

삼상 유동층 내에서의 기포 분쇄 및 수역학적 특성

김 상 돈 · 장 혁 수*

한국과학원 화학공학과

(접수 1979. 11. 6)

Hydrodynamics and Bubble Breakage in Three Phase Fluidized Beds

S.D. Kim and H.S. Chang*

Department of Chemical Engineering,

Korea Advanced Institute of Science, Seoul 131, Korea

(Received November 6, 1979)

요 약

삼상(액체-기체-고체) 유동층 및 삼상 유동층내에 기포를 분쇄할 목적으로 혼합한 부동물질이 함유된 층내의 각상의 체유량을 비교적 넓은 범위의 유속 조건에서 측정하였다. 실험은 직경이 25.4 cm 인 유동층 반응기에서 행하여졌다.

유체의 속도, 입자의 크기, 부동물질의 모양 및 부동물질과 입자의 체적비가 각상의 체유량 및 층기공율(층팽창)에 어떠한 영향이 있는가를 구명하였다.

유동층내의 입자와 부동물질의 체적비가 10% 이상인 경우의 삼상 유동계에서는 부동물질이 기포를 현저하게 분쇄함을 알았으나 체적비가 10% 이하인 경우에는 부동물질이 기포를 분쇄하는 효과가 크지 못함을 알 수 있었다.

실험결과는 입자의 Reynolds 및 Froude Number 및 부동물질과 입자간의 표면적비의 함수의 실험식으로 나타내었다.

Abstract

The individual phase holdups in three(liquid-gas-solid) phase fluidized bed and the bed of particles with floating contactors(cylindrical or spherical) for breaking bubbles have been

*충전대학교 화학공학과

measured over a wide range of liquid and gas velocities. Experiments were carried out in a 25.4 cm-diameter fluidized bed.

The effects of fluid velocity, particle size, shape of floating contactors and volume ratio of floating contactors to solid particles on bed porosity and phase holdups were determined.

Beds of particles and floating contactors having a volume ratio exceeding 10% were found to have a significant bubble breaking potential. In contrast, beds of particles and floating contactors having the ratio below this value were found to have insignificant bubble breaking potential.

The data were correlated empirically by equations involving particle Reynolds and Froude numbers and surface ratio of floating contactors to particles.

I. 서 론

화학 및 물리적인 반응기로써 유동층 반응기가 석유화학, 석유정제, 광물의 제련로로써 공업적인 공정에서 널리 사용되고 있으므로 인하여 기체-고체계의 유동화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 반하여 삼상 유동층 즉 고체 입자가 액체와 기체에 의하여서 상향 유동화 되는 계에 관한 연구는 비교적 많이 보고되어 있지 않다.

삼상 유동층내에서는 액체는 고체를 함유한 연속상을 이루며 동시에 기체는 불연속상의 기포로써 형성되어진다. 지난 수년간 석유공업에서의 H-oil(1) 및 Hy-C cracking(2) 공정 등에 의한 원유의 촉매 수소화 반응 및 탈황반응 기로써의 삼상 유동층의 개발과 근래의 미생물 Fermentor(3)로써의 삼상유동층의 개발 등으로 인하여 삼상유동층에 관한 연구가 지대한 관심을 모으게 되었다.

본 연구자의 발표되어진 논문^{4~8)}에서 액체 및 기체의 유속, 입자의 크기(1~6 mm), 액체의 점도(1~70cp), 액체의 표면장력(39.8~73 dyne/cm) 등이 각상의 체유량, 유동층의 높이 변화 특성, 액상의 축방향 혼합, 기포의 특성(크기, 속도) 및 기포의 wake의 특성에 어떠한 영향을 미치는 가를 보여 주었다.

삼상 유동층의 특성중의 하나는 비교적 작은 입자($dp < 2.5$ mm)를 액상으로 유동화 시키면

유동층의 높이가 증가하게 된다. 이때 액상의 유량을 고정시키면 어떤 유동층 높이를 유지하게 된다. 이 상태에서 적은 양의 기체를 주입하면 유동층의 높이가 증가하는 대신 감소하는 현상을 보인다는 사실이다.^{8~13)} 그 반면 비교적 큰 입자($dp > 2.5$ mm)를 유동화시키면서 기체를 주입시에는 유동층의 높이가 감소함 없이 기체유속의 증가와 함께 유동층의 높이가 증가한다는 사실이다. 이러한 현상을 액상의 U_{mf} 값을 기준으로 할 때 유동층의 감소하는 상태(Bubble Coalescing Bed)는 $U_{mf} < 1.28$ cm/sec 때이며 유동층이 기체 주입시 증가하는 상태(Bubble Disintegrating Bed) 때는 일반적으로 $U_{mf} > 1.28$ cm/sec 조건일 때임을 알 수 있다.⁶⁾

유동층 반응기에서 반응물과 촉매간의 효율적인 접촉이 가장 중요하게 요구되어지며 좋은 접촉을 이루기 위하여서 큰 공업적 유동층 반응기 내에 고정된 Baffle들을 장치하여서¹⁴⁾ 기포의 Coalescence를 막고 기포를 분쇄시켜서 기포의 수를 증가시켜 좋은 접촉을 이루게 하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 이러한 고정 Baffles들을 장치함으로 인한 장치비 및 동력비의 소모가 크며 또한 입자들이 Baffle에 의하여 쉽게 마모되어지며 동시에 Baffle의 erosion 현상이 쉽게 일어나며 마모되어진 입자를 회수하기 위하여서 cyclone 등의 집진장치가 필요되어진다.

