

## 유동층에서 기포의 유동특성에 관한 연구

김 용 섭\*  
(96년 4월 27일 접수)

### A Study on the Flow Characteristics of Bubbles in a Fluidized Bed

Yong-Sup Kim\*

**Key Words** : fluidized bed combustion(유동층 연소), incinerator(소각로), bubble rising velocity(기포 상승 속도), bubble size(기포 크기)

#### Abstract

A fluidized bed combustion chamber is widely used to incinerate waste material. The most important factor designing the incinerator is the flow characteristics in a fluidized bed, because combustion efficiency is influenced by the flow characteristics. This paper has investigated the flow characteristics of bubbles in fluidized bed by means of measuring a pressure fluctuation in the fluidized bed. A pressure probe system has used to measure the pressure.

The data concerned with bubble rising velocity, bubble size, distribution of bubbles and frequency of bubble generation or decay are obtained to find the flow characteristics of bubbles in the fluidized bed. The result obtained from this experimental study can be used to design the fuel feeding system of fluidized bed combustion type incinerator. And it is possible to predict the mixing of waste material and fluidizing material.

#### 1. 서 론

최근 새로운 사회적 문제로 대두되고 있는 산업폐기물과 생활쓰레기의 처리방법에는 매립, 소각, 해양투기 그리고 재활용 등의 방법이 있는데, 매립은 그 장소선정에 어려움이 많고 토양과 수질에 대한 오염이 문제시되며, 해양투기는 해양 오염 방지를 위한 관련 법규의 강화로 인하여 할

수 없게 되었으며, 재활용은 부가가치의 감소와 관련 종사자들의 실행에 대한 의지의 부족으로 제대로 실행되지 못하고 있다. 따라서 소각에 의한 폐기물의 처리가 적극 추진되고 있는데, 소각 처리시의 문제점인 대기오염은 최근 발달된 각종 후처리 기술의 적절한 응용과 특히 소각방식의 올바른 선택으로 그 해결이 가능하다. 종래의 화격자식 소각로나 회전식 소각로는 연소온도가 높

\* 정회원 홍익대학교

기 때문에  $NO_x$ 와 다이옥신 등의 유해물질을 많이 배출하였으나, 유동층식 소각로는 저압 온도가 800도씨 정도로 비교적 낮고 노내로 투입된 폐기물이 노내를 순화하고 있는 유동화 물질과 함께 유동층을 순환하다가 연소되므로 연소효율이 높고 특히 수분함유량이 많은 폐기물의 소각에 적합하다. 유동층식 소각로의 연소효율은 유동층 내에서 투입된 폐기물, 즉 연료와 유동화물질과의 혼합상태, 그리고 이들 물질의 유동층 내에서의 체류시간 등에 의하여 결정되는데, 혼합도와 체류시간에 대한 정확한 제어가 매우 어렵기 때문에 이 문제를 해결하기 위해서는 먼저 혼합도와 체류시간에 가장 큰 영향을 미치는 유동층내의 기포 유동화 특성을 파악하여야 하므로 이에 대한 연구가 절실히 요구된다.

이에 대한 연구를 살펴 보면 Geldart<sup>1)</sup>은 X선 촬영을 이용하여 기포 크기를 측정하였고, Row, Everett<sup>2)</sup>도 X선을 이용하여 유동층의 횡단면 촬영에 성공하였다. 이러한 사진촬영법은 2차원 모델에만 적용될 수 밖에 없었기 때문에 단순한 기포의 이합집산에 대한 정보를 얻는다는 충분하였으나 기포의 복잡한 유동특성을 파악하기에는 부족한 점이 많았다. 유동층에 대한 3차원적 측정기술이 Grace<sup>3)</sup>등에 의하여 시도된 이후 많은 연구들<sup>4)~10)</sup>이 유동특성에 대하여 수행되었는데, 이 연구들중 간단히 살펴보면 전위차를 이용한 캐파시턴스 메터(capacitance meter), 빛의 산란을 이용한 광학 센서(optical sensor), 유체의 차압을 이용한 압력 탐침(pressure probe) 등의 계측장치를 사용하여 유동층내의 유동 현상에 대한 실험적 연구들이었는데, 이들은 주로 계측장치와 측정기술의 개발에 관한 것이거나 또는 유동현상을 다루었다고 하여도 유동층내의 국부적인 현상만을 규명하는 정도였기 때문에 층내의 유동특성을 파악하기에는 미흡하였다.

