

압력강하를 이용한 밀도차가 있는 이성분계의 혼합도 예측

장현태*† · 홍성창** · 도동섭

*한서대학교 공과대학 화학공학과

**경기대학교 공과대학 환경공학과

고려대학교 공과대학 화학공학과

(1997년 8월 8일 접수, 1997년 12월 8일 채택)

Prediction of Mixing Degree of Binary System with Different Density in a Fluidized Bed

Hyun Tae Jang*†, Sung Chang Hong** and Dong Sup Doh

*Dept. of Chem. Eng., Hanseo University

**Dept. of Environ. Eng., Kyonggi University

Dept. of Chem. Eng., Korea University

(Received 8 August 1997; accepted 8 December 1997)

요 약

내경 0.109 m인 유동층반응기에서 이성분계에 대한 혼합특성을 연구하였다. 대상물질로는 모래, PMMA(poly methyl methacrylate)와 망간 광석을 이용하여 혼합도와 압력강하곡선의 특성을 jetsam rich계와 flotsam rich계에 대하여 각각 수행하였다. 압력강하곡선을 이용하여 혼합과 분리현상의 측정과 해석을 하였으며 이러한 결과는 체분석을 통한 혼합도를 이용하여 규명하였다. 본 연구로부터 다음의 결과를 얻을 수 있었다. 유속에 따른 측방향 혼합도는 층내의 압력강하 변화와 관계되며, take-over velocity는 압력강하곡선 기울기의 전이점으로부터 구할 수 있음을 알았다.

Abstract—The profile of pressure difference and mixing degree were investigated with binary system of different density using PMMA(poly methyl methacrylate) and sand(or manganese ore) in a 0.109 m I.D. gas fluidized bed. This study is carried out the systems jetsam rich system and flotsam rich system. A study on mixing-segregation phenomena was performed by the analysis of the profile of pressure difference, and the results were confirmed with mixing degree using sieve test. It was found that the take-over velocity was obtained from the value of specific gas-velocity which observed by transition of the slope in a pressure differences profile. The mixing degree is related with variation of the bed pressure difference measuring height of axial position according to gas velocity.

Key words: Solid Mixing, Mixing-Segregation, Fluidized Bed, Binary System

1. 서 론

유동화 장치는 고체입자를 다루는 다른 계에 비하여 많은 장점을 가지고 있다. 반응기내에서 고체가 액체와 같이 거동하기 때문에 연속조업이 가능하며 물질전달 및 열전달의 우수성으로 인하여 화학반응기뿐만 아니라 물리적 조업에도 많이 이용되고 있다. 특히, 유동층에서는 고체입자와 기체간의 접촉효율이 뛰어나므로 촉매반응기로 유동층이 많이 이용되고 있다. 또한 촉매 유동층에서 이원촉매를 사용할 경우 두 촉매간의 혼합과 분리에 따라 유동층의 질과 성능이 결정되어지므로 혼합특성에 대한 연구는 매우 중요하다. 또한 실제 대부분의 유동층의 경우 균일입자계가 아닌 다입자계이고 또한 밀도가 다른 두 성분의 혼합계 유동층도 많이 존재한다. 따라서 이러한 이성

분계 혼합특성에 대한 연구가 절실하다. 여러 연구자[1-8]에 의하여 이성분계의 혼합에 대한 연구가 이루어져 왔고 혼합도에 영향을 미치는 여러 인자들의 영향을 수식화하기 위한 작업도 계속 진행 중이다. Nienow 등[3]은 이성분계에서 상대적으로 작은 flotsam이 부피비로 50%가 넘는 계를 flotsam rich계로 정의하고 공압속도, 밀도, 입자분율, 층높이, 최소유동화속도 및 두 입자간의 최소유동화속도비에 따른 혼합도 경험식을 제안하였고, Chiba 등[1,9]은 이성분계에서 pressure drop profile을 이용하여 혼합특성을 고찰하고자 하였다.

