

三相 流動層에서의 氣泡特性에 관한 研究

河 昌 植 · 金 相 敦

한국과학원 화학공학과

(접수 1980. 4. 23)

Bubble Characteristics in Three Phase Fluidized Beds

Chang Sik Ha and Sang Done Kim

*Department of Chemical Engineering,
Korea Advanced Institute of Science, Seoul, 131, Korea*

(Received April 23, 1980)

요 약

Electroresistivity probe를 이용하여 2차원 삼상 유동층의 기포(Bubbles)의 물리적 특성을 고찰하였다. 기포의 크기, 상승속도, 빈도에 미치는 유체의 유속, 유동층의 높이의 영향을 검토하였다.

기포의 빈도는 유동층의 높이에 따라 감소하고 기상유속이 클수록 기포의 크기는 넓은 범위의 분포를 가졌다. 기포의 분쇄 mechanism을 알아 보기 위해 큰 입자를 작은 입자층에 혼합하였을 때 기포의 크기가 작아지는 것으로 보아 큰 입자의 존재가 유동층내의 disturbance wave length를 증가시키는 것으로 생각되며 기포의 크기는 입자의 크기에 큰 영향을 받아 입자직경이 클수록 기포의 크기는 작은 것으로 나타났다. 한편, 기포의 크기는 기상유속에 따라 증가하나 액상유속에 대해서는 비교적 무관한 관계를 보이며 기포의 상승속도는 기포의 심한 coalescence로 인하여 Davies and Taylor가 제시한 식이나 기-고체의 Modelling 식을 적용할 수가 없었고 본 실험 범위에서 사용된 기포크기, 유체속도 및 입자크기의 함수의 실험식으로 잘 표시되었다.

Abstract

Measurements of two-dimensional bubble properties in three phase fluidized beds were made using an electroresistivity probe. The effects of fluid flow rates, particle size and the vertical height over the distributor on bubble size, frequency and bubble rising velocity were determined.

The bubble frequency decreased and the frequency distribution widened with the bed height.

In the present systems, the bubble breakup may be attributed to the increased disturbance of wave length which led to more unstable interface of bubbles in the beds of large particles mixed with small particles. The bubble size increased inversely with particle diameter.

Since the Davies and Taylor equation for single bubble and the modelling equation in gas-solid systems were not hold due to bubble coalescence, the empirical correlation for bubble rising velocity was developed as a function of bubble size, fluid velocities and particle sizes.

1. 서 론

고체 입자가 액상과 기상의 병류 흐름에 의해 유동화될 때 이를 삼상유동화(Three-phase Fluidization)라 한다.

삼상 유동층에서의 기포의 특성에 관한 연구는 기-고유동층에서의 기포에 관한 많은 보문에 비해 많이 보고된 것이 없는 형편이다.

Massimilla, et. al.¹⁾ Angelino, et. al.²⁾ Darton and Harrison³⁾ 등이 액-고유동층에 기체를 분산시켰을 때의 기포의 제특성에 관해 연구를 행하였고, Osterfaard⁴⁾에 의해 삼상유동화의 개념이 이론적으로 도입되어 Rigby, et. al.⁵⁾ Kim, et. al.⁶⁾ 등에 의해 계속적인 연구가 수행되어 오고 있다.

기포의 특성을 연구하는 데는 여러 측정법이 제안되어 왔는데, cinephotography,^{6,7)} X-ray camera,⁸⁾ light transmission probe⁹⁾ 및 electroresistivity probe^{5,10)} 등이 그 대표적인 것들이다. 특히 probe를 사용하는 측정법은 다른 방법에 비해 다소의 제한점¹¹⁾을 갖고 있으나, 원리적으로 간편할 뿐 아니라. 취급과 조립이 용이하고 기포의 간접적인 특성측정이 가능한 이점이 있어 근래에 많이 이용되어 왔다.

본 연구에서는 삼상유동층에서의 기포의 특성을 연구하는 데에 Rigby, et. al.⁵⁾이 사용한 바와 유사한 두개의 전극으로 구성된 electroresistivity probe를 사용하였으며, 세가지 크기가 다른 입자를 사용하여 제반 실험조건(Table 1)에 따른 two-dimensional bubble의 물리적 특성을 검토하였다.

