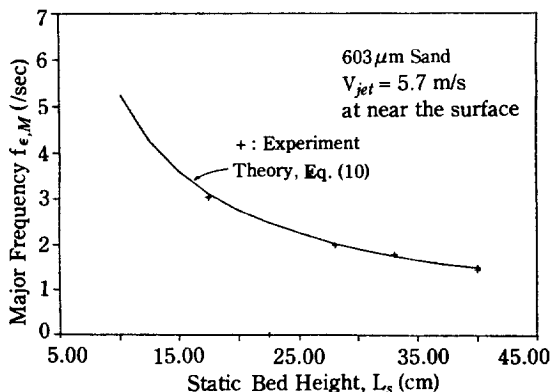


Fig. 5. Variation of the major frequency of porosity fluctuations with static bed height.

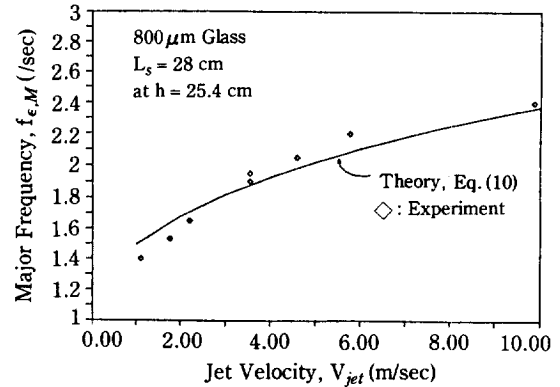


Fig. 6. Variation of the major frequency of porosity fluctuations with jet velocity.

이 커지므로 기포의 생성이 빨라지며 기포가 노즐로부터 빨리 떨어져 상승하게 되고 기포의 크기 또한 커지게 되어 상승 속도가 빨라져 진동수가 증가하게 되는 것으로 사료된다.

#### 4-3. 층의 축방향 높이에 따른 진동수

공극의 요동으로부터 층의 축방향 높이, 즉 기포발생 분사구로부터의 높이에 따른 진동수와 진폭을 나타낸 그림이 Fig. 7과 8이 나타나 있다. 층내의 높이에 따라 공극의 진동수는 줄어들게 되며 층의 2/3 지점을 통과한 후에는 더 이상 진동수가 감소하지 않았다. 이는 기포의 합체 현상이 층의 낮은 곳에서는 일어나며 공극의 진동수는 기포의 통과 빈도수와 일치함을 보여준다. Table 3은 촬영에 의해 얻어진 기포의 빈도수와 공극의 진동수를 비교한 것으로 일치한 값을 보여주고 있다. 진폭은 기포의 크기가 커짐에 따라 높은 위치에서 커짐을 알 수 있다.

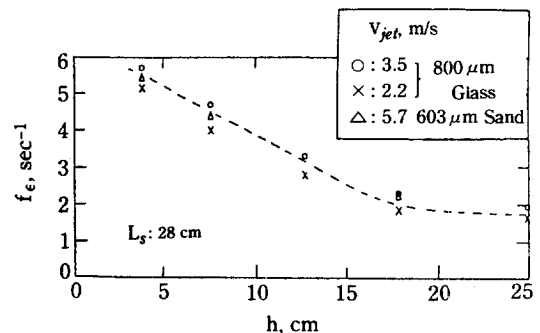


Fig. 7. Variation of the frequency of porosity fluctuations with the height above distributor.



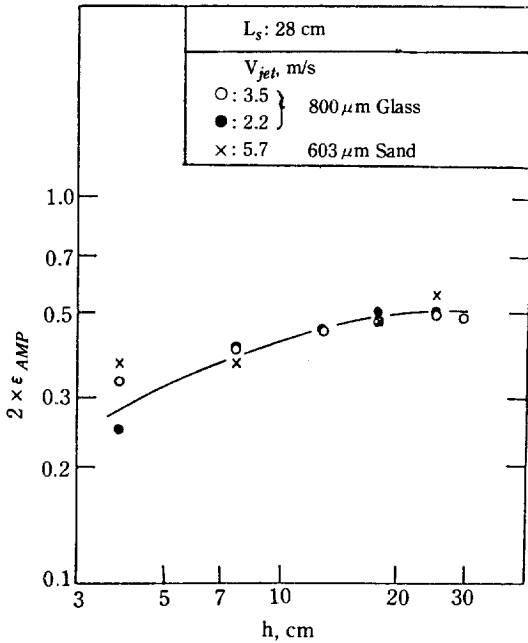


Fig. 8. Variation of the amplitude of porosity fluctuations with the height above distributor.