이러한 장치비의 소모없이 기포를 분쇄할 수 있는 방법으로써 부동물질(Floating Contactor)를 일정량 첨가하여 기포를 분쇄시켜 보고자 하

는 시도가 기체-고체간의 유동층에서 행하여졌으나,¹⁵⁾ 삼상유동층에서의 시도는 본 실험이 최초의 시도이다.

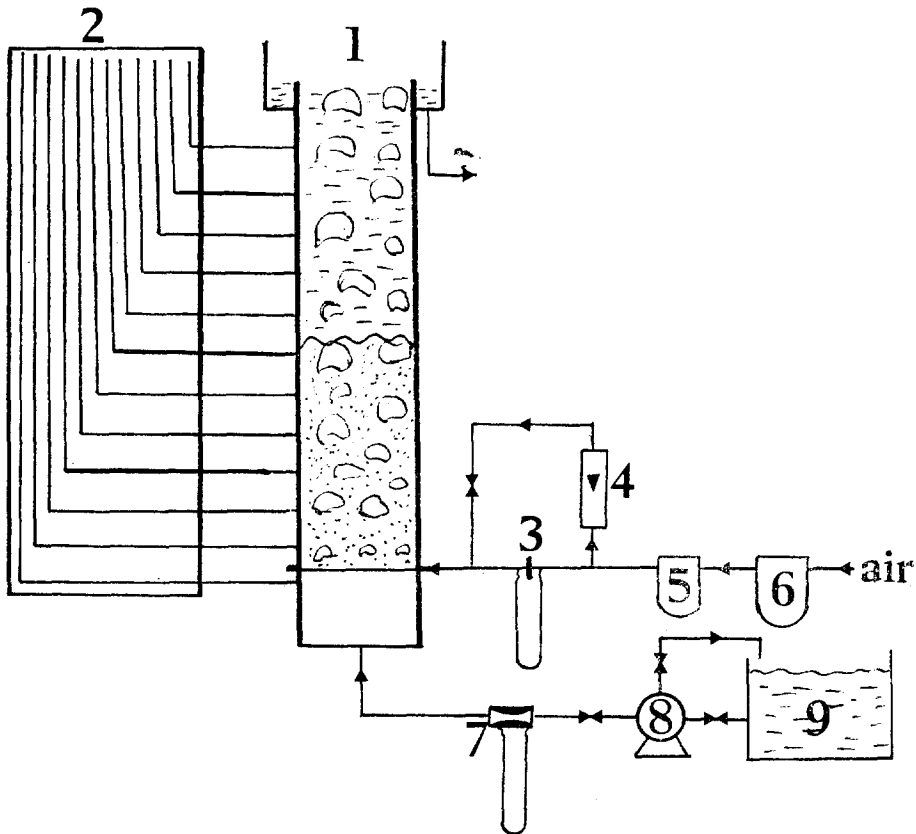
1970 년까지의 입상 유동층에 대한 총평창 특

Table 1. Properties of the Solids

Material	Particle Diameter (mm)	Density (kg/m ³)	Weight of Solids in Bed (kg)	Minimum Fluidizing Velocity (cm/sec)
Ceramic Balls	6.0	2350	21.0	4.20
Ceramic Balls	4.0	2350	21.0	3.56
Sand	1.0	2650	20.5	1.05

Table 2. Specifications of Three Phase Bed of 1 mm Sand Mixed with Floating Contactors

Shape	Average Density (kg/m ³)	Volume Ratio (%)	Bed Density (kg/m ³)	Bed Weight (kg)	Number of Floating Contactors
Cylindrical	1610	5	2585	20.03	160
		10	2546	19.65	320
		15	2485	19.23	480
Spherical	1510	10	2538	19.63	28
		15	2482	19.20	42
		20	2425	18.76	56



1. Main Column
4. Rotameter
7. Venturi-Meter

2. Manometer Board
5. Pressure Regulator
8. Pump

3. Orifice Meter
6. Filter
9. Liquid Tank

Fig. 1. Equipment

성, 액기상의 체유량, 액상의 혼합 및 기포의 특성에 관해 보고되어진 보문을 Ostergaard^{16,17)}가 종합, 보고한 바 있다. 그러나 대부분의 실험이 작은 장치에서 작은 입자를 사용하여 행하여진 관계로 "scale-up" 하는데 이용할 수 있느냐 하는 문제를 안고 있다. 그러므로 본 실험은 공업적 반응기에 필적하는 25.4 cm 직경의 반응기를 사용하여 기체, 액체의 체유량과 층팽창의 특성 및 삼상 유동층에서 부터 나오는 기포의 크기 기체와 액체의 유속, 입자의 크기 및 부동물질의 존재 등에 의한 영향을 연구하였다.