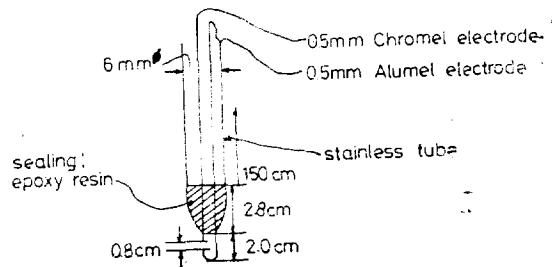
Table 1. Summary of Experimental Conditions

Materials	Glass Beads		
Mean Diameter, mm	1.6	2.9	5.0
Mean Density, gr/cm ³	2.5	2.5	2.5
Minimum Fluidizing Velocity, cm/sec	2.67	3.05	4.30
Total Bed Height, cm	25.0	25.0	20.0
Packed Bed Weight, kg	5.25	5.0	5.0

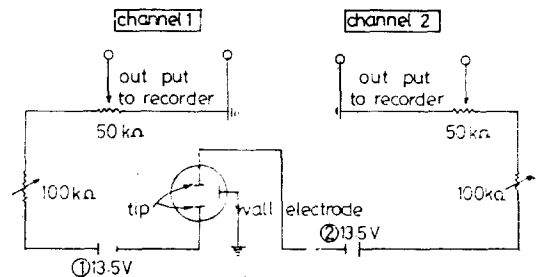
* MIXED PARTICLE SYSTEMS

1.6 mm glass beads + 6.0 mm glass beads
(5, 10, 15Wt.%)

1.6 mm glass beads + 7.85 mm glass beads
(5, 10, 15Wt.%)



a) Dimension of electroresistivity probe



b) Measuring circuit

Fig. 1. The detail of dimension and measuring circuit of electroresistivity probe

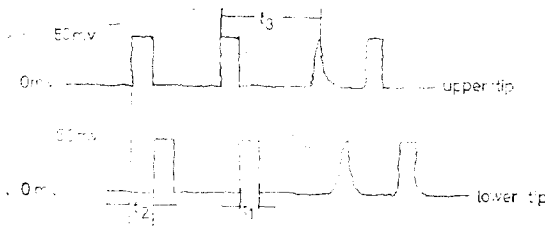


Fig. 2. An illustrative signal

2. Electroresistivity probe

액상 및 고상에 대해 분산상으로 작용하는 기포의 물리적 성질(크기, 빈도, 및 상승속도)을 electroresistivity probe를 사용하여 측정하였다.

Fig. 1-a 은 probe의 제원(dimension)을 나타낸 것으로 수직으로 8 mm의 간격을 둔 chromel-alumel electrode로서 구성되어 있다. 끝부분(약 0.3 mm)의 tip을 제외하고는 epoxy resin에 의해 치밀하게 절연하였으며, 150 cm 길이의 stainless steel tube에 넣어서 사용하르로서 측방향으로 어느 위치에서나 조정이 가능하도록 하였다. wire의 끝부분과 stainless tube 사이의 sealing은 epoxy resin으로 절연시켰다.

Probe는 각 wire와 tip에 대해 두 개의 독립된 회로를 직렬로 연결하였으며, Al-former를 wall electrode로서 사용하였다. Fig. 1-b는 Dense phase를 지나는 bubble이 tip을 통과하면서 저항을 증가시켜 두 tip 사이에 기전력을 강하시킴으로서 나타내는 출력신호를 검토하였다. 출력에 나타나는 기전력의 강하는 dense phase의 경우 0 mV, 기포의 통과시 50 mV가 나타나도록 조정하였다.

출력은 Tektronix 5113 Dual Beam Storage Oscilloscope를 사용하여 측정하였으며, stored display를 통해 주어진 기포의 속도, 빈도 및 상승속도를 결정하였다. Fig. 2는 대표적인 출력신호를 나타낸 것이다.