대부분의 연구는 조업조건에 따른 혼합도를 제시한 연구이며 조업 중인 유동층의 혼합도를 관측할 수 있는 연구는 수행되어 있지 않다. 이는 조업 중인 상태에서 혼합도에 대한 측정방법이 없는 것에 기인한다. 따라서 혼합도의 측정을 위하여는 조업 중인 유동층을 조업 중단하고 층높이에 따른 혼합도를 얻는다. 그러므로 본 연구에서는 유동층의 관측법으로 최근 주목받고 있는 압력요동 특성치를 이용하여

†E-mail: HTJang@gaya.hanseo.ac.kr

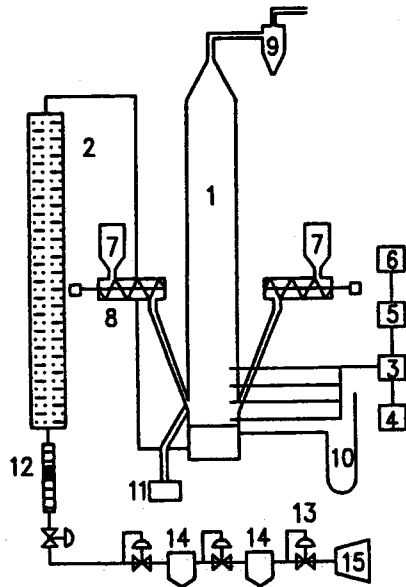


Fig. 1. Experimental facilities and data processing system.

- | | |
|------------------------|--------------------------|
| 1. Fluidized bed | 9. Cyclone |
| 2. Humidifier | 10. Manometer |
| 3. Pressure transducer | 11. Vibrating discharger |
| 4. Power supplier | 12. Flowmeter |
| 5. Amplifier | 13. Regulator |
| 6. Personal computer | 14. Air filter |
| 7. Hopper | 15. Compressor |
| 8. Screw feeder | |

유동층의 조업상태를 관측할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

따라서 본 실험에서는 밀도차가 있고 크기가 같은 계에서의 혼합도를 혼합도 실험을 통하여 구한다. 이때 입자혼합에 영향을 주는 공압속도와 이성분계의 비율에 대하여 연구하고 이를 압력요동특성치와 상호 비교하여 압력요동특성치로부터 혼합도를 예측할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다. 또한 밀도와 크기가 다른 이성분계에서도 이와 같은 실험을 수행하여 혼합도와 압력요동 특성치와의 관계를 규명하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치

본 실험에 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같으며, 유동층부, 측정부로 구성되어 있고, 15 hp의 공기압축기를 이용하여 유동층에 공기를 공급하였다. 유동층에 공기가 유입되기 전에 유입공기의 damping을 막고 불순물을 제거하기 위하여 정압기와 공기 정화기를 설치하였고, 유속은 유량계(Dwyer Inc., 1-7 l/min)와 니들밸브를 이용하여 조절하였다. 유동층 기벽과 입자간 및 입자 상호간의 정전기 현상을 줄이기 위하여 내경 0.109 m, 높이 1.1 m의 아크릴관에 원통형 stainless steel망을 충전시키고 물을 넣은 증습기를 설치하여 공기의 상대습도를 50%로 유지하여 공급하였다.

유동층은 층내 현상을 관찰할 수 있는 내경 0.109 m, 높이 1.8 m의 아크릴관으로 제작하였고, 기계분산판은 개공비가 3%인 사각파치형 다공판을 사용하였다. 외벽에는 압력전달기(Valcom Co. Ltd., model VPRN, pressure transducer, PT) probe의 측정위치를 변경할 수 있도록 외경 0.01 m, 길이 0.01 m 아크릴관을 사용하여 분산판으로부터 0.025 m 간격으로 4개의 측정관을 설치하였다.

측정부는 압력요동신호를 측정할 수 있는 압력전달기와 압력전달

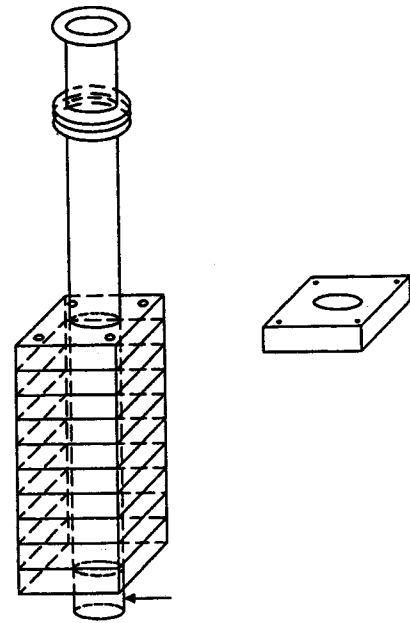


Fig. 2. Apparatus for measuring the fine particle fraction in a binary system.