유동층의 유동특성에 대한 연구를 실제 연소가 진행되고 있는 노내에서 수행하기에는 계측 환경, 비용, 센서의 선정에 어려움이 많아 대부분 상온에서의 모형실험으로 이루어 지고 있다.

본 연구는 상온에서의 모형실험을 통하여 운전 조건의 변화에 따른 기포의 크기, 상승속도, 발생

률 등의 거동을 측정하므로써 유동화특성에 대하여 고찰한 것으로 지금까지는 기포상승속도가 최고인 위치가 유동층반경방향으로 외측에서 1/3인 지점으로 알려져 있었으나, 유동층으로 공급되는 공기의 양 즉 유동층내부 공기 평균유속의 변화에 따라 변화함을 알 수 있었는데, 이 결과를 이용하면 유동층내에서 고체혼합도의 예측이 가능하며 또 노의 연료공급장치 설계자료로 활용될 것으로 기대된다.

계측장비로는 시그널 획득 및 해석이 용이하고 유체의 전기적 특성과 그리고 탐침속으로의 유입에 대한 안정성 등을 감안하여 압력탐침을 사용하여 유동층내의 압력을 감지하고 차압변환기와 A/D변환기를 기친 자료를 PC에 저장한 후 통계적 처리방법을 이용하여 정리하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2-1 실험장치

본 상온 유동층 실험에 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같은데 유동층부와 공기공급부, 그리고 계측부로 구성되어 있다. 유동층부는 아래로부터 공기케임버, 유동층 프리보드순으로 구성되어 있고, 공기부는 공기를 공급하는데 사용되는 송풍기와 공기량을 계측하는 유량계로 구성되어 있고, 계측부는 유동층 내의 압력을 계측할 수 있는 압력 탐침과 계측된 압력을 획득할 수 있는 자료획득 및 해석부로 구성되어 있다.

유동층부는 지름 250mm의 아크릴관으로 제작하여 내부의 유동화 과정을 직접 관찰할 수 있도록 하였다. 공기 케임버와 유동층부 사이에 다공판으로 된 분산판을 설치 하였고, 유동층내에서 발생하는 기포의 압력을 측정하기 위하여 공기 탐침을 삽입하기 위한 탭을 분산판으로부터 100mm 간격으로 4개를 설치하였다.

분산판은 지름이 250mm, 두께가 8mm인데, 직경 1.8mm의 구멍 256개가 사각배열로 뚫려 있고, 개공비는 약 1.7%이다.

유동층내의 압력변화를 측정하기 위한 압력탐침 계통은 Dent<sup>11)</sup>의 연구를 참고하여 제작하였는데,

기포거동에 미치는 영향을 최소화하고, 탐침에 의하여 기포가 파괴되지 않는 구조로 하였다.

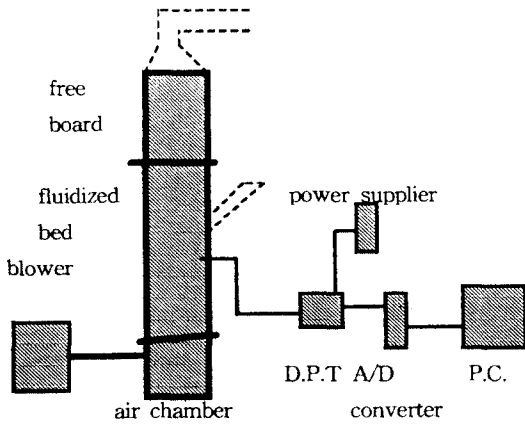


Fig. 1 Diagram of experimental apparatus

유동층내에 위치한 탐침은 유동화 과정 중 고체 입자에 의하여 구멍이 막힐 수 있는데, 이런 현상을 방지하고 안정된 자료를 얻기 위하여 탐침내에 고압의 공기를 공급하여 탐침 끝부분에서 일정한 속도 (3m/s)로 공기가 나올수 있도록 설계하였다. 탐침을 통하여 감지된 압력은 차압변환기에 의해 계측되고 이 아날로그 신호는 A/D 변환기를 거쳐 컴퓨터에 저장된다.