기포의 상승속도 U_{br} 은 bubble이 두 probe 사이를 통과할 때 경과된 시간 t_2 (sec)로 부터

계산된다.

$$U_{br} = d/t_2 \text{ (cm/sec)} \quad (1)$$

여기서 d 는 probe tip 사이의 간격(8 mm)이다. 기포의 수직길이(vertical bubble length) l 은 U_{br} 에 upper tip에 걸리는 기포의 접촉시간 t_1 의 곱하여 얻는다.

$$l = U_{br} \times t_1 \text{ (cm)} \quad (2)$$

또, 기포의 빈도(f)는 측정시간당 감지된 총 기포수를 의미한다. 임의의 gas 유속에 대해 50~80 개의 기포를 측정하여 평균 U_{br} , l 및 f 를 구하였으며 50 개의 기포를 측정한 경우와 80 개의 기포를 측정한 경우의 평균 값에서의 deviation이 큰 차이를 보이지 않았다.

3. 실험

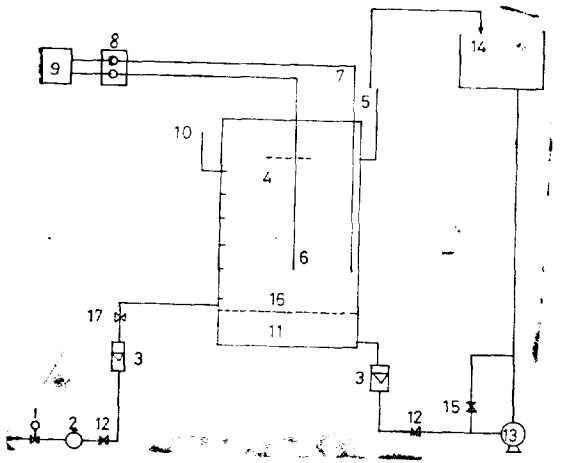
3-1. 실험 장치 및 방법

A. Materials

액상으로서 경수(tap water)를 사용하고, 기상으로는 3.8 kg/cm²의 압축공기를 사용하였다. 삼상유동층에 충전될 입자는 2.5 g/cm³의 밀도를 가진 glass beads로 1.6 mm, 2.92 mm 및 5.0 mm의 크기를 사용하였으며, mixed particle의 효과를 보기 위하여 6 mm 7.85 mm의 glass beads를 아울러 사용하였다. 액상의 유효유속 범위는 0.9~7.7 cm/sec, 기상의 유효유속 범위는 0.8 mm/sec(11 cc/sec)~12 mm/sec(161 cc/sec) 사이에서 실험을 행하였다. 각 실험 조건을 Table 1에 정리하였다.

B. Apparatus

Fig. 3은 본 실험의 장치도이다. 유동층의 주 column은 140 cm 높이×37 cm 넓이×3 cm 두께를 가진 two-dimensional column으로 acryl 지지판을 사용하였다. 액상의 분산을 균일하게 하기 위해 1.8 cm 정삼각형 pitch로서 33개의 직경 5 mm의 hole을 가진 3 mm 두께의 stainless 판을 distributor로서 사용하였으며, 이 distributor 판은 주 column과 Aluminium distributor box(25 cm×41 cm×3 cm) 사이에 위치하여 입자를 지지하고 있다. 액상으로 사용된 물은 15 l 용량의 reservoir로부터 1½ inch carbon steel pipe



- | | |
|---------------------|-----------------------------|
| 1. air regulator | 2. air filter |
| 3. rotameter | 4. fluidized column |
| 5. outlet weir | 6. electroresistivity probe |
| 7. wall electrode | 8. measuring circuit |
| 9. oscilloscope | 10. pressure taps |
| 11. distributor box | 12. glove valve |
| 13. pump | 14. water storage tank |
| 15. by-pass line | 16. distributor |
| 17. check valve | |

Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus

(sch. #40)를 통해 pumping 되어 distributor box로 보내지며, 이 때의 유량은 보정된 rotameter로써 측정하였으며, bypass line의 glove valve로 유량을 조절하였다.