II. 실험

본 실험에서는 물을 액상으로, 공기를 기상으로 사용하였으며 1 mm 모래, 4 mm 와 6 mm 의 자재구를 고체상으로 사용하였으며 자세한 내용은 Table 1에 보여주었다. 부동물질로써는 내경 1 cm 의 PVC 관을 2.54 cm 로 절단, 관안에 납구를 일정량 넣고 paraffin 으로 채웠고 구형의 부동물질로써 4.2 cm diameter 의 탁구공의 내부에 일정량의 납구를 주입하고 paraffin 으로

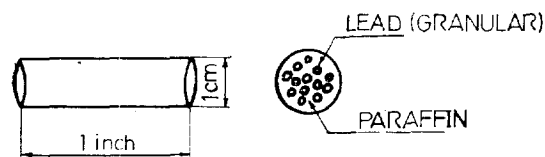


Fig. 2. a) Cylindrical Shape Floating Contactor

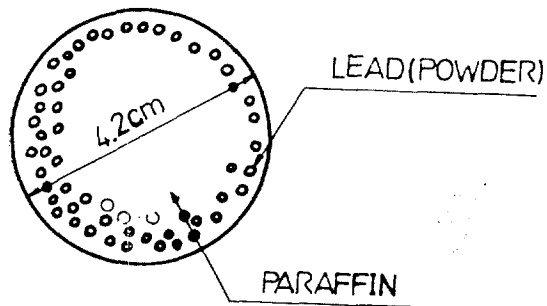


Fig. 2. b) Spherical Shape Floating Contactor

충진시켜서 부동물질의 밀도를 변화시켜 사용하였으며 자세한 내용은 Table 2 및 Fig. 2에 보여주었다.

액상의 단면적을 지나는 유속은 2.1에서 7 cm/sec로 변화시켰고, 기체의 단면적을 지나는 유속은 0에서 11 cm/sec까지 변화시켜서 그의 영향을 보았다.

III. 장 치

실험은 높이 2,350 mm, 내경 254 mm 의 원통형 column에서 수행하였으며 자세한 장치도는 Fig. 1에 나타내었다. 주장치 column은 2,170 mm 높이×5 mm 두께×254 mm 내경의 아크릴 판이 3부분으로 나누어져서 flange로 연결하였다. 일정한 액체의 수위를 유지하며 동시에 액체 층구의 영향을 없게 하기 위하여 주 column 최상부에 하변이 230 mm이며 높이 190 mm인 정육각형 유체출구 저장부를 설치하였고, 주 column 맨위에 입자의 손실을 막기 위하여 30 mesh 크기의 screen을 부착하였다.

산포판(distributor plate)은 두께 11 mm의 Aluminum 판을 두개 붙여서 제작하였고 두 판 사이로는 기체를 주입하기 위하여 내경 0.5 mm 동판이 10개가 삽입되어있다.

산포판은 유체를 균일하게 분포하기 위하여 구경 0.3 mm의 hole이 207개가 주어진고, 입자들을 지지한다.

Distributor Box는 높이 185 mm×내경 254 mm의 Aluminum 원통으로 이루어져서 column 맨 밑부분에 위치하며 이 Box 위에 산포판이 위치. 주 column과 flange로 연결되어졌다. 이 Distributor Box 밑부분에 유체 저장탱크로부터 내경 5.08 cm의 판을 통해 5마력의 원심펌프로 부터 유체가 공급되어진다. 공급되는 액체의 유속은 주공급선과 by pass선에 부착된 2개의 glove valve를 사용하여 조절되었고 유속은 venturi-meter로 측정하였다.

공기는 압축기(10 kg/m² 용량)로부터 여과기와 압력조정기를 거쳐, 기름이 함유되지 않은 깨끗한 Air가 Rotameter와 Orifice를 거쳐서 원

하는 유속이 살포판의 기체 공급관에 연결되어서 공급된다.

주 column 내의 정압력(static pressure)를 측정하기 위해 살포판으로부터 시작 152.4 mm 간격으로 수직방향으로 11개의 압력 Tap이 부착되어서 manometer에 연결되어 있다.

IV. 액상 체유량 및 총팽창 측정

Table 1에 주어진 입자의 양을 주 column에 집어넣고, 원하는 양의 액체 및 기체를 장치에 공급하여 steady-state가 이루어진 후에 주 column의 압력 profile을 manometer를 이용하여 측정한다.

대표적인 압력 profile을 column 높이에 따라서 나타낸 것이 Fig. 3에 나타나 있다.

총팽창의 높이는 Fig. 3에서 표시된대로 기

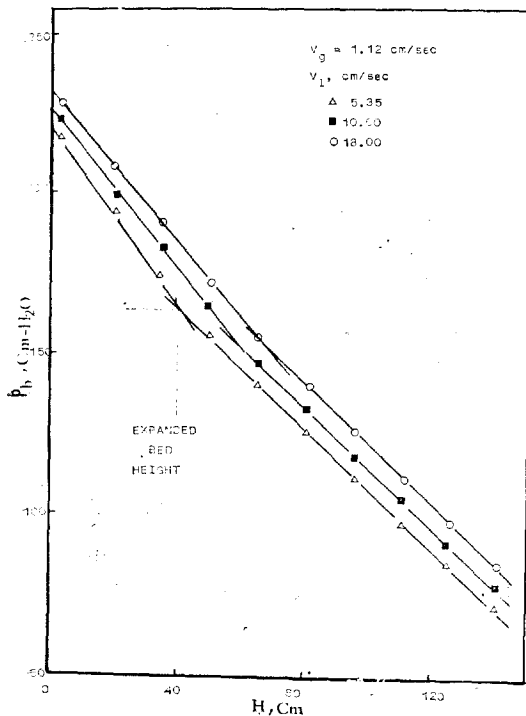


Fig. 3. Typical Bed Pressure Profiles(Liquid-Gas-Solid)

울기가 변하는 굴곡점이며 이 높이는 눈으로 관찰한 층높이와 잘 일치하고 있다.

