

## 유동층내의 기포거동에 대한 연구

김 용 섭\*

### A Study on the Behavior of Bubbles in Fluidized Bed

Y. S. Kim

**Key words** : Fluidized bed(유동층), Bubble behavior(기포거동), Bubble size(기포크기), Bubble rising velocity(기포상승속도), Pressure fluctuation(압력변화)

#### Abstract

In the present paper, the behavior of bubbles in a fluidized bed has been investigated experimentally. The bubble size, distribution of bubble, bubble rising velocity and pressure fluctuation in the fluidized bed are obtained at different air velocity. The results are discussed and compared to study the effect of air velocity on the behavior of a bubbles in fluidized bed.

#### 1. 서 론

최근 환경오염에 대한 규제가 강화되면서 산업 현장에서 발생한 폐기물뿐만 아니라 선박에서 발생한 폐기물의 처리에 관하여 그 처리방법과 비용이 큰 문제가 되고 있다. 선박에서 나오는 폐유처럼 연소가 가능한 폐기물은 소각에 의한 처리방법이 주로 이용되어 왔다. 소각방법으로는 주로 화격자식 소각로가 이용되어 왔는데, 최근에는 화격자식보다 낮은 온도에서 연소가 가능하여 질소화합물의 발생량이 적고 연소효율이 높아서 발열량이 적은 폐기물도 연소시키기 쉬운 유동층식 소각로에 대한 관심이 점점 높아지고 있다.

유동층식 소각로의 연소효율에 큰 영향을 주는 혼합특성은 유동층내에서 발생한 기포의 크기와

발생빈도 그리고 기포의 분포상태와 상승속도등에 의하여 큰 영향을 받지만 아직 이러한 기포거동에 대한 연구가 충분하게 수행되지 못한 실정이다. 그 이유는 유동층에서 발생한 기포가 상승하면서 중력으로 서로 이합집산을 하면서 크기와 개수 변화를 거듭하다가 유동층 상부표면에서 터지기까지의 과정을 정확하게 계측할 수 있는 방법이 없기 때문이다.

기포거동에 대한 지금까지의 연구는 Cheremisinoff<sup>1)</sup>, Rowe<sup>2)</sup>처럼 X-레이를 이용한 것이 가장 일반적인 방법이었고, Clark와 Atkinson<sup>3)</sup>등은 2개의 백금전극을 일정한 간격으로 유동층에 설치하여 기포내부 공기와 유동층 물질의 저항의 차를 측정하여 기포거동을 실험적으로 연구하였고, Boenest<sup>4)</sup>등은 전기적인 임피던스변화를 측정하

\* 정회원, 홍익대학교

여 유동층내의 유동현상을 계측할 수 있는 프로우브를 개발하였다.

Sltnal<sup>6)</sup>는 노의 내부에 수평관이 설치되어 있는 경우에 유동층에서의 혼합특성을 구하였다.

이들의 연구를 살펴보면 유동층내의 임의의 국부적인 지점에서 상태량을 측정할 것이므로 유동층내의 전체적인 기포의 거동을 분석하기에는 미흡한 점이 많았다. 반면에 Werther<sup>6,7)</sup>는 이론해석을 통하여 유동층내의 기포 크기 및 분포를 구하였으나 실제 유동층내의 기포거동을 분석하기에는 실제현상과의 차이와 해석의 한계등으로 인한 문제점들을 완전히 해결하지는 못하였다.

따라서 본 연구에서는 유동층내의 기포거동을 연구하기 위하여 유동층식 소각로의 모형을 아크릴판으로 제작하여 상온상태에서 실험하였다. 물론 노내에서 연소가 되고있는 상태에서 실험이 이루어져야 보다 정확한 자료를 구할 수 있으나 850도 정도 이상에서 견디는 내열유리를 이용하여 전체적인 실험모형을 제작하기에는 비용과 기술상의 문제가 따르고, 모형의 일부만을 내열유리로 관찰용 창을 만드는 방법을 고려해 보았지만 국부적인 관찰만이 가능하며 또 고온에서 계측의 문제점등을 고려하여 아크릴모형을 이용한 상온 실험방법을 택하였다.