Filter를 사용하여 유분을 없앤 압축공기는 wet test meter로 보정된 rotameter를 통해 column으로 유입되며, gas distributor로는 5 cm 간격으로 7개의 1 mm 직경의 hole을 가진 $\frac{1}{4}$ inch stainless steel tube를 사용하였다. 이 tube는 column의 가로 방향을 따라 water distributor plate 바로 윗 부분에 설치하였다. Column의 뒷 벽에는 중심측에 15.2 cm 간격으로 6개의 pressure tap을 부착하여 각 부분의 정압을 수주(water manometer)로써 측정하였다.²¹⁾

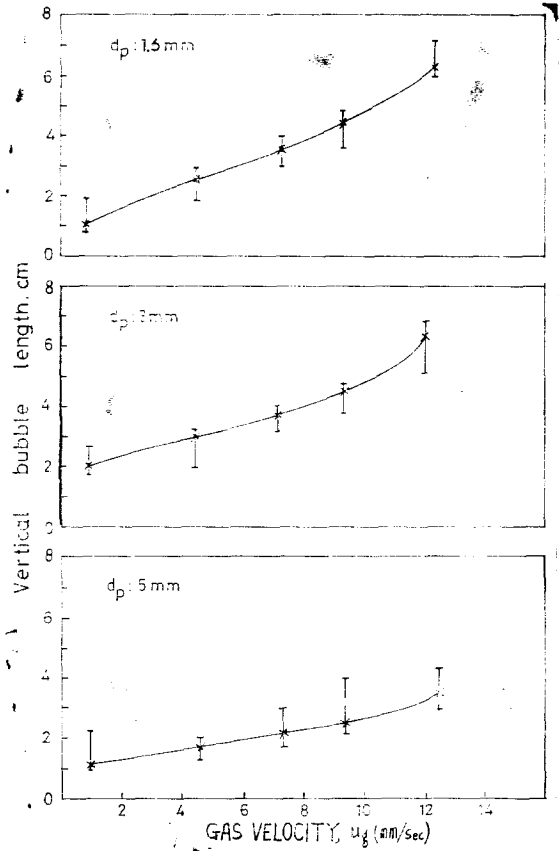


Fig. 4. Effect of Gas Velocity on Bubble Length ($h=20$ cm)

4. 결과 및 고찰

1. 기포의 크기

기포의 크기는 기상유량에 따라 증가하며 주어진 기상유속에서 액상의 유속 증가에 대해서는 Bubble length의 분산이 20 cm bed height에서 1.02~1.52의 좁은 범위에서 변화하므로 액상 유속의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다 (Fig. 4의 Range Bar). 이는 산업적으로 중요성이 있는 높은 기상 유량의 범위 (0~16 cm/sec)에서 실험을 행한 Kim, et. al.⁶⁾의 결과와 일치하며 이에 대해 Page,¹²⁾ Rigby, et. al.⁵⁾ 등은 액상 유속이 높을수록 apparent bed viscosity를 떨어뜨려 이것이 기포의 coalescence rate를

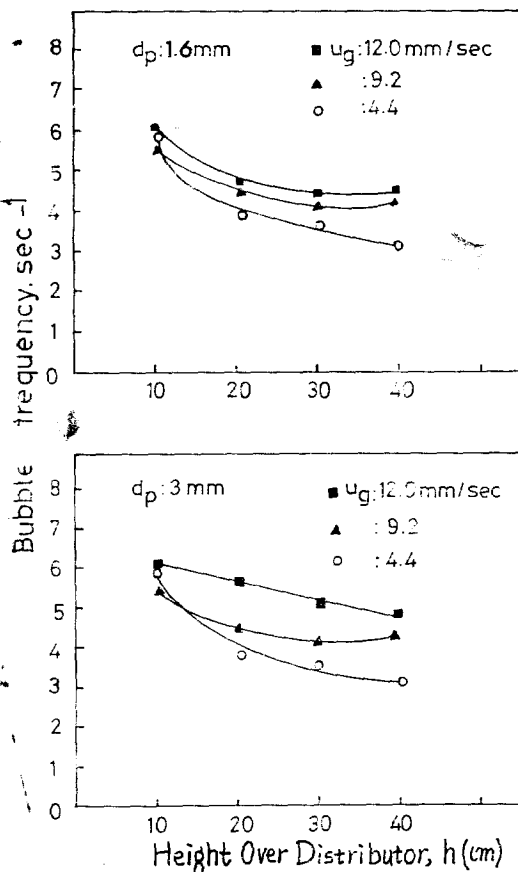


Fig. 5. Bubble Frequency Variations with Height ($X_1 = 5.3 \text{ cm/sec}$)

떨어뜨리므로써 그 결과 기포의 크기가 작아진다고 보고하였다.