기를 시동시키기 위한 4 채널 1의 직류공급기, 측정된 압력요동신호를 디지털 신호로 바꾸어주는 A/D convertor, 디지털 신호를 통계 처리할 수 있는 컴퓨터 부분으로 구성되어 있다.

혼합도 측정 실험장치는 Fig. 2에 제시하였다. 혼합도 측정장치는 높이 0.01 m, 내경 0.109 m의 단을 축방향으로 10개 연결하여 축방향의 각 입자농도를 0.01 m 간격으로 측정할 수 있게 제작하였다.

2-2. 실험방법

실험은 두 입자를 유동층내에서 중형비(L/D)가 1이 되도록 부피 비율로 채우고 정해진 유속에서 유동화를 시킨 후 층이 정상상태에 도달하였을 때 층 중심에 설치된 압력전달기의 탐침관을 통하여 층내의 압력요동신호를 측정하였다. 또한 각 조건에서의 축방향 혼합도를 측정하기 위하여 내경 0.109 m, 두께 0.01 m 아크릴판을 10개 축방향으로 연결하여 혼합도 측정을 위한 장치를 만들었고, 이 장치를 이용하여 압력요동특성 실험과 동일한 조건에서 혼합도를 측정하였다. 혼합도 측정 실험은 압력요동특성 실험과 동일한 유속과 혼합비에서 유동화를 시키고 정상상태에 도달한 후 공급되는 유동화 공기를 갑자기 중단시켜 층내에서 축방향으로 유동화시와 같은 상태로 입도분포를 얻어 이를 각각의 단에서 입자를 분리하고 무게 분석하여 축방향 혼합도를 측정하였다. 이때의 유동화 입자의 층중은 flotsam입자를 층하부에 충전시킨 후에 jetsam입자를 충전하므로써 jet영역에 jetsam입자가 모두 충전되는 것을 막았다. 이와 같은 방법으로 혼합도와 압력요동특성실험을 모래 0.715 mm와 PMMA(poly methyl metacrylate) 0.715 mm, 0.359 mm, 자연산망간광석 0.359 mm를 사용하여 두 입자의 부피비를 0.1에서 0.9로 변화시키며 유속에 따른 실험을 수행하였다. 실험조건은 Table 1에 나타나 있다.

압력요동 특성치는 평균압력과 압력요동의 표준편차를 사용하였으며 측정시간은 10 ms 간격으로 1,024개를 취하여 이를 다시 16번 반복하여 평균을 취하였다.

2-3. 시료

본 실험에 사용한 시료는 jetsam으로는 시멘트 몰탈 압축강도 시험용 모래인 주문진 표준사($\rho_s=2,620 \text{ kg/m}^3$)와 망간광석($\rho_s=4,870 \text{ g/m}^3$)

Table 1. Experimental conditions

Operating variables	Operating conditions
Aspect ratio(L/D)	1
Gas velocity(m/sec)	0.107-0.857
Sand particle size(mm)	0.715
PMMA particle size(mm)	1.545, 0.715, 0.359
NMD particle size(mm)	0.1-0.9
PMMA volume fraction	

Table 2. The properties of sample particles

	$\rho_s(\text{kg/m}^3)$	$d_p(\mu\text{m})$	$U_{mf}(\text{m/sec})$	ϵ_{mf}	ϕ
Sand	2,620	715	0.360	0.48	0.67
PMMA	1,190	1,545	0.445	0.51	0.49
PMMA	1,190	715	0.262	0.59	0.53
PMMA	1,190	359	0.010	0.66	0.47
Natural manganese ore	4,870	359	0.120	0.59	0.52