## 2-2 실험 방법

유동층내에 지름이 0.85-1.0mm인 모래를 일정한 양 넣은 후 다음과 같은 순서에 따라 기포거동을 측정하였다.

- 1) 계측부의 차압변환기와 컴퓨터의 정상상태를 검사한다.
- 2) 탐침이 모래에 의하여 막히지 않도록 하기 위해, 압축기를 작동하여 압력이 5atm이 되면 밸브를 열어서 압축공기가 레귤레이터를 거치면서 압력을 2atm으로 떨어뜨린 다음 탐침에 연결된 유량계를 통하여 탐침의 끝부분에서 항상 3m/sec의 속도로 방출되도록 한다.
- 3) 이때 차압변환기를 통하여 계측된 압력이 0이 아니면 탐침에 연결된 유량계의 유량조절밸브

를 이용하여 차압이 0이 되도록 조절한다.

- 4) 탐침을 측정하고자 하는 유동층내에 고정시킨 다음 송풍기를 작동하여 공기를 공기 캐임버내로 불어 넣어준다.
- 5) 일정시간의 예비운전을 통하여 유동의 정상 상태 여부를 확인한다.
- 6) 유동층내로 유입되는 공기유량을 점점 증가시키면서 각 유속에 대한 기포거동을 측정한다.
- 7) 계측장치에 의하여 측정된 자료는 압력변환기를 통하여 컴퓨터에 전달되어 저장되고 동시에 그래픽처리되므로 모니터를 통하여 실험결과를 확인할 수 있다.

두 개의 탐침을 U자형으로 고정하여 탐침간의 거리 l을 일정하게 하고 이를 유동층내에 설치하면 탐침끝을 모래가 통과할 때는 압력이 높고 기포가 통과할 때는 압력이 낮으므로 컴퓨터에 수록된 자료를 그래픽처리하면 두 탐침을 기포가 지나 가는데 걸린 시간을 자료획득시에 미리 설정한 조건으로부터 알아내어 이 값으로 거리 l을 나누면 기포의 속도를 알 수 있고, 이를 활용하여 기포크기, 발생률 등을 정해진 위치와 실험 조건에 대하여 구할 수 있다.

그리고, 유동층내의 실제압력과 탐침을 통하여 감지되어 관을 거쳐서 차압변환기에 수록된 압력 사이에는 탐침을 통하여 유동층 쪽으로 흐르는 공기유동 그리고 관 내에서의 부차손실 등으로 인한 압력강하가 발생하므로 다음 식(1)을 이용하여 실험된 값을 보정하였다.

$$P_b - P_t = - \frac{128\mu L}{\pi d^4} Q - \rho L \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

여기서  $P_b$ 는 유동층내의 압력을,  $P_t$ 는 차압변환기에 의하여 구해진 압력을,  $L$ 은 탐침 및 관의 길이,  $d$ 는 탐침관의 지름을,  $\mu$ 와  $\rho$ 는 각각 공기의 점성계수와 밀도를,  $v$ 는 관내의 공기 체적을,  $t$ 는 시간을 나타낸다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1 시그널 처리

실험에 의하여 얻어진 결과는 그 자체만으로 기

포의 유동특성을 파악할 수 없다. 압력탐침을 통하여 획득한 유동층내의 압력요동에 대한 데이터는 기포만의 압력변화를 나타내는 것은 아니다. 유동층내에는 유동화 물질인 모래가 높은 밀도로 유동하는 영역과 이 속에서 연속적으로 발생한 기포가 공존하기 때문에 기포와 모래가 번갈아 탐침을 통과하므로 획득된 시그날은 파형과 같이 나타난다.