액상과 기상의 체유량은 다음 관계식으로 부터 계산할 수 있다.

$$\epsilon_l + \epsilon_g + \epsilon_s = 1.0 \quad (1)$$

$$P_b = H(\epsilon_l \rho_l + \epsilon_g \rho_g + \epsilon_s \rho_s) \quad (2)$$

이들 식 중에서 ϵ_l 과 ϵ_g 만이 미지의 변수이며, 고체의 체유량은 다음 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$\epsilon_s = \frac{W}{\rho_s H A} \quad (3)$$

상기식 (3)에서 W 및 ϵ_s 는 Table 1에 주어져 있다. 관계식 (2)를 사용할 수 있는 조건은 층내의 dynamic component 압력변화 및 friction loss가 무시할 수 있으리만큼 작을 경우이다.

이러한 조건을 시험하기 위하여 유동층 내에 액상을 채우고 압력강하를 액상 유속을 최저속도에서부터 최고속도까지 변화시키며 측정하였

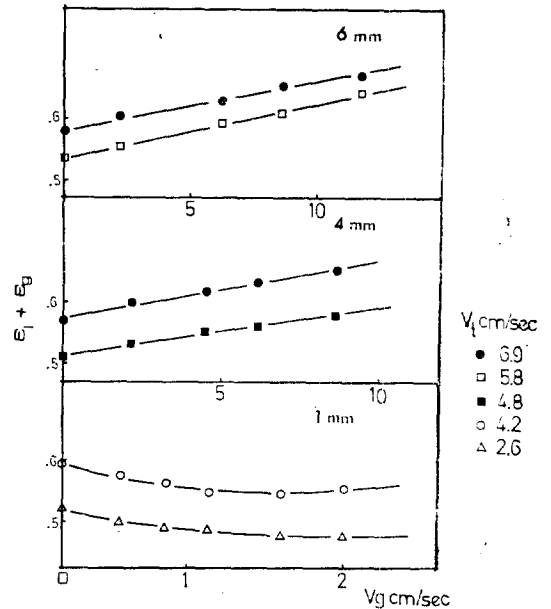


Fig. 4.

다. 그 결과 압력강하 profile에 크게 감지할 만한 변화를 관찰하지 못하였다.

V. 실험결과 및 고찰

층의 기공율(Bed Porosity)은 액상과 기상이 차지하고 있는 삼상층 내부의 분율로 정의되며 곧 층팽창 높이와 직접 비례한다. 그 대표적인 결과를 Fig. 4에 기체유속의 함수로써 보여주었다.

도표에서 보듯이 4 mm 및 6 mm 자재구를 유동화 시킬 때 층의 기공율은 액상의 유속과 기상의 유속을 증가시키면 입자에 미치는 Drag force의 증가와 층팽창 높이의 증가로 인하여 증가함을 관찰할 수 있다. 그 반면 1 mm 모래 입자를 기상 및 액상으로 유동화 시킨 경우 층기공율은 액상의 속도를 증가시키에 따라 증가하는 반면 서론에서 언급하였듯이 주어진 액상 속도에서 기상의 주입에 의하여 층기공율은 감소함을 알 수 있다. 이러한 층기공율의 감소는 기체 속도가 대략 1.7 cm/sec 이하에서 일어나다가 그 이상의 속도에서는 다시 증가함을 알 수 있다.

이러한 기공율의 감소 현상은 주어진 액체 유속이 높을수록 즉 초기 층팽창 높이가 높을수록 더 많은 물의 감소 현상을 보이며 이러한 결과는 이제까지 발표되어진 논문들과 잘 일치하고 있다.

투명한 유동층을 통하여 관찰한 결과와 삼상 유동층에서 나오는 기포현상을 사진으로 관찰한 결과 층기공율이 감소하는 상태 때의 기포의 크기가 증가하는 상태에 보다 상대적으로 큰 것을 알았다.

이러한 삼상유동층내의 층팽창 높이의 감소현상은 빠른 속도로 올라가는 기포 밑에 동반되어서 상승하는 액상 wake의 존재 때문이라고 할 수 있다.^{10, 11)} 즉 입자들을 유동화 시키는 주 medium은 액상에 의한 것이며 삼상유동층의 구성을 기포상, wake상 및 입자를 포함한 particulate 연속상으로 본다면 기포에 수반되어서 상승하는 wake상의 속도를 기포의 속도와 같다

고 가정하면 평균 액상의 속도는 액체 wake상의 가속된 속도만큼 물질수지상 감소되어야 할 것이다.

또한 wake의 형성이 활발치 못한 경우에는 기포가 지나간 후에 생기는 vortex에 의한 영향이 크다고 Rigby and Capes¹¹⁾가 보고 하였다.

즉 층 높이의 감소 현상은 wake의 체유량과 액체 wake의 속도와 평균액체 속도와의 차이의 두가지 함수관계를 갖는다고 할 수 있다.⁶⁾ 이에 대한 정량적인 규명이 이러한 삼상 유동층의 특성을 명확히 설명할 수 있을 것이며 이에 대한 연구가 요구되어지며 본 실험에서 관찰한 바와 본 연구자가 발표한 논문⁶⁾에 의하면 "Bubble Coalescing Bed"에서의 기포 크기는 "Bubble Disintegrating Bed"에서의 기포 크기보다 큰 것을 관찰하였다.