본 연구는 유동층내의 기포거동을 연구하기 위하여 유동층으로 공급되는 공기유속을 0.2m/sec에서 0.69m/sec까지 변화시키고 이 변화가 기포의 크기와 분포상태 및 기포상승속도 그리고 유동층내에서 압력변화에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 기포거동을 연구하기 위하여 사용된 실험장치의 개요를 나타낸 것인데, 기포거동 관찰부, 송풍기, 계측기 그리고 자료회독과 분석에 사용된 컴퓨터로 구성되어 있다.

관측용 단면을 비롯한 실험장치는 관찰과 촬영에 편리하도록 두께 10mm의 아크릴판으로 제작

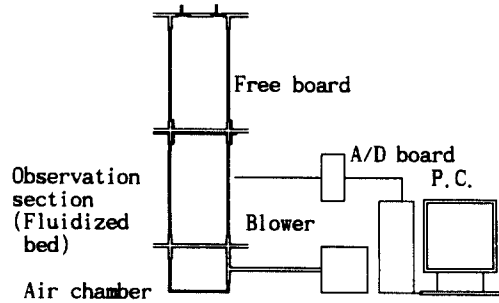


Fig. 1 View of experimental apparatus

하였고 각 이음부는 두께 50mm의 아크릴판으로 플랜지를 만들어 볼트를 이용하여 연결하였다. 유동층의 크기는 가로 세로가 400mm인데, 그 아래 부분에 연결된 공기실과의 사이에 산기장치가 설치되어 있다.

산기장치는 내경이 10mm, 높이가 80mm이고, 두께가 5mm인 청동재 노즐에 내경 2.2mm의 구멍을 8 개씩 15도 경사를 갖도록 뚫어 실험중 모래가 유입되지 않도록 하였는데, 이러한 노즐 48 개를 두께 10mm의 두랄뉴민판에 고정시켜서 만든 Multi-Tuyer 형이다. 유동층부와 free board부의 측면에는 내부의 압력변화를 계측하기 위한 내경 10mm의 구멍이 50mm 간격으로 뚫려 있는데, 이 곳에 차압변환계의 감지부를 설치하여 압력변화를 측정하여 A/D 컨버터가 내장된 컴퓨터에 저장하였다. 공급전원의 주파수를 조절하여 공기유량을 조절하도록 되어있는 송풍에 의하여 공급된 공기는 유량계를 통과하면서 유량이 계측되고 산기장치를 빠른 속도로 통과하면서 유동층 물질로 채워놓은 모래를 유동화시키고 공탑부를 통과하여 대기중으로 방출된다. 또 송풍기 출구에 열전대를 설치하여 공급공기의 온도를 감지하여 컴퓨터에 저장하도록 하였다.

### 2.2 실험방법

송풍기를 작동시켜 유량계를 이용하여 소정유량의 공기가 공급되도록 공급전원의 주파수를 조절하고 컴퓨터 모니터상에 나타난 압력변화의 폭이 일정해질 때까지 운전을 계속한 후 정상상태가 되면 이 때의 유량과 압력변화량 및 온도변화량을 컴퓨터에 저장하고 동시에 유동층부에서 일어나

는 각종 현상을 비디오 카메라로 촬영하여 이것을 컴퓨터와 연결하여 영상처리 장치를 이용하여 기포거동에 관한 자료를 분석한다. 실험조건은 모래층의 높이를 500mm로 하고 공급공기의 공급속도를 0.28m/sec에서 0.7m/sec까지로 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

유동층으로 공급되는 공기량이 점점 증가하면 정지상태로 있던 유동층물질 즉 모래가 차츰 움직이기 시작하고, 공기량이 더욱 증가하여 모래입자 주위를 통과하는 공기의 항력과 모래입자의 자중간에 균형이 이루어지면, 지금까지 유동층내에서 공기유량의 증가 즉 유속의 증가에 따라 거의 비례적으로 발생하던 압력강하는 더이상 일어나지 않고 유속이 증가하여도 압력은 일정한 상태를 유지하게 되는데, 이 상태를 최소유동화라고 한다. 공급공기의 유량을 계속 증가시키면 유동층 내에서 기포가 발생하여 상승하는데, 기포가 상승할 때 기포 아래부분의 후류에 의한 영향으로 모래가 이에 휩쓸려 기포와 함께 상승하다가 유동층 상부표면에서 기포가 터지면 기체는 공담부를 통하여 외부로 빠져나가고 모래는 유동층 표면으로 떨어져 쌓이는데, 이러한 모래의 이동으로 유동층내로 투입된 연료의 건조 및 연소가 촉진되기 때문에 기포거동은 유동층식 소각로의 성능에 크게 영향을 미치는 매우 중요한 요소이다.