Werther 와 Molerrus<sup>(1)</sup>는 유동층내의 압력요동에 관한 자료로부터 기포거동을 고찰할 수 있는 방법을 제시하였는데 Fig.2에 그 개요를 나타내었다. 첫 번째 그림은 압력탐침에 의하여 획득된 자료를 그대로 나타낸 것인데 시간의 변화와 더불어 불규칙하게 압력 U(t)가 변하고 있음을 알 수 있다. 두 번째 그림은 표준편차에 의하여 구한 기준값(Ud)로서 초기에 획득한 U(t)를 나누어서 무차원화 한 것이며, 세번째 그림은 Ud 의하여 나누어진 값이 1이하이면 기포가 지나가는 시간이므로 1이하의 값을 나타낸 것이고, 네번째 그림에서 단일탐침을 통과하는 기포의 유동시간을 알 수 있다.

일반적으로 기포가 지나가는 동안의 시간을 나타내는  $t_b$ 와 단일기포의 상승속도  $u_b$ 에 의하여 기포의 크기 l을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$l = v_b \times t_b \quad (2)$$

탐침 2개를 기포상승방향으로 거리 S의 간격으로 설치하고 두 탐침을 기포가 통과하는 시간차를 이용하면 기포상승속도를 다음 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$v_b = S/t_a \quad (3)$$

여기서 S 는 두 탐침사이의 거리이고,  $t_a$ 는 두 탐침을 기포가 지나간 시간 차이다.

그러나 유동층내에서 기포는 단일기포가 연속적으로 발생하여 이동하면서 서로 이합집산을 반복하는데 실험에 의하여 기포상승속도를 측정할 때에는 단일기포를 연속적으로 계속하여 이 결과를 통계적으로 처리하여 구하게 되므로 기포상승속도는 식(4)와 같이 표현되는 평균값으로 취해져야 한다.

$$\bar{v}_b = S/E(t_a) \quad (4)$$

여기서  $\bar{v}_b$ 는 기포평균상승속도,  $E(t_a)$ 는 두 탐침사이의 시간차의 평균을 나타낸다.

기포의 크기를 구하는데 필요한 기포상승에 걸린 시간을 구해야 하는데, 유동층내의 압력요동으로부터 획득한 데이터는 매우 불규칙하므로 이 불규칙한 데이터로부터 일정한 주기성을 가지는 데이터를 구하기 위하여 식(5)로 표현되는 상호상관 함수를 이용하여 기포상승시간을 구했다.

$$R_{x,y}(\tau) = E[ x(t)y(t+\tau) ] = \langle x(t)y(t+\tau) \rangle \\ = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau) dt \quad (5)$$

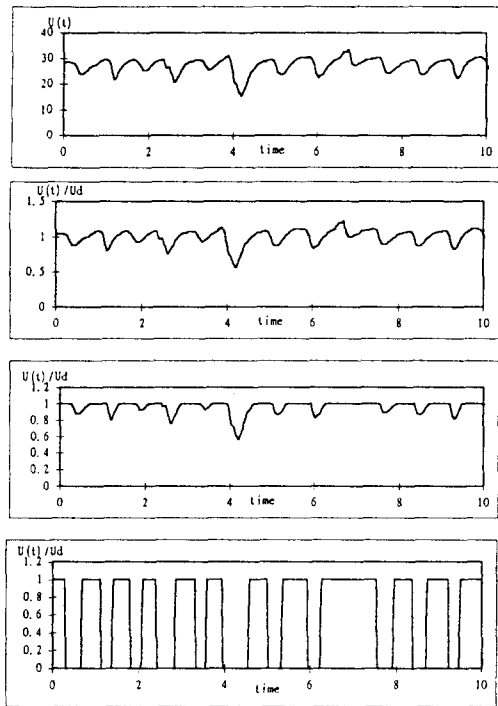


Fig. 2 Process for signal treatment

식 (4)에 의하여 구한 기포평균상승속도를 이용하여 평균기포크기를 다음 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$l_b = \bar{v}_b t_b \quad (6)$$

여기서  $\bar{v}_b$ 는 평균기포상승속도,  $t_b$ 는 기포가 두

탐침을 통과하는 시간차를 나타낸다.

따라서 식(6)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$l_b = \bar{v}_b E(t_b) \quad (7)$$

여기서  $E(t_b)$ 는 기포가 두 탐침을 통과하는 시간차의 평균값이다.