본 실험목적이 Floating Contactor를 사용하여서 기포를 분쇄시키는데 있으므로 만일 부동

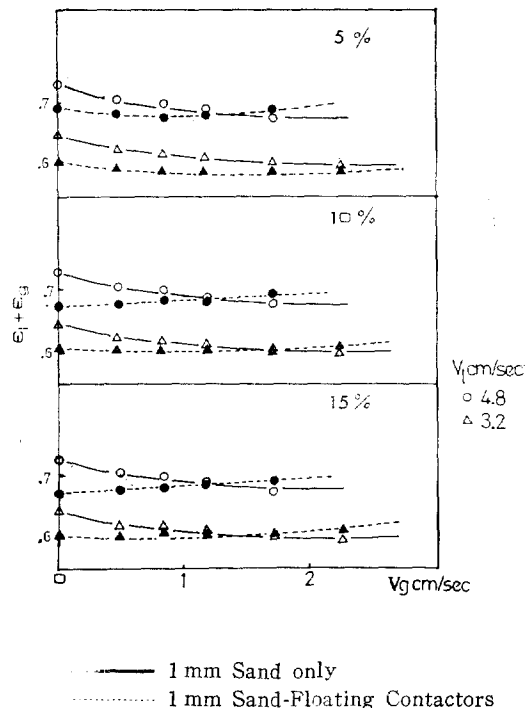


Fig. 5. Effect of Gas Velocity on Bed Porosity in Three Phase Beds of 1mm Sand-Cylindrical Shape Floating Contactors

물질이 효율적으로 기포를 분쇄시킨다면 위에서 언급한 증팽창 감소현상이 일어나지 않을 것이라는 가정하에서 Floating Contactor 와 주 유동층 입자의 Volume 비를 5~20% 범위에서 변화시켰고 Floating Contactor 의 모양의 영향을 보기 위하여 Fig. 2에 보인대로 Cylindrical 모양과 구형의 두가지를 사용하였다. 이러한 Contactor 의 존재시의 증기공율의 변화를 기체 유속의 함수로써 Contactor 의 부존재시의 실험조건과 비교하여 Fig. 5 및 Fig. 6에 도시하였다.

부동물질이 없는 유동층에서의 증기공율 감소때의 기포크기가 증기공율이 증가하는 상태의 기포크기보다 상대적으로 크다는 것을 삼상유동층에서 부터 나오는 기포크기를 사진을 찍어서 관찰하였다.

Fig. 5는 1 mm Sand 입자만을 액상과 기상으로 유동화시킨 경우와 Cylindrical 한 모양의 부동물질을 체적비로써 5%, 10% 및 15% 혼합,

두 유체로 유동화시킨 경우를 도시하였다.

이 도표에서 보듯이 Floating Contactor 의 체적비가 5%인 경우에는 Contactor 가 없는 경우와 마찬가지로 층의 기공율이 기체의 낮은 주입속도에서 감소하는 경향을 보여 주고 있는 반면 체적비가 10% 및 15%인 경우에는 0% 및 5%의 경우에 보여준 증기공율의 감소현상을 어떠한 기체유속에서도 감지할 수 없음을 알 수 있다.

Fig. 6는 1 mm 모래입자와 Spherical 한 부동물질을 10%, 15% 및 20%의 체적비로 혼합, 유동화시킨 경우 및 Sand 입자만을 두유체로 유동화시킨 경우의 증기공율의 변화를 기체유속의 함수로써 도시하였다. 이 경우 5% 및 10%의 체적비의 경우 Sand 만이 있는 유동층과 같이 주어진 액체 유속에서 적은 양의 기체를 주입한 경우 증기공율이 감소함을 관찰한 반면 체적비가 15% 및 20%인 경우에는 어떠한 기체 유속 조건에서도 증기공율의 감소현상을 관찰하지 못하였다.

그러나 전반적으로 부동물질을 혼합한 경우에 초기조건 즉 기체유속이 없을 때의 기공율은 1 mm Sand 만이 있을 경우보다 낮은 결과를 보여주고 있다.

이것은 부동물질의 추가로 인한 층내의 고체무게가 증가한 때문이다.

그러나 이러한 초기조건의 기공율 치에서도 1 mm Sand 만이 있는 유동층 조건에 기체를 주입한 경우에도 층 높이의 감소 현상을 관찰하였으므로 이 초기조건의 기공율에 의한 영향으로 인하여 높은 부동물질의 체적비 경우에 기공율 감소 현상이 일어나지 않는다고 할 수 없으며 기공율 감소 현상이 생기지 않는 이유는 높은 체적율 조건에서의 부동물질의 움직임에 의한 감지할 수 있는 기포 분쇄 현상을 눈과 사진으로 관찰한 결과로써 증팽창의 결과는 상기 조건에서의 기포의 크기가 작아진데 주원인이 있다고 할 수 있겠다.