이 사용되었고, flotsam으로는 PMMA($\rho_p=1,190 \text{ kg/m}^3$)가 사용되었다. 시료의 특성은 Table 2에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 동일 입자크기계에서의 flotsam rich계와 jetsam rich계의 구분

이전의 많은 연구자[3,5]들에 의하여 이성분계는 jetsam rich계와 flotsam rich계로 구분되어져 왔다. 이와 같은 구분은 jetsam의 비율에 따라 행하여지며 jetsam의 비율이 부피비로 50% 이상인 계를 jetsam rich계라 정의하고 이와 반대로 jetsam의 부피비가 50% 이하인 계를 flotsam rich계라 정의하였다. 이와 같은 구분을 하는 것은 유동층내의 거동이 jetsam과 flotsam의 비율에 따라 각각의 입자가 더 크게 영향을 미치기 때문이며, 또한 flotsam rich계에서는 층상상부 영역 이상에서는 flotsam의 농도가 높이에 따라 일정하게 나타나는 현상 때문이다[3,5]. Fig. 3은 모래 0.715 mm 30 vol%, PMMA 0.715

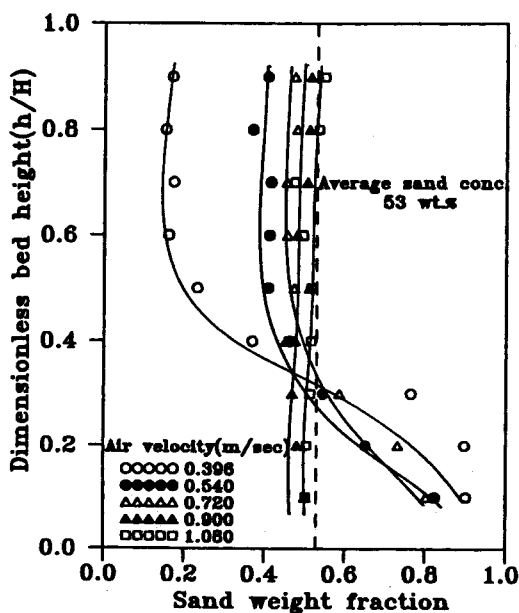


Fig. 3. The effect of air velocity on sand concentration with axial bed height(sand; 0.715 mm, 30 vol%, PMMA; 0.715 mm, 70 vol%).

mm 70 vol%인 경우의 유속에 따라 측방향 jetsam인 모래입자의 분포를 나타낸 것이다. 이 계의 경우 flotsam인 PMMA가 부피비로 50%를 넘는 flotsam rich계로써 flotsam rich계에서 나타나는 특이인 층상상부에서 일정한 jetsam의 농도를 나타내고 있다. 또한 유속의 증가와 더불어 층상부에 많이 존재하던 모래가 층상부로 더욱 많이 분급되고 유속이 더욱 증가하면 층전체가 거의 동일한 jetsam의 농도를 나타낸다. 이와 같이 측방향으로 전체의 모래 농도가 같은 상태를 완전 혼합이라 할 수 있다.

또한 Fig. 4는 모래 0.715 mm 70 vol%, PMMA 0.715 mm 30 vol%인 계를 대상으로 Fig. 3과 같이 나타낸 그림이다. Jetsam rich계는 층상부 영역에서 일정한 jetsam의 농도가 나타나지 않고 높이에 따라 선형적으로 변화한다. 이러한 jetsam 농도 구배를 그림에서 잘 나타내주고 있다. Fig. 3과 4의 두 계가 유속 증가와 더불어 입자로 전달되는 운동에너지가 증가되어 더 우수한 혼합도를 나타내며 flotsam 입자의 종말속도이하까지는 혼합이 증가함을 알 수 있다.