### 3-2 기포의 유동 특성

최소유동화속도 이상의 유동층에서 발생한 기포는 상승속도의 크기 및 분포 그리고 발생빈도 등이 유동화 특성에 크게 영향을 미치지만 아직 이 기포에 대한 발생내력 및 층 내에서의 자세한 거동은 알려져 있지 않다. 기포는 그 후류에 고체입자를 동반하고 유동하기 때문에 기포가 유동층 표면까지 상승하여 파괴된 후 기체는 프리보드로 흘러 나가고 동반하던 고체입자는 층표면에 쌓이므로 기포의 거동은 혼합특성에도 큰 영향을 주고 있다. 따라서 기포가 많을수록 고체의 혼합도가 높아져서 연소효율이 좋아지게 된다. 유동층에서의 기포는 액체 중에서의 기포와 거의 비슷한 모양을 하고 있으나 가장 큰 차이는 액체 중의 기포는 액체와 기포 사이에 막이 있지만 유동층내의 기포는 기포와 고농도의 고체입자 사이에 막이 없어서 이들 양자 사이에 유체의 상호 흐름이 존재하는 것이다. 따라서 이 흐름이 기-고체간의 접촉에 큰 영향을 주고 있다. 기포가 상승시 그 속도는 부력, 중력, 항력 및 표면장력에 의하여 결정된다. 그러나 기포가 상승할 때 받는 항력은 상승과 더불어 속도 및 기포크기 증가에 따른 Reynolds수 증가에 따라 변화하며, 기포 뒤에서 기포를 따라 흐르는 반류는 상승속도에 영향을 받을 뿐만 아니라, 기포의 모양에도 영향을 준다. Davidson 과 Harrison<sup>13)</sup>에 의하면 기포상승 속도는 다음과 같다.

먼저 단일 기포일 경우에는

$$U_{br} = 0.71(gd_b)^{1/2} \quad (8)$$

여기서  $U_{br}$ 는 단일기포상승속도,  $g$ 는 중력가속도,  $d_b$ 는 기포크기이다. 유동층내에 연속적으로 기포가 발생할 경우에는 다음 식 (9)와 같다.

$$U_b = U_c - U_{mf} + U_{br} \quad (9)$$

여기서  $U_b$ 는 연속기포속도,  $U_{mf}$ 는 최서유동화속도,  $U_c$ 는 유동층내부기체의 평균유속이다.

Fig. 3은 식 (8)과 (9)를 이용하여 기포의 크기증가에 따른 기포상승속도의 변화를 구하고 실험결과와 비교한 것을 나타낸 것이다. 실선은 단일기포상승속도를, 점선은 연속기포상승속도를, 마름모는 유동층내부를 흐르는 공기의 평균 유동속도가 0.67m/sec일 때를, 그리고 동그라미는 유동층내부를 흐르는 공기의 평균유동속도가 0.73m/sec일 때의 실험결과를 나타낸 것인데, 이 실험결과는 압력 탐침으로 측정된 압력요동에 대한 자료를 통계적 처리를 위한 관계식 (4)를 이용하여 구한 기포평균상승속도를 나타낸 것이다. 이것을 살펴 보면 실험결과와 이론결과 모두 기포의 크기가 클수록 상승속도가 빠르고 그 증가율도 거의 비슷한 것을 알 수 있는데, 이것은 기포가 커지면 기포주위국부유속의 증가와 기포지름의 증가로 인하여 기포 Re 수가 증가하여 층류유동에서 항력이 감소하였기 때문이다. 그리고 기포크기가 같을 때는 연속적으로 기포가 발생한 경우의 속도가 빠르고, 단일기포 발생의 경우가 느리며, 실험 결과는 대체로 이론결과와 일치하나 평균 공기유속이 빠를수록 기포상승속도가 더 큰 것을 알 수 있다.