또한 높은 유체속도에서 증기공율의 증가율은 부동물질 존재시가 부존재시보다 기체 유속을 증가시킬 때 더 높아지고 있음을 알 수 있다. 이

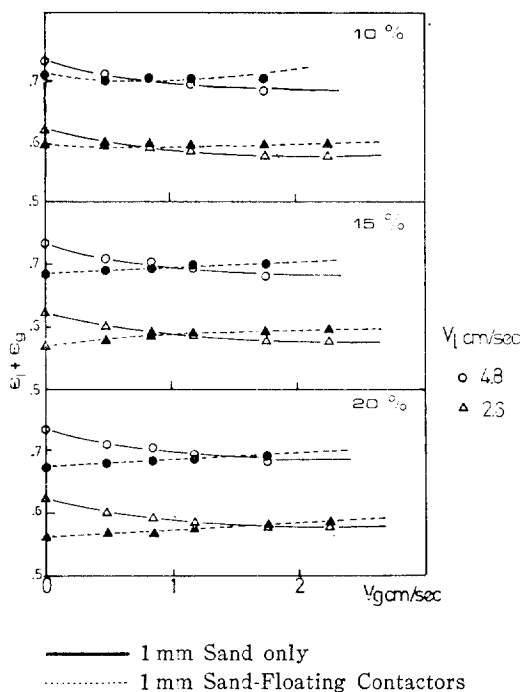


Fig. 6. Effect of Gas Velocity on Bed Porosity in Three Phase Beds of 1mm Sand-Spherical Shape Floating Contactors

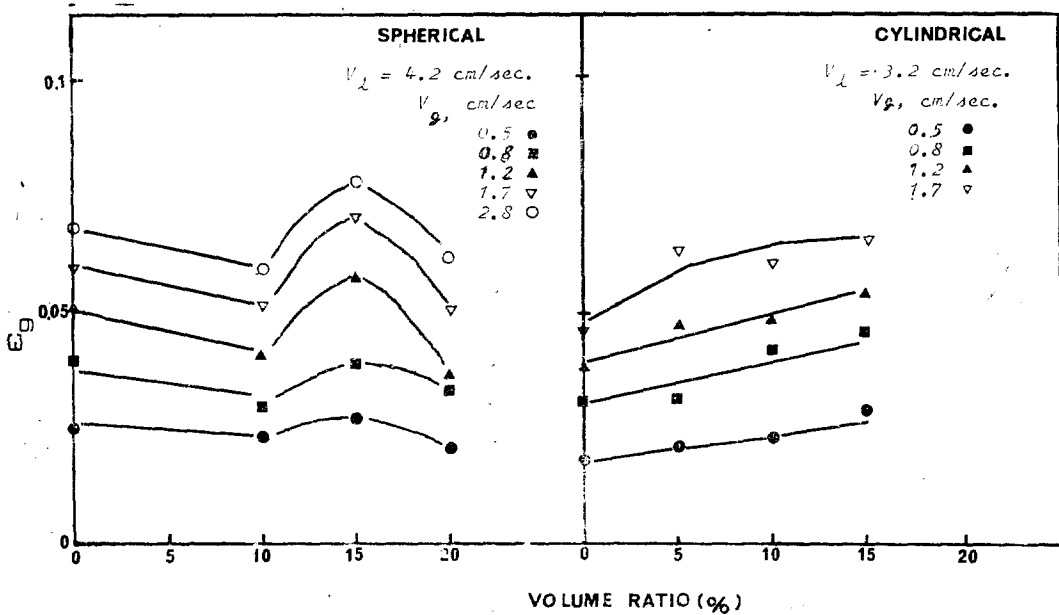


Fig. 7. Effect of Volume Ratio of Floating Contactors on Gas Holdup

러한 사실은 부동물질의 활발한 움직임이 기포를 효율적으로 분쇄하여서 기포의 크기를 감소시킨 반면 기포의 수가 증가하여서 보다 균일한 유동층 팽창을 가져오기 때문이며 아울러 부동물질이 존재하지 않을 때 층기공율이 낮은 기체 유속에서 감소하는 현상이 부동물질이 10% 이상 존재할 때는 기포의 분쇄가 효율적으로 일어나서 기포의 상승속도의 감소로 이에 수반되어 상승하는 액체 wake의 상승속도와 평균 액체 속도의 차이가 감소하게 되며 따라서 부동물질의 움직임이 wake의 형성 및 상승을 방해하는 역할을 할 수 있다고 생각된다.

부동물질의 Cylindrical 한 모양과 Spherical 한 모양의 영향을 비교해 보면 Cylindrical 한 모양(Fig. 5)에서는 체적율이 10%인 경우 낮은 기체 유속조건에서 층기공율(Bed Porosity)의 증가현상을 보였으나 Spherical(Fig. 6)한 경우 체적비가 10%인 경우 낮은 기체 유속조건에서 층기공율의 감소현상을 관찰하였다. 즉 Cylindrical 한 부동물질이 Spherical 한 Contactor 보다 기포 분쇄에 더 효율적임을 알 수 있다. 즉 Sp-

herical 한 Contactor의 체적이 Cylindrical 한 경우의 19 배이며, 표면적은 대략 4 배의 크기를 가지면서도 더 효율적이 되지 못함은 구형의 Contactor의 움직임을 관찰한 결과 구형 Contactor는 Bubble의 표면에서 riding 하는 현상 때문에 효과적이 되지 못함을 알 수 있었다. 이러한 현상을 근거로 보면 날카로운 모양의 부동물질이 더 효율적일 것이며 이에 대하여 좀 더 여러 모양의 부동물질에 대한 연구가 본 실험실에서 진행중이다.