본 연구에서는 기포거동을 비디오 카메라를 이용하여 촬영하고 이것을 컴퓨터에 설치한 영상처리 장비를 이용하여 분석함으로써 기포의 크기 및 분포상태 상승속도 그리고 기포발생율을 구하고 차압변환기를 이용하여 기포유동층내에서의 압력변화를 등을 구했다.

Fig. 2는 산기장치로부터 50mm 간격으로 유동층 상부표면인 500mm까지 사이에 대한 기포 크기 및 그 분포상태를 나타낸 것인데, 유속을 최소 유동화가 발생한 0.48m/sec부터 0.69m/sec까지 변화시켰다.

이것을 살펴보면 같은 유속에 대해서는 산기장치로부터 위치가 높아질수록 기포크기가 크고, 같은 위치에서는 공기유속이 빠를수록 기포가 큰 것

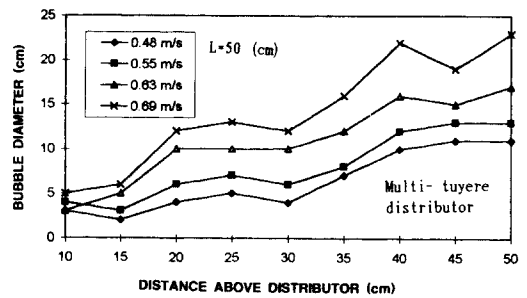


Fig. 2 Bubble size and distribution for distance from distributor with variation of air flowing velocity

을 알 수 있다. 이러한 현상은 기포가 유동층하부 산기장치 부근에서 발생하여 상승하는 과정에서 주위의 기포와 서로 합쳐지기 때문이다. 기포가 합쳐지는 현상은 약간의 차이는 있지만 대부분 층의 하부에서는 서로 수직방향에 있는 것끼리 합쳐지고 층의 상부에서는 서로 수평으로 있는 것끼리 합쳐진다. 수직방향의 합체는 위에서 앞서가는 기포의 후류속으로 아래쪽의 기포가 빨려 들어가서 일어나는 경우와 빠르게 상승하고 있는 큰 기포 속으로 주위의 작은 기포가 흡수됨으로써 일어나는 두 가지가 있다<sup>8)</sup>.

기포의 크기가 가장 작은 것은 공기유속이 가장 느린 0.48m/sec이며 산기장치 바로 근처인 150mm 지점인 경우로서 20mm이고 가장 큰 것은 공기유속이 가장 빠른 0.69m/sec이고 유동층 상부표면 가까운 곳에서의 경우인데, 약 200mm 정도이다. 대체로 산기장치로부터 유동층 중간지점까지 상승하는 동안 크기 증가가 심하게 일어나는 것으로 나타나 있는데, 이 영역내에서 많은 기포들이 서로 합쳐지는 것으로 볼 수 있다. 그리고 중간위치에서는 대개 기포의 크기가 비슷한 것으로 나타나고 있으므로 이곳에서는 기포의 이합집산이 잠시 감소하거나 거의 일어나지 않다가 상부표면 가까운 영역에서 다시 기포간의 합쳐지는 현상이 활발해짐을 알 수 있다.

Fig. 3은 공급공기 유속을 변화시키면서 산기장치로부터 높이상승에 따른 기포수의 변화를 나타낸 것이다.