각 입자층에 대해 Fig. 4에 그 결과를 도시하였으며, 입자의 크기가 클수록 기포의 크기가 작은 것으로 나타났다. 이는 입자가 작을수록 팽창된 유동층의 voidage가 크기 때문인 것으로 생각된다. 본 실험 범위 내에서 기포의 크기에 대한 실험변수(액상 유속, 기상 유속 및 입자의 직경)들 간의 상관식에서 입자 크기의 의존도가 가장 높은 것으로 나타났다.

$$l = 1.325 U_l^{0.230} U_g^{0.55} d_p^{-0.567} \quad (3)$$

standard error of estimate: 0.326 cm

즉 주어진 유속에서 d_p 가 클수록 층팽창의 높

이는 감소되므로 voidage가 떨어져서 Bubble length는 감소한다고 생각되어진다. 기포의 coalescence 현상은 Massimilla, et. al.¹¹⁾이나 Ostergaard,¹²⁾ Rigby, et. al.¹³⁾ 및 Kim, et. al.⁶⁾ 등의 여러 보문의 결과와도 일치한다. 그러나, distributor로부터 멀리 떨어진 높이에서의 기포의 크기는 특히 기상유속이 높을 때에 coalescence 현상과 더불어 분쇄 (breakup) 현상이 관찰되었다.¹³⁾

2. 기포의 빈도

기포의 빈도는 높이에 따라 감소하는 현상을 보였으며 이를 Fig. 5에 도시하였다. 이 현상은 Rowe and Everett⁶⁾의 결과나 Rigby, et. al.⁵⁾의 결과와도 일치하며 기포의 coalescence rate가 높이에 따라 증가함으로써 빈도는 자연히 감소하는 것으로 생각된다.

Fig. 6은 3 mm particles의 경우 높이 20 cm에서 기상유속의 변화에 대해서 측정한 빈도를 도시한 것으로서 기상 유속과 높이의 변화에 대한 대표적 그림이다. 여기서 알 수 있듯이 기상 유속과 높이의 증가에 따라 빈번한 기포의 coalescence와 분쇄로 인해 보다 더 넓은 범위의 크기 분포를 갖는 것으로 나타났다.

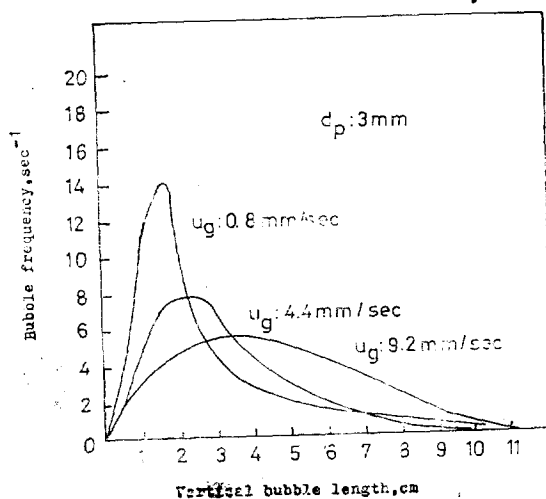


Fig. 6. Typical bubble size distribution for the gas flow rate variations ($V_1 = 5.3 \text{ cm/sec}$)

3. 기포의 상승속도

기포의 상승속도는 기포가 클수록 빠르다. freely bubbling beds에서의 기포의 크기와 상승 속도간의 관계는 single bubble의 경우 적용되는 Davies and Taylor의 식¹³⁾이 성립하지 않는다. 삼상 유동층에서의 기포의 상승속도는 gas-fluidized beds의 경우와 유사한 이론적인 modelling 으로부터

$$U_{br} = (U_i + U_g - U_{mf}) + 0.71 \sqrt{ga} \quad (4)$$

의 식이 성립된다고 가정하였으며, 여기서 마지막 항은 Davies and Taylor의 식에서 얻어지는 single bubble의 상승속도이며 a 는 기포의 상당직경 (cm)으로 본 실험 data의 경우 Rigby, et. al.¹⁵⁾이 보고한 $l/a=1.14$ 의 관계를 이용하여 측정치와 비교하였다.