Floating Contactor의 체적비가 기체 체유량에 미치는 영향을 조사하므로써 최적 조건의 체적비를 구하기 위하여 Fig. 7에 기체 체유량을 체적비의 함수로써 도시하였다.

이상계(Liquid-Gas or Gas-Solid)에서 Bubble flow의 영역을 가정할 때 물질수지상 기체 체유량은 아래식으로 정의된다.

$$\varepsilon_g = (V_g / V_b) \quad (4)$$

상기 관계식이 본 실험계에 적용된다고 가정하면 2 상계나 3 상계에서 기포의 상승속도(V_b)

는 기포의 크기와 비례한다는 것은 잘 알려진 사실이므로 기포가 작아지면 상승속도가 줄어들고 윗식에서 기포 상승 속도가 줄어들면 주어진 기체유속에서 기체 체유량은 증가함을 알 수 있다.

Fig. 7에서 나타난 바와 같이, Cylindrical 한 부동물질의 존재 조건에서는 일정한 액체 유속에서 기체 유속 변화시 기체 체유량은 부동물질의 체적비 및 기체유속이 증가할수록 증가함을 볼 수 있다. 즉 본 실험 범위가 15%의 체적비까지 실험한 결과에서 15%의 체적비가 최적 조건임을 예측할 수 있었다. 그 반면 Spherical 한 부동물질의 존재시 주어진 액체 유속에서 기체 유속을 변화시킨 결과, 기체 체유량은 기체 유속 증가로 증가하는 반면 부동물질의 체적비가 15%인 경우 ϵ_g 값이 최대값을 보여주고 있다. 즉 Equation 4에 준하여서 생각할때 이 15% 체적비 조건이 기포를 작게 분쇄하는 최적조건이라 할 수 있겠다.

체적비가 20%인 조건을 눈으로 관찰한 결과 혼합한 부동물질의 수적 증가로 인하여 원활한 상하 운동이 저해되며, 특히 벽면에서 "Channeling" 현상이 관찰되었다.

삼상 유동층 내에서 증기공울 및 액상의 체유량은 주어진 기체 유속에서 액상의 유속을 증가시키면 층내의 입자의 크기에 상관없이 거의 직선적으로 증가하였으며, 이러한 결과는 이제까지 발표되어진 결과와 잘 일치한다.

즉 주어진 입자에 미치는 Drag force의 증가로 인하여서 층팽창의 증가를 가져왔으며 또, 그로인해 액상의 체유량의 증가를 가져오는 것은 자명한 사실이라고 할 수 있다.

1 mm Sand에 Cylindrical 및 Spherical shape의 부동물질을 5~20%의 체적비로 혼합하여 사용한 삼상 실험에서도 상기와 같은 현상을 관찰하였다.

그 반면 액상의 체유량은 주어진 액체 유속에서 기체의 유속을 증가시키면 입자의 크기에 상관없이 감소하는 결과를 얻었다. 그러나 부동물질과 혼합되어진 1 mm Sand 삼상 유동층에서는 그 감소하는 율이 부동물질의 없는 경우보

다 적은 현상을 관찰하였다.

기체의 체유량은 일반적으로 유동층내의 입자의 크기나 부동물질의 체적비에 상관없이 액체 및 기체의 유속 증가에 따라서 증가하였으나 액체 유속의 증가에 따른 체유량의 증가는 비교적 크지 않음을 관찰하였다.

상기 실험결과를 토대로 할때 이상 유동층 (Gas-Solid)계에서 Floating Contact¹⁵⁾가 기포를 분쇄하는 Potential을 보여준 것과 같이 삼상 유동층내에서도 비교적 적은 입자를 유동화할 때 기포를 분쇄시켜 접촉면적을 넓히기 위하여 대략 체적비의 10% 이상의 부동물질을 삽입하므로써 기포를 효율적으로 분쇄시킬 수 있다는 새로운 사실을 입증하므로써 유동층 내에 baffle이나 screen 등을 기포를 분쇄할 목적으로 장치할 필요가 없겠으나 사진으로 관찰한 기포에 관한 결과는 정성적인 해석은 가능하였지만 정량적인 해석이 미흡하였고 이에 대한 연구가 더욱 더 진행되어서 이론적인 Model이 개발되어야 할 것이 앞으로의 과제이다.

VI. 실험 결과식

이상 및 삼상 유상계의 이론적 Model은 Bubble 및 Slug flow 영역에 제한되어 있다. Bubble flow 영역이란 유동층 내에서 기포의 크기 및 속도가 층내의 어디에서나 같고 기포의 합침이 없다는 조건이며 Slug flow 영역이란 완전한 기포의 합침(Coalescence)에 의해 반응기의 직경과 기포의 직경이 같은 상태를 말한다.

그러나 실질적인 반응기의 유상이란 이러한 두 개의 극한 상황의 중간에서 조업되는 것이며, 본 실험조건도 이러한 실질적인 유상조건에서 행하여졌다. 이러한 중간 유상조건의 이치가 실질적인 Modeling에 매우 중요한 것이다. 현재까지 적절한 수식개발이 되어 있지 못함은 유상의 조건이 너무나 시간에 따라 변화하는 복잡한 계를 이루고 있기 때문이다. 더구나 본 실험에서는 부동물질을 첨가한 더 복잡한 계이므로 이제까지 제안된 두 가지 Bubble 및 Slug flow 영역의 Model에 적용되지 못함을 알았다.