이것을 살펴보면 같은 공기 유속에 대해서는 산기장치로부터 위치가 높아질수록 기포의 수가 적

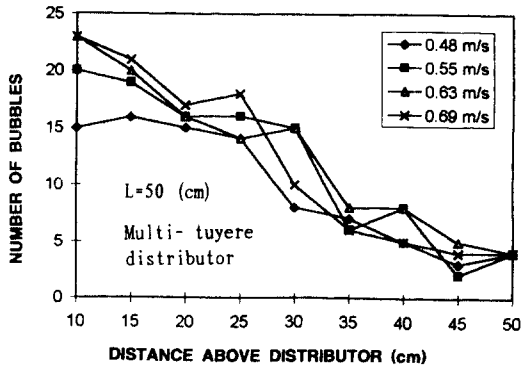


Fig. 3 Number of bubbles for distance from distributor with a variation of air flowing velocity

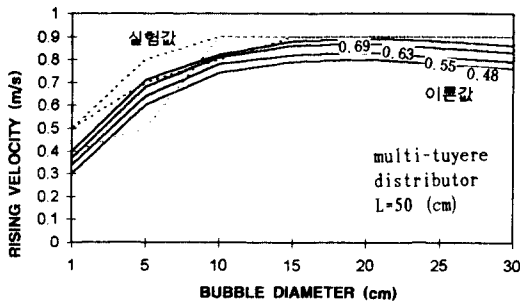


Fig. 4 Bubble rising velocity as a Function of bubble diameter

고, 같은 위치에서는 공기유속이 느릴수록 즉 공급 공기량이 적을수록 기포수가 적음을 알 수 있다.

이러한 현상은 앞에서 Fig. 2의 고찰결과에서 알 수 있었던 것처럼 산기장치 근처에서 발생한 기포가 유동층내에서 상승하면서 서로 합쳐졌다가 분리되고 다시 합쳐지기 때문이다.

기포수를 구체적으로 살펴보면 그 수가 가장 작은 것은 유속이 0.55m/sec이고 산기장치로부터의 높이가 450mm인 경우로서 2개이며, 가장 그 수가 많은 것은 유속이 0.69m/sec로서 가장 빠르고, 산기장치로부터 가장 가까운 100mm에서 22개 정도임을 알 수 있다. 또한 유동층 중간위치에서 기포수의 변화가 별로 없는 것은 앞서서도 알 수 있었던 것처럼 이 곳에서는 기포의 이합집산현상이 다소 감소하였다가 유동층 상부표면 근처에서 다시 활발한 이합집산현상이 일어남을 알 수 있다.

Fig. 4는 기포 크기변화에 따른 상승속도의 변화를 공급공기 유속별로 나타낸 것이다. 점선은 실험 결과이고 실선은 벽면의 영향을 고려한 Wallis<sup>9)</sup>의

이론식을 이용하여 구한 것이다. 이것을 살펴보면 실험결과치가 이론결과치보다 약간 크게 나타났고, 기포의 크기가 클수록 상승속도가 빨라지다가 일정속도가 되면 기포의 크기가 증가하더라도 더 이상 상승속도가 증가하지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 5, 6, 7, 8은 유동층내의 압력변화를 알아보기 위하여 가로축에는 정해진 시간내의 압력강하치를 평균압력으로 나눈 값이고, 세로축은 확률밀

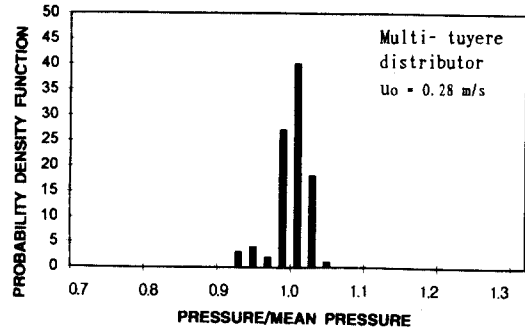


Fig. 5 Probability density function( $u=0.28\text{m/sec}$ )

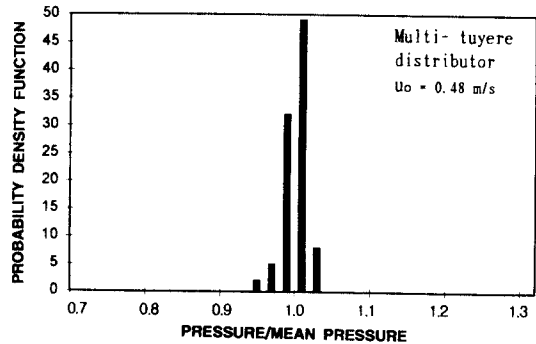


Fig. 6 Probability density function( $u=0.48\text{m/sec}$ )