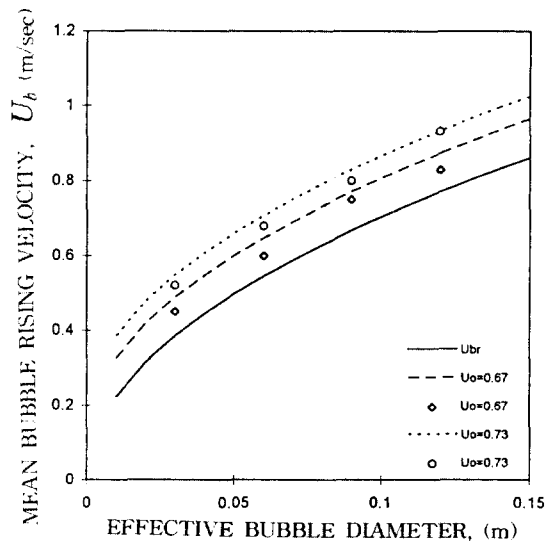


Fig. 3 Bubble mean rising velocity

Fig. 4는 유동층내의 평균기포상승속도분포를 나타낸 것이다. 이때 평균공기유속은 최소유동화속도 0.567m/sec의 1.05배로서 비교적 저속이었다. 기포상승속도는 식 (5)의 상호상관함수를 이용하여 상승에 소요된 평균시간  $[t_d]$  를 구한 다음 식 (4)를 이용하여 구했다.

Fig. 4를 살펴 보면 횡축에는 유동층중심부로부터의 거리를 나타내었고, 종축에는 분산판으로부터 상방향으로의 위치를 매개변수로 한 기포평균상승속도를 표시하였는데, 분산판으로부터 일정한 위치에서 볼 때 중앙에서 벽면에 가까워 질수록 점점 상승속도가 빨라지다가 반경의 약 2/3정도인 10cm 근처에서 최대가 된 후 점점 감소함을 알 수 있는데 이러한 현상은 수직 방향으로 높이가 변화하여도 마찬가지로 현상으로 나타나고 있음을 또한 알 수 있다.

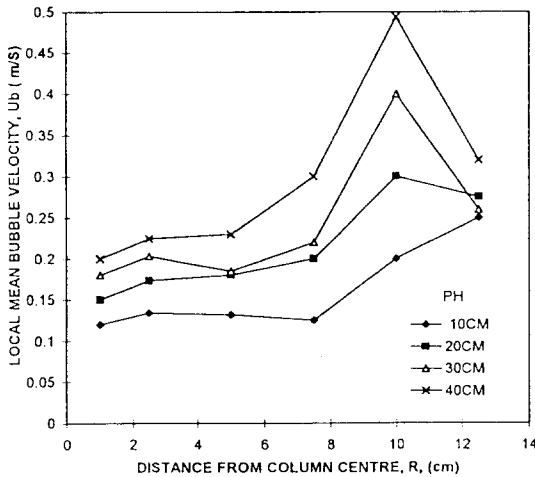


Fig. 4 Distribution of the bubble rising velocity in a fluidized bed.  $\langle U_0 = U_{mf} = 0.567 \text{ m/sec} \rangle$

Fig. 5도 역시 유동층내의 기포상승속도분포를 나타낸 것인데, 평균공기유속이 최소유동화속도의 1.21배로서 앞의 Fig. 4의 경우보다 다소 빠른 상태이다. 이것을 살펴보면 역시 횡축에는 유동층 중심으로부터의 거리를 나타내었고, 종축에는 기포상승속도를 분산판으로부터의 거리를 매개변수로 하여 나타내고 있는데, 최고 상승속도가 되는 위치가

분산판에서 높아질수록 유동층 중심부로 이동해가고 있음을 알 수 있다. 즉 분산판으로부터 40cm 떨어진 곳에서는 중심에서 2cm 벽쪽으로 떨어진 곳에서 0.56m/sec의 속도로 상승했으나, 아래로 내려올수록 점점 최고속도가 되는 위치가 벽쪽으로 옮겨오다가 분산판 위로부터 10cm 떨어진 곳에서는 벽에 가까운 위치인 중심에서 10 cm 떨어진 곳에서 0.35 m/sec로 최고 상승속도가 나타남을 알 수 있다. 이 결과로 부터 노대로 연료를 투입하는 위치는 공기평균유속이 최소유동화속도 정도일 때는 유동층반경방향으로 외측에서 1/3인 지점이 좋지만 공기평균유속이 공급공기량의 증가로 인하여 최소유동화속도 이상으로 증가하게 되면 연료투입 위치는 점점 유동층중심쪽으로 이동하여야하며 최소유동화속도의 1.2배 이상에는 거의 유동층중심부에 연료를 투입하여야 한다.