이와 같은 유속에 대한 두 입자의 혼합도를 관측할 수 있는 방법을 찾기 위하여 각각의 유속에 대하여 압력용동특성치를 측정하여 각각 지점간의 압력강하를 구하였다. Fig. 5는 Fig. 4와 같은 조성에서 유속에 따라 층높이별 압력강하를 나타낸 그림이다. 그림에서 가장 큰 값을 나타내는 것은 분산판으로부터 0.025 m에서 0.1 m 사이의 압력강하값이며 또한 나머지 두 선은 층상부의 0.025 m에서 0.05 m 사이의 값과 층상부 0.075 m에서 0.1 m 사이의 값이다. 층상부의 값을 0.025 m 이상을 선택한 것은 분산판으로부터 나타나는 jet 현상이 없는 지점이 층상부를 대표할 수 있기 때문이다. 위치별 압력강하값은 전체적으로 유속이 증가함에 따라 압력강하의 값이 감소함을 보이고 있다. 이는 유속이 증가함에 따라 층팽창이 증가하고 이에 따라 층내에 존재하는 입자량이 감소하고, 유속 증가와 더불어 층내의 공극률이 커짐으로 나타나는 현상이다. 공극률의 변화는 입자간의 공극보다는 기포 크기와 빈도수에 의한 영향으로 기포의 크기가 증가하기 때문에 발생한다. 즉 유동층의 유동화입자에 운동성을 전달하는 것은 기포이며 기포후류에 의하여 입자가 층상부로 이동하게 된다. 따라서 기포의 크기가 증가함에 따라 후류 크기가 증가되며 이동되는 입자의 양과 입자 중의 밀도가 큰 입자의 양이 증

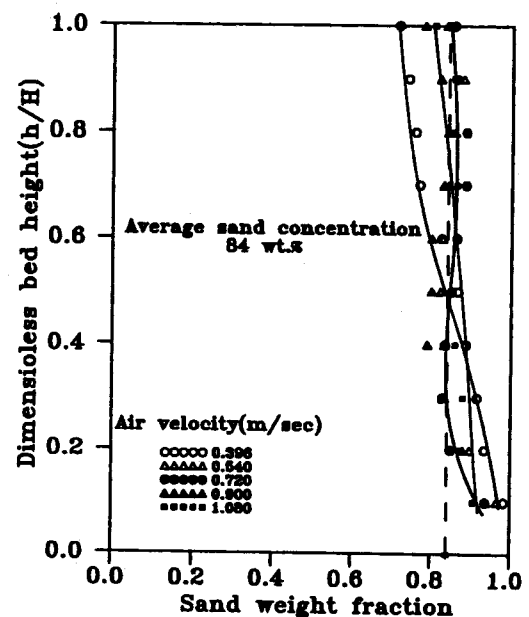


Fig. 4. The effect of air velocity on sand concentration with axial bed height(sand; 0.715 mm, 70 vol%, PMMA; 0.715 mm, 30 vol%).

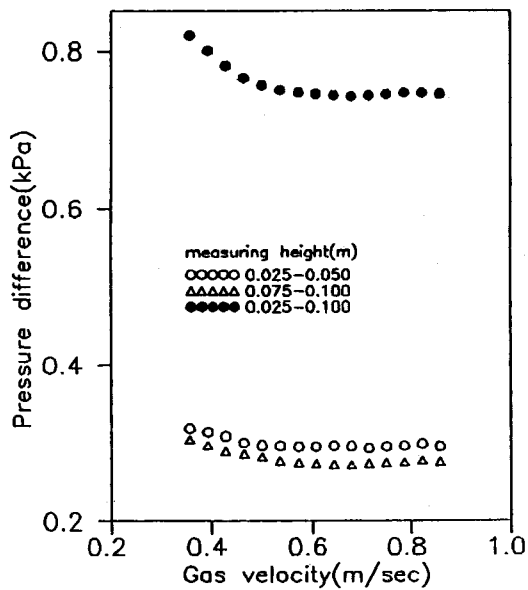


Fig. 5. Pressure difference for bed region with gas velocity (sand; 715 μ m, 70 vol%, PMMA; 715 μ m, 30 vol%).