식(4)에 의해 계산된 이론치와 측정치 간의 standard error of estimate는 14.44로 이론적인 추산과는 크게 벗어남을 알 수 있다. 따라서 본 실험과 같은 삼상 유동층의 freely bubbling beds에서의 기포의 상승속도를 예측하기 위해서는 기포의 빈번한 coalescence와 분쇄로 인하여 새로운 관계식이 필요하다.

기포의 수직길이 l 과 기포의 상승속도 U_{br} 간의 상관 관계를 실험에서 얻은 data로 부터 multiple linear regression analysis를 이용하여 다음과 같은 식을 얻었다.

$$U_{br} = 43.05 U_i^{0.42} U_g^{0.05} U_g^{0.14} d_p^{0.19} \quad (5)$$

standard error of estimate; 0.135 cm/sec

4. 기포의 분쇄

기상 유속이 높을 때에 혹은 유동층의 표면 근처에서 기포의 분쇄현상을 관찰하였다. 기포의 분쇄에 관한 mechanism으로는 3가지를 들 수 있다. 하나는 Stewart and Davidson¹⁴⁾이 제안한 particle "finger" model로서 입자가 기포의 roof를 지나면서 기포를 깎다는 이론이며, 또 하나는 Clift, et. al.¹⁵⁾의 Taylor instability model로서 두 유체간의 계면의 불안정성을 검토한 Taylor의 이론¹⁶⁾를 확장하여 기포의 계면과 유동층의 dense phase 사이의 계면에 관한

유체역학적인 해석을 통해 운동 방정식으로부터 얻은 해(solution)의 특성에 의해 계면의 상부는 항상 불안정하다는 이론이며, 다른 하나는 Lee and Sherrad¹⁷⁾의 vortex shedding model로서 기상과 함께 상승하는 기포의 배면에 액상의 wake가 숨어 있어 이 wake에 의해 발생하는 vorticity가 기포를 깎다는 이론이다.

Henriksen and Ostergaard¹⁸⁾는 각각 6 mm, 1 mm의 glass sphere를 사용한 삼상 유동층 (air-water, air-methanol)에서의 기포의 분쇄에 관한 실험적 연구를 통하여 입자의 직경이 최소

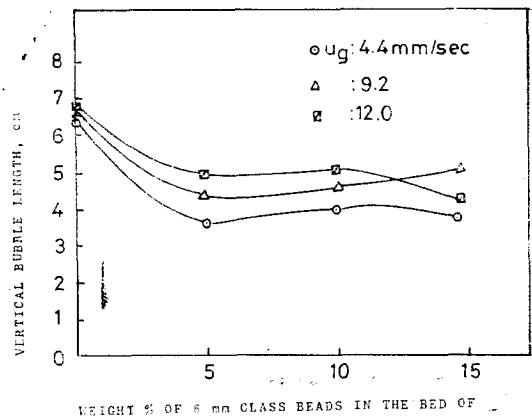


Fig. 7. Effect of Mixed Particles on Bubble Size. ($V_i=5.3$ cm/sec)

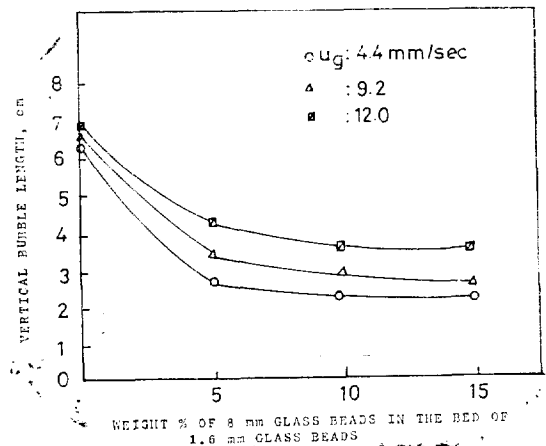


Fig. 8. Effect of Mixed Particles on Bubble Size ($V_i=5.3$ cm/sec)

한 기포의 상승에 따라 형성되는 disturbance wave length, λ_{min} 의 1/2 이상이 되어야 Lee and Sherrad¹⁷⁾가

$$\lambda_{min} = 2\pi \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}} \quad (6)$$

제시한 vortex shedding model이 적용된다고 하였다.