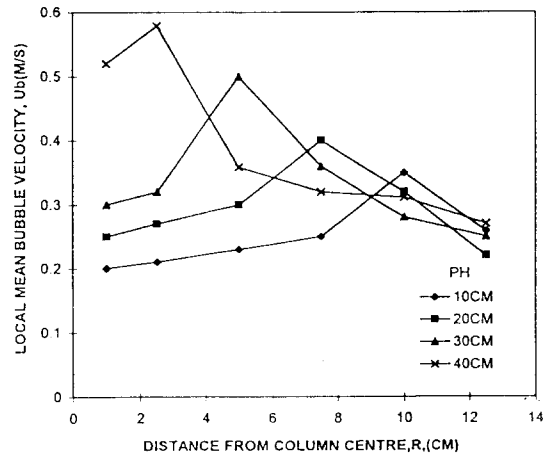


Fig. 5 Distribution of the bubble rising velocity in a fluidized bed.  $\langle U_0 = 0.680 \text{ m/sec} \rangle$

Fig. 6은 유동층내의 기포평균크기분포를 나타낸 것이다. 횡축에는 분산판으로부터의 거리를 나타내었고, 종축에는 유동층의 지름에 대한 반경방향 위치의 비를 매개변수로 한 기포 크기를 나타내었다.

기포크기는 식(7)을 이용하여 구했다. 이것을 자세히 살펴보면 산판에서 위로 갈수록 기포가 커지

고 벽면 쪽으로 갈수록 점점 커지다가 벽면에서 유동층 지름의 10%인 곳에서 크기가 최대 되었다가 벽면에서 조금 작아지는 것을 알 수 있는데, 이러한 현상은 앞의 Fig.4에서 기포상승속도가 가장 빠른 부분과 Fig. 6에서 나타난 기포의 크기가 최대로 되는 위치가 서로 일치하므로 기포가 커지면서 속도도 증가함을 알 수 있다.

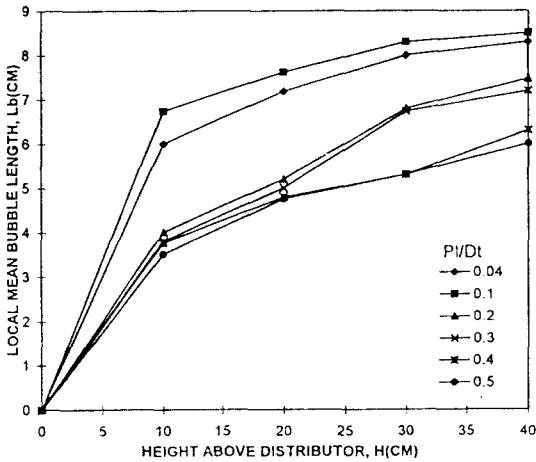


Fig. 6 Variatiun of local mean bubble length

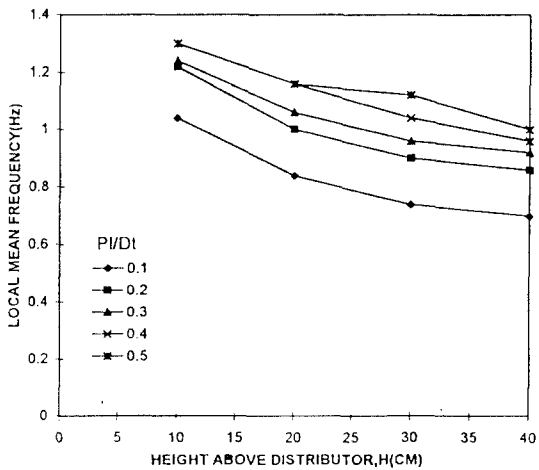


Fig. 7 Variation of the mean bubble generation or decay frequency.