가되어 혼합도가 증가한다. 따라서 Fig. 3, 5에 의하여 각 유속에서 입자의 혼합과 공극률 및 기포크기에 대한 예측을 할 수 있다. 층하부의 값과 층상부의 값을 비교하여 보면 층하부의 값이 더 크게 나타나는 것은 이성분계이므로 층하부에 밀도가 큰 jetsam이 더욱 많이 존재하기 때문이다. 즉 압력강하는 다음과 같이 나타낼 수 있다[9].

$$\frac{dp}{dh} \propto -\rho \quad (1)$$

Fig. 6은 Fig. 3과 같은 입자계에서의 유속에 따른 층 높이별 혼합도를 나타낸 그림이다. 층 전체의 값은 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 층 높이별로 살펴보면 Fig. 5와는 다른 경향을 보이고 있다. 층하부에서는 유속의 증가와 더불어 두 지점 사이의 압력강하값이 감소하고 있고 층상부에서는 증가하고 있다. 이와 같은 현상은 식

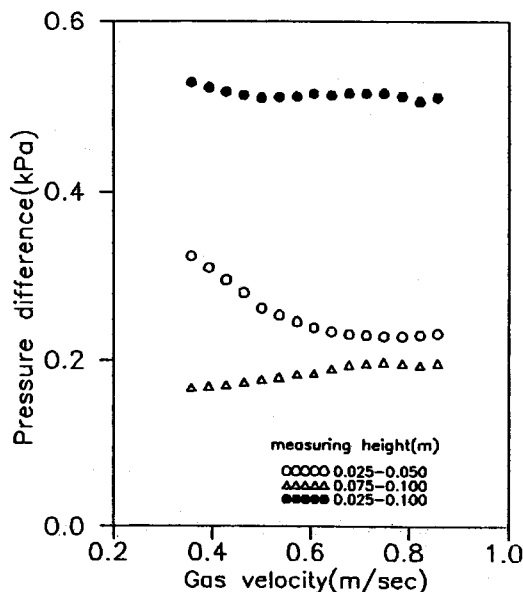


Fig. 6. Pressure difference for bed region with gas velocity (sand; 715 μ m, 30 vol%, PMMA; 715 μ m, 70 vol%).

(1)과 같이 층내에서 발생하는 압력강하값은 층 사이에 존재하는 입자의 무게에 의한 값이므로 입자의 혼합에 따라 층하부에 존재하는 jetsam이 유속 증가와 더불어 이동성의 증가로 층상부에서 층상부로 take-over되므로 층에 따라 유속에 대하여 압력강하의 감소와 증가가 나타난다. 즉 층팽창에 의한 기포크기의 증가 영향보다도 두 지점 사이에 존재하는 입자 영향을 더 크게 받는 것으로 나타난다.

Fig. 7은 jetsam으로 자연산 망간광석($d_p=0.359$ mm)과 flotsam으로 PMMA($d_p=0.359$ mm)의 유속에 따른 높이별 압력강하값을 나타낸 그림이다. 이때도 Fig. 5와 같이 유속에 따라 측정위치에 관계없이 압력강하값이 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 Fig. 8의 경우에도 Fig. 6과 같이 층하부와 상부에서 각기 다른 압력강하의 변화값을 나타낸다.

이상의 결과에서 살펴보면 flotsam rich계와 jetsam rich계가 각기 다른 거동을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이성분계에 대한 계의 구분은 부피비로 하며 이와 같은 부피비 구분으로 인하여 flotsam rich계에서는 층내의 flotsam의 부피비가 50% 이상이 되어도 무게비로는 jetsam에 비하여 작다. 따라서 jetsam에 의한 영향을 더욱 크게 받게 된다. 또한 이성분계에서의 각 입자의 부피 특성에 의하여 거동의 특성이 나타나게 되며 이때에 무게비에 따른 압력강하가 일어나기 때문이다.

따라서 동일 입자크기의 밀도차가 있는 이성분계에서의 입자의 무게에 따라 나타나는 압력강하를 이용하여 입자계의 jetsam과 flotsam의 입자분포비를 알아낼 수 있으며 압력요동특성치 중의 압력강하값의 변화 곡선으로 유동층의 혼합상태를 관측할 수 있다.