Table 3. Comparison of frequency of porosity fluctuations to bubble frequency

Material	$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$V_{jet}$ (m/s)	$h$ (cm)	Bubble Frequency (l/s)	$f$ (l/s)
Glass	800	3.55	3.81	6.0	5.7
Beads	800	3.55	7.62	4.9	4.7
	800	3.55	12.70	—	3.3
	800	3.55	15.24	3.2	2.0
	800	3.55	17.80	—	2.3
	800	3.55	Top	2.0	2.0
	800	5.77	Top	2.2	2.2
	800	9.87	Top	2.4	2.4
Sand	603	5.77	3.81	6.0	5.6
	603	5.77	7.62	4.3	4.4
	603	5.77	15.24	2.7	—
	603	5.77	17.80	—	2.3
	603	5.77	Top	2.1	2.0

#### 4-4. 공극의 요동과 압력의 요동

압력 요동의 진동수는 층내의 축방향 또는 반경방향의 약 10여 곳에서 측정된 결과는 같은 실험조건에서 일정한 값을 가짐을 알 수 있었다. 이는 층내의 압력

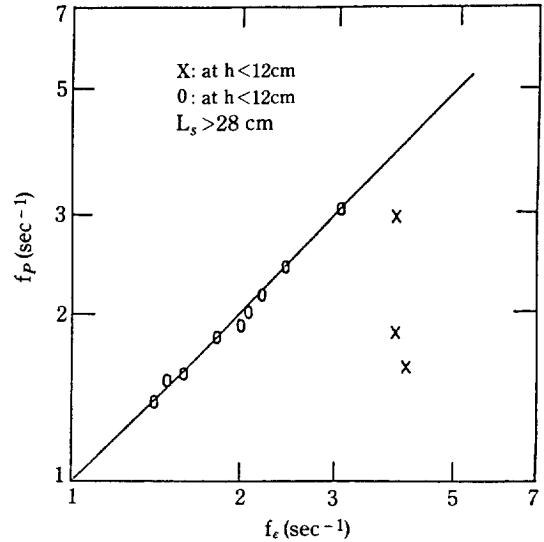


Fig. 9. A comparison of the frequency between porosity fluctuations and pressure fluctuations.

요동은 층의 상부에서 통과하여 표면에서 터지는 기포의 영향을 전체적으로 받는 것을 알 수가 있다. 그러나 앞에서 밝힌대로 공극의 요동은 기포의 빈도수에 의해 달라지므로 결과적으로 층내의 높이가 낮은 곳에서는 압력 요동의 진동수는 표면에서 터지는 기포의 영향을 받기 때문에 공극 요동의 진동수 보다 낮은 값을 갖게 됨을 Fig. 9에서 볼 수 있다.

또한 압력 요동의 진폭은 기포의 크기에 따라 증가하는 현상을 보였다. 이를 Fig. 10에 기포의 크기와 압력 요동의 진폭을 압력 요동의 평균값으로 나누어 준 값을 log-log 그래프에 도식한 결과 다음과 같은 관계가 있음을 알 수 있었다.

$$\frac{2P_{AMP}}{P_{AVG}} = 0.3 (D_e)^{0.75} \quad (11)$$

#### 4-5. 입자의 특성에 대한 주진동수의 변화

앞에서 층의 초기 높이와 젯트의 유속에 따른 주진동수의 변화를 살펴보았다. 이론식은 유동층 입자 크기와 입자 밀도에 따른 주진동수의 경향을 역시 예측할 수 있었다. 추가적으로 이를 Fig. 11에 도식하였다. 입자의 특성인 입자의 밀도와 입자의 크기를 곱한 값의 증가에 따라 주진동수는 증가하게 되며 실험결과에서 얻을 수 있었던 두개의 입자 크기 만을 이론식과 함께 도식하였다. 큰 입자의 경우 주진동수가 큰 것을 볼 수가 있었다.