유동층내에서 발생하는 압력요동은 기포의 발생 및 소멸빈도에 의해 크게 좌우되는 것으로 알려져 있는데, Fig. 7은 기포발생 및 소멸빈도를 나타낸 것이다. 횡축은 분산판으로부터의 높이이고, 종축은 유동층지름에 대한 측정위치의 비를 매개변수로 한 기포크기를 나타내고 있다. 이것을 살펴 보면 분산판에서 위로 올라 갈수록 기포수가 작아지고 벽면에 가까울수록 기포수가 작음을 알 수 있는데, 이것으로부터 분산판 바로 위에서 발생한 작은 기포가 상승하면서 서로 기포끼리 합쳐져서 숫자는 감소하고 크기는 커지면서 상승속도 또한 빨라지는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

유동층내에서 기포의 유동특성에 대하여 실험을 통한 연구를 해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 기포평균상승도는 기포크기가 커질수록 빨라진다.
- (2) 기포상승속도는 유동층내부의 평균공기유속이 최소유동화속도 정도에서는 유동층반경 외측에서 30%지점 부근에서 가장 빠르게 나타나지만, 평균 공기유속이 증가하거나 또는 분산판으로부터 거리가 멀어질수록 기포상승속도가 최대가 되는 지점은 유동층중심으로 이동한다.  
따라서 노의 연료공급장치는 유동층내부의 공기평균속도증가에 따라 연료의 낙하위치를 조정할 수 있도록 설계되어야 한다.
- (3) 기포는 분산판의 바로 위에서 발생하여 상승하면서 서로 합쳐져서 크기가 증가하고 상승속도도 빨라진다. 또한 기포의 크기와 상승속도의 관계를 이용하여 기포크기 및 상승속도의 함수로 표현되는 분산모델로부터 노내의 연료와 유동화물질의 혼합특성을 예측하여 유동층식 소각로의 설계자료로 활용될 수 있다.

후 기

이 논문은 1995학년도 홍익대학교 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- 1) Geldart D, "The size and frequency of bubbles in two- and three-dimensional gas-fluidized beds", Power Tech, No4, pp. 41-61, 1970/71
- 2) Row P.N., Everett D.J, "Fluidized bed bubbles viewed by X rays, Part I- Experimental details and the interaction of bubbles with solid surface", Trans. Instn. Chem. Engrs., No50, pp. 42-60, 1972
- 3) Grace J.R., Harrison D., "The behaviour of freely bubbling fluidization beds", Chem. Enging. Sci., No24, pp. 497-509, 1968
- 4) Werther J., Molerus O., "Auto Korrelation und Kreuzkorrelation zur Messung lokaler Blasengrosser und auf Stiegsgeschwindigkeiten in den Gas/Feststoff Fließbeten.", Chemie-Ing. techn., No. 43, pp. 271-281, 1971
- 5) Dent D., Lanauze R.D., Joyce T., Fulford V., Peeler P., "Differential Pressure measurements - Their application to measurement of fluidized bed combustion parameters", CSIPO, pp. 451-456, 1978
- 6) Bendart J.S., Piersol A. G., "Random Data", John Wiley, 1971
- 7) Cooper G. R., Mcgilllem C.D., "Probabilistic Methods of Signals and system Analysis", Holt, Rinehart and Winston Inc, 1871
- 8) Puncochar M., Drahos J., Cermak J., Selucky K., "Evaluation for Minimum Fluidizing Velocity in Gas Fluidized Bed from Pressure Fluctuations", Chem. Eng. Comum. vol35, pp. 81-87, 1985
- 9) Svoboda K., Cermak J., Hartman M., Drahos J., "The Experiment of Bubbling Fluidized Bed", J.AICHE, Vol.30, pp. 513, 1984
- 10) Almstedt A.E., Olsson E., "Measurements of Bubble Behaviour in a Pressureized Fluidized Bed Buring coal, Using capacitance probe" Chal. Univ. Techn, pp. 89-98, 1985
- 11) Werther J., Molerus O., "The local structure of gas fluidized beds-I. A statistically based Measuring system", Int. J. Multiphase Flow, Vol 1, pp. 103-122, 1973
- 12) Clark N., Wang Y-Z., McKenzie E.A., Turton R., "Fluidized bed instrumentation using pressure probes", West Virginia University, pp. 1295-1300
- 13) Davidson J.F., Harrison D., "Fluidized Particles", Cambridge Univ. Press, New York, 1963