이러한 조건하에서의 최선적인 방법은 본 실험에서 사용한 실험 변수들을 함수로 하여 증기공울 및 기상의 체유량에 관한 실험식을 구하였으며 그 결과는 아래와 같다.

$$(\varepsilon_l + \varepsilon_g) = 0.610(Fr_l)^{0.134}(Fr_g)^{0.006} \\ (Re_l)^{0.006}(S_{fc}/S_s)^{-0.0007} \quad (5)$$

$$\varepsilon_g = 0.105(Fr_l)^{0.084}(Fr_g)^{0.417}(Re_l)^{0.042} \\ (S_{fc}/S_s)^{0.051} \quad (6)$$

증기공울 실험식(5)에서 보면 증기공울은 액체 및 기체의 Froude와 액체의 Reynolds number의 주함수이며 부동물질의 표면적비 항은 거의 무시할 수 있는 적은 지수항을 가지고 있다.

본 실험결과에서 보면 $(\varepsilon_l + \varepsilon_g)$ 항에서 ε_l 값이 ε_g 값보다 약 10~20 배 이상 큰 값이며 또한 부동물질의 존재의미 자체가 기체 체유량에 영향을 미치는 인자이므로 (S_{fc}/S_s) 항이 $(\varepsilon_l + \varepsilon_g)$ 항에 미치는 영향은 매우 적은 것을 알 수 있는 반면, 기체 체유량(ε_g)에 미치는 영향은 비교적 큰 것을 알 수 있다. 또한 ε_g 역시 액체 및 기체 Froude와 액체 Reynolds number의 함수로써 잘 나타남을 알 수 있었다.

VII. 결 론

본 실험에서 얻은 결과를 토대로 하여 아래와 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 삼상 유동층내의 기포의 크기를 분쇄시키므로서 접촉 면적을 크게 하기 위하여서 부동물질을 전체 층 체적당 10% 이상 혼합하면 현저한 기포 분쇄 현상을 얻을 수 있었다.
2. 부동물질의 존재시 및 부존재시의 층 기공율(Bed Porosity) 및 기체 체유량(Gas Holdup)은 Reynold 및 Froude Number 및 부동물질과 입자간의 표면적 비의 무차원 군으로 잘 표시되어진다.

후 기

본 연구는 아산재단 연구비의 지원으로 가능하였으며, 본 연구를 위하여 물심 양면으로 협조하여 주신 아산재단과 숭전대학교 당국에 감사드립니다.

Nomenclature

A	column cross-sectional area
d_p	particle diameter
Fr	Froude number, $V^2/d_p g$
g	acceleration of gravity
g_c	dimensional constant
H	expanded bed height
P_b	pressure drop across bed
Re	Reynolds number based on superficial velocity, $(V d_p \rho / \mu)$
S	surface area
V	superficial velocity
W	weight of solid in the bed
ε	holdup(or fraction of bed volume) occupied by individual phase
μ	viscosity
ρ	density

Subscripts

b	bubble
fc	floating contactor
g	gas phase
l	liquid phase
s	solid phase

References

1. Chevenak, M.C., Johanson, E.S., Johnson, C.A., Schuman, S.C. and Sze, M., Oil Gas J., 58, (1960), 80.
2. Chevenak, M.C., Feiglman, S., Wolk, R., Byrd, C.R. and Gell-wig, L.R., Oil Gas

- J., 14, (1963), 227.
3. Smith, E.L., James, A. and Filgett, M., Fluidization, Proc. of 2nd Eng. Found. Conf., (1978), 196.
4. Kim, S.D., Baker, C.G.J. and Bergougnou, M.A., Can. J. Chem. Eng., 50, (1972), 695.
5. Kim, S.D., Baker, C.G.J. and Bergougnou, M.A., Chime Et Indus.-Genie Chimique, 105, 25, (1972), 1783.
6. Kim, S.D., Baker, C.G.J. and Bergougnou, M.A., Can. J. Chem. Eng., 53, (1975), 134.
7. Baker, C.G.J. Kim, S.D., and Bergougnou, M.A., Powder Technology, 18, (1977), 201.
8. Kim, S.D., Baker, C.G.J. and Bergougnou, M.A., Chem. Eng. Sci., 32, (1977), 1299.
9. Stewart, P.S.B. and Davidson, J.F., Chem. Eng. Sci., 19, (1964), 319.
10. Ostergaard, K., Chem. Eng. Sci., 20, (1965), 165.
11. Rigby, G.R. and Capes, C.E., Can. J. Chem. Eng., 48, (1970), 343.
12. Bhatia, V.K., Ph.D. Thesis, Univ. of British Columbia, Canada (1972).
13. Epstein, N., Can. J. Chem. Eng., 54, (1976), 259.
14. Huntley, A.R. and Synodis, S.T., U.S. patent 3169335, (1965).
15. Keillor, S.A. and Bergougnou, M.A., "Fluidization Technology," Vol. 2, (1976), 95.
16. Ostergaard, K., Advances in Chem. Eng., 7, (1968), 71.
17. Ostergaard, K., Fluidization, Chapter 18, John Wiley, N.Y. (1971).