3-2. 크기 및 밀도차가 있는 이성분계의 jetsam rich계와 flotsam rich계 구분

Fig. 9는 jetsam으로 모래($d_p=0.715$ mm)와 flotsam으로는 PMMA($d_p=0.359$ mm)의 이성분 혼합물을 대상으로 jetsam rich계에 대한 유속에 따른 압력강하 값을 나타낸 그림이다. 앞에서 동일 입자크기계는 유속 증가에 따라 층 팽창의 증가와 이에 따른 공극률의 증가로 인하여 층내의 압력강하가 감소된다. 그러나 본 계에서와 같이 입자크기 차이가 있는 상태에서는 혼합의 증가와 함께 공극률의 감소가 일어나고 이에 따라 층간의 압력강하값이 증가하게 된다. 또한 층 위치별로는 층하부와 층상부의 압력강하값이 동일 입자크기의 혼합과는 다른 경

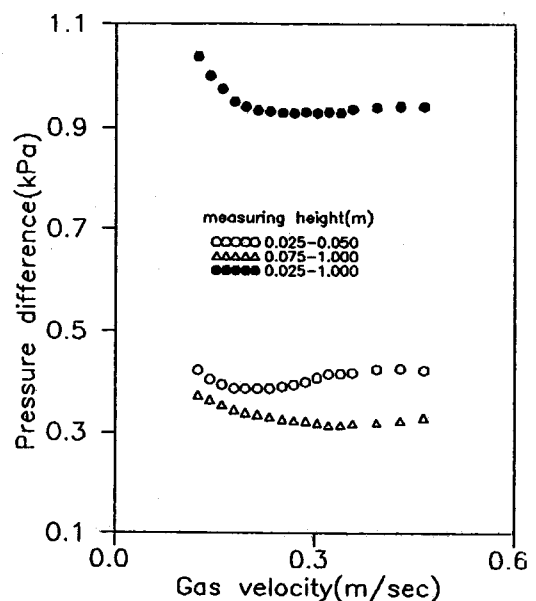


Fig. 7. Pressure difference for bed region with gas velocity (Manganese ore; 0.359 mm, 70 vol%, PMMA; 0.359 mm, 30 vol%).

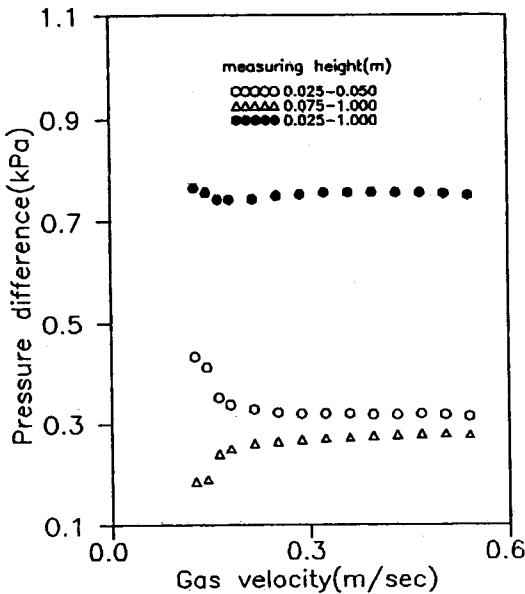


Fig. 8. Pressure difference for bed region with gas velocity (Manganese ore; 0.359 mm, 50 vol%, PMMA; 0.359 mm, 50 vol%).

향을 나타내고 있다. 즉, 층하부에서는 균일 입자계와 다르게 유속 증가에 따른 측정위치별 증가와 감소가 확연히 나타나고 있지 않다. 이와 같은 경향은 같은 입자를 사용한 flotsam rich 계에서의 경향을 나타낸 Fig. 10에서도 잘 나타나 있다. Fig. 10에서 층 전체에서 나타난 압력강하값을 살펴보면 유속의 증가와 함께 급격한 압력강하의 증가가 일어나고 있다. 이는 층내의 이성분 입자간의 혼합이 일어나는 전이점에서 발생되는 것이며 flotsam rich계에서는 혼합도가 유속에 대하여 어느 특정 유속에서는 급격한 증가를 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 Nienow 등[3]과 Cheung 등[10]의 결과에서도 나타나고 있으며 이때에 혼합도는 sigmoidal한 형태를 나타낸다. 따라서 층 전체의 압력강하값이 특정 유속에서 급격한 증가를 나타내고 있고, 이와 같은 특정 유속에서 발생하는 전이점이 바로 혼합도의 증가점을 나타내고, 동시에 Nienow 등[3]이 발표한 take over velocity를 나타낸다.