본 실험에서는 기포의 크기에 미치는 입자 크기의 효과를 더욱 정확히 알아보기 위해 큰 기포가 생성되는 1.6 mm glass beads의 유동층에 각각 6, 8 mm의 큰 glass beads를 중량백분을 섞으면서 (5, 10, 15wt.%) 그 영향을 관찰하였다. Fig. 7, 8은 그 결과를 도시한 것이다. 처음 5%를 섞었을 때 기포의 크기는 급격히 감소하였으며, 10%, 15%를 섞었을 때는 그 감소된 크기의 변화가 거의 없었다. 8 mm 입자의 경우가 6 mm 입자를 섞었을 때보다 분쇄 효과가 더 크며 6 mm 입자의 경우 15%일 때 5%를 섞었을 때의 최소 크기보다 조금 큰 크기를 갖는 것 등으로 미루어 볼 때 입자의 기포내의 침투로 인하여 기포가 분쇄된다는 가능성은 배제할 수 없으나 소량의 큰 입자의 존재는 유동층내의 기포와 dense phase 사이의 계면의 disturbance wave length를 증가시켜 기포 계면을 더욱 불안정하게 만들며 이는 입자와 크기비가 클수록 그 현상이 현저할 것으로 생각되어진다. 큰 입자의 중량비가 더할수록 기포 크기의 지속적인 감소가 없이 일정해지는 것으로도 기포내의 입자의 침투 작용에 의한 분쇄효과보다도 계면의 불안정성의 효과가 더 크며, 이 효과는 유동층내의 입자층에 존재하는 voidage discontinuities (공극률의 불균일성)이 최대일 때 더욱 크다는 Page¹²⁾의 이론을 적용할 때 소량의 큰 입자의 존재는 다량의 큰 입자가 혼합될 때에 비해 discontinuities는 더 크다고 볼 수 있겠다.

이 결과는 밀도차를 달리하면서 floating contactor를 만들어 기포를 분쇄하였을 때 유동층에 대한 contactor의 밀도비가 증가할수록 그 분쇄효과는 크나 어느 정도 이상이 되면 별 효과가 없다고 보고한 Keillor and Bergonnou¹⁸⁾의 결과와 유사하다. 이에 대해 Kim and Chang²⁰⁾

은 10 in. 직경의 three-dimensional fluidized beds에서의 floating contactor의 효과를 발표한 본문에서 어느 정도 이상의 분률(%)로 contactor가 혼입되면 그 숫적 증가로 인하여 벽면에서의 channeling이 관찰됨과 동시에 Bubble suppressor로서의 상하 운동이 저해되며 contactor의 구형 특성으로 인해 bubble 표면에서 riding 하는 현상 때문에 그 효과가 작아진다고 보고하였다.

한편, 기포분쇄의 정도를 나타내는 기준치로서 일반적으로 Weber number를 사용한다. Weber number는 기포의 관성에 의한 dissipation energy와 유동층내의 기포의 interfacial energy와의 비로서 정의되는 무차원 수이다.

본 실험 범위 내에서는 1.6 mm particles의 경우 $0 < We < 9$ 의 범위를 가지며 3 mm의 경우 $0 < We < 8$, 5 mm의 경우 $0 < We < 60$ 의 범위를 가져 입자가 클 경우에 기포의 관성에 의한 dissipation energy의 범위가 넓어 기포의 분쇄현상과 더불어 유동층내의 계면의 불안정성이 더 큰 것을 예측할 수 있다.

기포의 coalescence rate는 유동층의 높이에 크게 의존함을 보았다. 기포의 coalescence에 대해서 많은 이론이 제시되어 왔지만, 실험적으로 정확히 추산한 보문은 없는 편이다. 기포가 클수록 그 기포가 차지하는 volume fraction이 큰 것은 물론이고 이미 상승속도와 기포의 크기간의 관계에서 Davies and Taylor식이 성립되지 않는 이유도 기포의 coalescence로 인한 것임을 밝힌 바 있다. Coalescence rate는 액상의 점도에 가장 큰 영향을 받음을 Massimilla, et. al.,¹⁹⁾ Rigby, et. al.⁶⁾ 및 Kim, et. al.⁶⁾ 등은 밝히고 있다.

기포의 coalescence와 분쇄에 관한 보다 정확하고 보편성 있는 실험적 연구가 필요할 것으로 생각된다.

5. 결 론

이상의 결과로부터 얻은 중요한 결론은 다음과 같다.