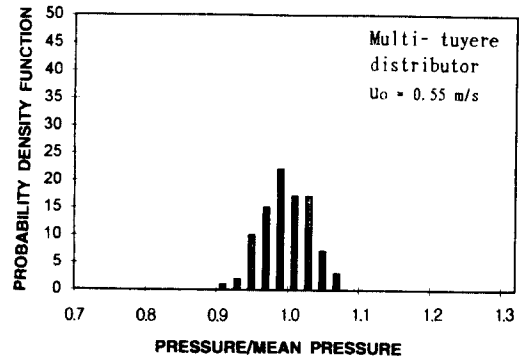


Fig. 7 Probability density function( $u=0.55\text{m/sec}$ )

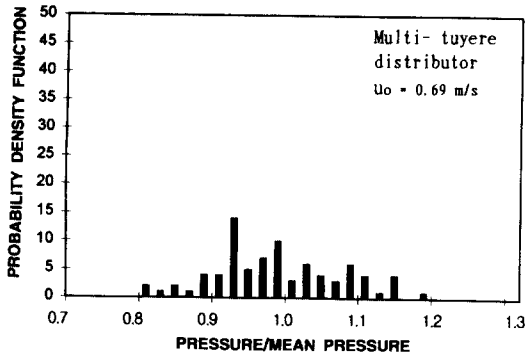


Fig.8 Probability density function( $u=0.69\text{m/sec}$ )

도함수를 나타낸 것이다. 유동층내의 압력에 대한 자료는 유동층내에 차압변환기 감지기를 설치하여 이곳과 산기장치 아래에 있는 공기실과의 압력을 감지하여 차압변환기를 거치는 동안 두곳의 압력차가 구해지고 단말기판(*terminal board*)을 거쳐서 A/D 컨버터를 통하여 컴퓨터에 저장된 자료를 분석한 것이다.

이것을 살펴보면 유동층내로 공급되는 공기량이 증가할수록 유동층내의 압력 변화가 심함을 알 수 있다. 이러한 현상은 기포가 발생하기 시작할 무렵인 유속  $0.55\text{m/sec}$  이상에서 더욱 두드러지게 나타남을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

유동층내에서의 기포거동에 대한 실험을 통한 연구결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 산기장치 부근에서 발생한 기포는 상승하면서 서로 합쳐지거나 분열되거나 하는데, 이러한 현상은 산기장치 가까운 영역과 유동층 상부표면 가까이서 활발하게 일어난다
2. 유동층내의 기포상승속도는 기포의 크기가

커질수록 증가하나 일정속도에 도달하면 기포크기가 증가하여도 더이상 증가하지 않는다.

3. 유동층내로 공급되는 공기량이 증가할수록 유동층내의 압력변화는 커진다.

#### 참고문헌

- 1) N. P. Cheremisinoff, "Review of Experimental Methods for Studying the Hydrodynamics of Gas - Solid Fluidized Beds". Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 1986., 25, pp. 329 - 351
- 2) P. N. Rowe and B. A. Partridge, Trans. Instn. Chem. Engrs. 1965, 43, T157
- 3) N. N. Clark and C. M. Atkinson, "Amplitude Reduction and Phase Lag in Fluidized - Bed-Pressure Measurement", Chemical Engineering Science, Vol. 43, No. 7, 1988, pp. 1947 - 1557
- 4) G. Boelens F. Liefieber and C. W. J. Van Koppon, "A High Temperature Impedance Probe Local Porosity Measurement", Chemical Engineering Science 1985, Vol.40, No. 3 pp. 365 - 373
- 5) O. Sltal, "Solids Mixikg in a Fluidized Bed with Horizontal Tubes", Ind.Eng. Chem. Process Des. 1981, 20, p. 533 - 538 6
- 6) J. Werther, "Bubbles in Gas Fluidised Beds Part - 1" TRANS.INSTN. CHEM. ENGRS. Vol. 57, 1974 pp. 149 - 159.
- 7) J. Werther, "Bubbles in Gas Fluidised Beds Part - 1"TRANS.INSTN. CHEM. ENGRS. Vol. 57, 1974 pp. 160 - 169.
- 8) J. F.Davidson amd R.Clift "luidization", 2nd Edition, Academic Press New York,1985 p73(
- 9) G. B. Wallis, "One - Dimenal Two - Phase Flow", McGraw - Hill, New York, 1969