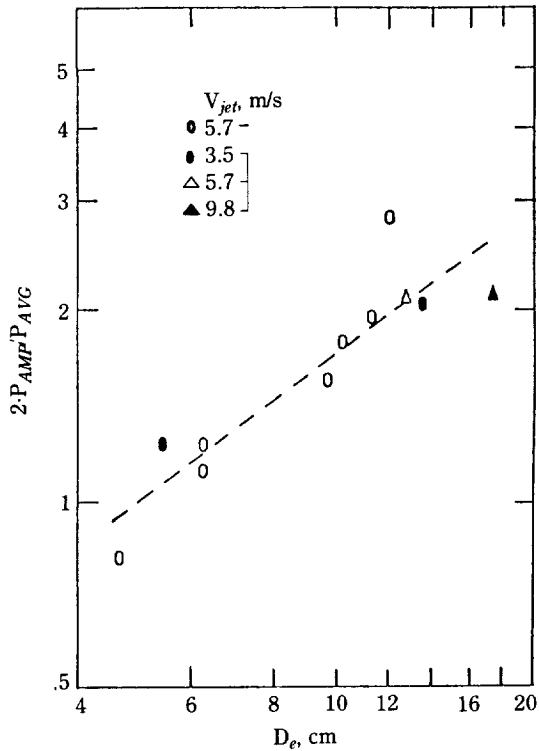


Fig. 10. Ratio of pressure amplitude to average pressure in pressure fluctuations vs. bubble size.

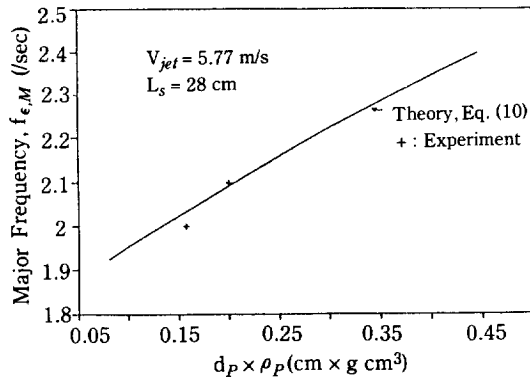


Fig. 11. The effect of particle properties to the major frequency of porosity fluctuations.

## 5. 결 론

기포 발생 및 유동층내의 혼합 효과(mixing effect)를 높이기 위해 설치된 단일 젯트 흐름을 가진 유동상에서 젯트에 의해 발생된 기포로 인한 층내의 요동은

유동층의 주요 특성이 되므로 이를 각 변수의 이론식으로 표시하여 보았다. 실험과 이론식의 비교로부터 다음과 같은 결론을 지을 수가 있다.

1. 방사선원으로부터 방사되는 감마선은 통과한 거리와 통과한 매질의 밀도와 감마선 감쇄계수에 따라 강도가 감쇄한다는 Beer's Law를 이용한 밀도측정기에 의해 유동층내의 공극의 요동을 측정하였다. 측정된 공극의 요동과 압력 요동은 FFT를 이용하여 power spectrum이 계산되는 power spectrum analyzer에 입력하여 가장 큰 spectrum을 갖는 peak에서의 진동수를 찾아 주기성을 알아내었다.

2. 공극의 요동은 기포의 요동과 일치하였으며 층의 상부와 표면에서 터지는 기포의 빈도를 주진동수로 정의하여 이 값은 층내의 압력요동의 진동수와 일치함을 보았고 이 주진동수를 기포의 발생 후 크기의 변화와 이동 거리로부터 주진동수는 층의 초기 높이, 젯트의 유속, 입자의 특성치의 함수임을 알 수 있었고 다음과 같이 유도된 이론식은 실험결과와 잘 일치하였다.

$$f_{\epsilon, M} = 0.238 \frac{\sqrt{g}}{\rho_p d_p L_{mf}} \{ (D_{Bo} + 1.4 \rho_p d_p L_{mf})^{\frac{3}{2}} - D_{Bo}^{\frac{3}{2}} \}$$

3. 압력 요동과 공극 요동의 진동수는 층내의 낮은 곳에서는 일치하지 않으며 압력 요동의 진폭은 기포의 크기에 따라 증가하였으며 다음 식으로 표현되었다.