1. 기포의 크기는 기상 유량에 따라 증가하고 액상 유속에 대해서는 비교적 무관한 것으로 나타났다으며 기포의 빈도는 높이에 따라 감소하였으며 기포의 크기와 빈도 분포는 기상 유량이 클수록 넓은 범위의 분포를 가졌다.

2. 기포의 크기에 미치는 여러 영향들 중에 입자의 크기가 클수록 기포의 크기는 작았다.

3. 작은 입자의 유동층에 큰 입자가 혼합되어 있을때 이는 유동층내의 기포와 과밀상 간의 계면의 disturbance wave length를 증가시켜 기포의 크기를 분해하는 효과를 가지며 이는 입자의 크기차가 클수록 더 뚜렷하였다.

4. 기포의 상승속도와 크기는 기포의 coalescence로 인하여 Davies and Taylor식이 적용되지 않고 액상유속, 기상유속, 및 입자의 크기 등의 여러 실험변수들의 영향과 함께 다음의 실험식으로 표현되었다.

$$U_{br} = 43.05 l^{0.42} U_l^{0.05} U_g^{0.14} d_p^{0.19}$$

Nomenclature

- a equivalent bubble diameter, cm
 d probe spacing distance, cm
 d_p particle diameter, cm
 f bubble frequency, sec⁻¹
 g gravitational acceleration, cm/sec²
 g_c conversion factor, gr cm/dyne sec
 h height over distributor, cm
 l vertical bubble length, cm
 t_1 the width of the pulse from the upper channel, sec
 t_2 the transion time of air bubble between the two tips, sec
 U_{br} bubble rising velocity, cm/sec
 U_g superficial gas velocity, cm/sec
 U_l superficial liquid velocity, cm/sec
 We Weber number, $U_{br}h/g_c\sigma$

Greek letters

- ρ density, gr/cm³
 σ surface tension, dyne/cm
 λ_{min} minimum disturbance wave length, cm

References

- Massimilla, L., Solimando, A., and Spillace, E., Brit. Chem. Eng., **6**(1961), 632.
- Angelino, H., Chazat, C., and Williams, R., Chem. Eng. Sci., **19**(1964), 289.
- Darton, R.C., and Harrison, D., Chem. Eng. Sci., **30**(1975), 581.
- Ostergaard, K., Chem. Eng. Sci., **21**(1966), 470.
- Rigby, G.R., Blockland, G.P., Park, W. H., and Capes, C.E., Chem. Eng. Sci., **25**(1970), 1729.
- Kim, S.D., Baker, C.G.J., and Bergoug-nou, M.A., Chem. Eng. Sci., **32**(1977), 299.
- Lyall, E., Brit. Chem. Eng., **14**(1969), 501.
- Rowe, P.N., and Everett, D.J., Trans. Instn. Chem. Eng., **50**(1972), 42.
- Yasui, G., and Johanson, L.N., A.I.Ch.E. J., **4**(1958), 445.
- Park, W.H., Kang W.K., Capes, C.E., and Osberg, G.L., Chem. Eng. Sci., **24**(1966), 851.
- Dutta, S., and Wen, C.Y., Can. J. Chem. Eng., **57**(1979), 115.
- Page, R., Ph.D. Thesis, Cambridge Univ., U.K., (1966).
- Davidson, J.F., and Harrison, D., "Fluidization," Academic Press, (1971), 751.
- Stewart, P.S.B., and Davidson, J.F., Chem. Eng. Sci., **19**(1964), 319.
- Clift, R., Grace, J.R., and Weber, M.E., Ind. Eng. Chem., Fund., **13**(1974), 45.
- Taylor, G.I., Proc. Roy. Soc., A201, (1950), 192.
- Sherrad, A.I., Ph.D. Thesis, Univ. of Swansea, U.K., (1966).
- Henriksen, H.K., and Ostergaard, K., Chem. Eng. Sci., **29**(1974), 626.
- Keillor, S.A., and Bergoug-nou, M.A., Proc. Int. Fluidization Conf., "Fluidization Technology," Vol. **2**(1976), 95.
- Kim, S.D., and Chang, H.S., J.K.I. Ch.E., **17**(1979), 407.
- Ha, C.S., M.S. Thesis, KAIS, Seoul, Korea, (1980).