$$\frac{2P_{AMP}}{P_{AVG}} = 0.3 (D_e)^{0.75}$$

## NOMENCLATURE

- $D_{Bo}$  : initial bubble diameter [m]
- $D_e$  : equivalent bubble diameter [m]
- $d_p$  : particle diameter [m]
- $f_p$  : frequency of pressure fluctuations [ $s^{-1}$ ]
- $f_{\epsilon}$  : frequency of porosity fluctuations [ $s^{-1}$ ]
- $f_{\epsilon, M}$  : major frequency of porosity fluctuations [ $s^{-1}$ ]
- $g$  : gravity constant [ $ms^{-2}$ ]
- $h$  : height above distributor [m]
- $L_{mf}$  : bed height at minimum fluidization [m]
- $L_s$  : static bed height [m]
- $k$  : coefficient in the correlation of bubble rise velocity with bubble diameter [-]
- $P_{AMP}$  : amplitude of pressure fluctuations [Pa]
- $P_{AVG}$  : average of pressure fluctuations [Pa]
- $Q$  : gas flow rate of jet [ $m^3 s^{-1}$ ]
- $U_B$  : bubble rise velocity [ $ms^{-1}$ ]
- $\bar{U}_B$  : averaged bubble rise velocity through a bed [ $ms^{-1}$ ]
- $U_{mf}$  : minimum fluidization velocity [ $ms^{-1}$ ]



- $V_B$  : bubble volume when total jet gas becomes a bubble [ $m^3$ ]  
 $V_{jet}$  : jet velocity [ $ms^{-1}$ ]  
 $V_L$  : leakage during formation of a bubble in a two-dimensional fluidized bed [ $m^3s^{-1}$ ]  
 $V_o$  : initial bubble volume [ $m^3s^{-1}$ ]

## Greek Letters

- $\epsilon$  : porosity [-]  
 $\epsilon_{AMP}$  : amplitude of porosity fluctuations [-]  
 $\epsilon_p$  : porosity at a static bed [-]  
 $\rho_p$  : particle density [ $kg\ m^{-3}$ ]  
 $\phi_p$  : particle sphericity [-]  
 $\delta$  : thickness to two-dimensional bed [m]

## REFERENCES

- Valkianinen, M.: IAEA-R-2358-F, International Atomic Energy Agency (1980).
- Johnson, A.J., Meyer, F.G., Anderson, D.L., Bell, B.A., and Feng, P.K.: RFP-2945, Rockwell International (1980).
- Bierbaum, P. and Miullo, N.J.: "Lecture Notes: Incineration of Low & Mixed Level Wastes: 1987", pp. A1-A17 (1987).
- Briens, C., Bergougnou, M.A., and Baker, C.G.J.: "Fluidization" (Eds.: Grace, J.R. and Matsen, J.M.), Plenum Press, NY and London, 413 (1980).
- Fan, L.T., Ho, T.-H., Hiraoka, S., and Walawender, W.P.: *AIChE J.*, **27**, 380 (1981).
- Lirag, R.C. and Littman, H.: *AIChE Symposium Series*, **67**(116), 11 (1971).
- Verloop, J. and Heertjes, P.M.: *Chem. Eng. Sci.* **29**, 1035 (1974).
- Kang, W.K., Sutherland, J.P., and Osberg, G.L.: *Ind. Eng. Chem. Fundum.*, **6**, 499 (1967).
- Winter, O.: *AIChE J.*, **14**, 426 (1968).
- Sadasivan, N., Barreteau, D., and Laguarie, C.: *Powder Tech.*, **26**, 67 (1980).
- Baumgarten, P.K. and Pigford, R.L.: *AIChE J.*, **6**, 115 (1960).
- Ettehadieh, B.: Ph.D. Dissertation, Illinois Institute of Technology, Chicago, Illinois, USA (1982).
- Gidaspow, D., Lin, C., and Seo, Y.C.: *Ind. Eng. Chem. Fundum.*, **22**, 187 (1983).
- Davidson, J.F. and Harrison, D.: "Fluidized Particles", Cambridge Univ. Press, NY (1963).
- Geldart, D.: *Powder Tech.*, **7**, 285 (1973).
- Clift, R. and Grace, J.R.: "Fluidization" 2nd ed. (Eds.: Davidson, J.F. and Harrison, D.), Academic Press, pp. 80 (1985).
- Gidaspow, D., Seo, Y.C., and Ettehadieh, B.: *Chem. Eng. Commun.*, **22**, 253 (1983).
- Kato, K. and Wen, C.Y.: *Chem. Eng. Sci.*, **24**, 351 (1969).
- Werther, J.: "Fluidization Technology", Vol. 1, Hemisphere Pub., Washington, p. 215 (1978).
- Harrison, D. and Leung, L.S.: *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, **38**, 185 (1961).