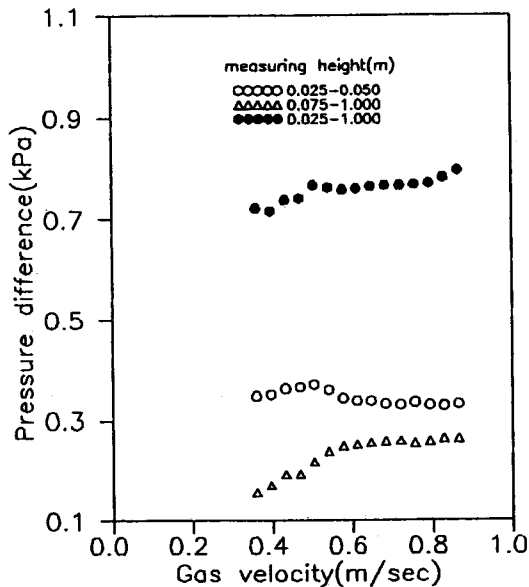


Fig. 9. Pressure difference for bed region with gas velocity (Sand; 0.715 mm, 70 vol%, PMMA; 0.359 mm, 30 vol%).

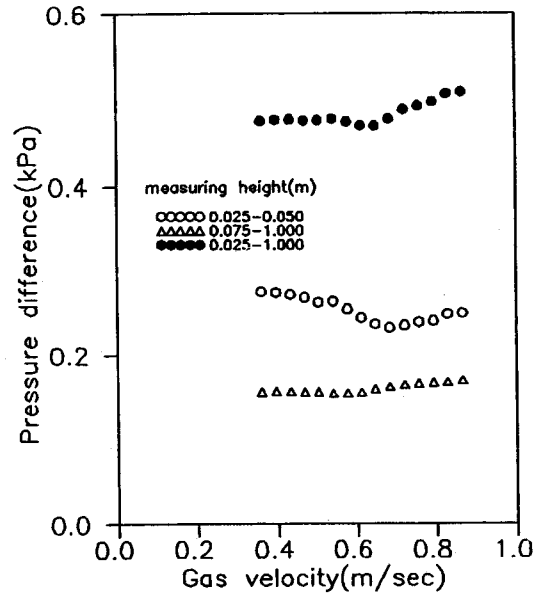


Fig. 10. Pressure difference for bed region with gas velocity (Sand; 0.715 mm, 30 vol%, PMMA; 0.359 mm, 70 vol%).

반면에 앞 절에서 논의된 jetsam rich계와 flotsam rich계의 구분은 크기가 동일한 경우에는 압력강하값의 위치에 따른 감소와 증가를 나타내는지의 여부로써 각 계를 구분하였으나 이와 같이 크기 차이가 존재하는 경우는 층상부에서는 항상 증가가 발생하며, 층하부에서 감소가 발생한다. 이러한 경우에 앞 절에서 논의된 압력강하 값의 변화에 의한 구분이 어렵게 되므로 이와 같은 경우에 대한 새로운 판별 방법이 제시되어야 한다. Fig. 9와 10을 층 위치에 따라 살펴보면 jetsam rich계에서는 층상부의 압력강하값의 변화가 층하부의 변화값에 비하여 크게 나타나고 있으며, flotsam rich계에서는 층하부의 변화값이 층상부에 비하여 크게 나타나고 있다. 이와 같은 변화는 flotsam rich계와 jetsam rich계의 구분은 이성분계에서의 flotsam과 jetsam의 부피비율에 의한 것이며 이와 같은 부피비에 따라서 층상부와 하부에 존재하는 각 입자의 부피비의 변화가 발생되나 이때 jetsam 입자에 의하여 무게특성이 좌우되며 이러한 무게 특성에 의하여 압력강하값이 크게 영향을 받게 되기 때문이다.

3.3. 층내 입도분포와 압력강하의 관계

입자로의 에너지 전달량의 측정으로 유동층의 질을 판별할 수 있다. 유동화 기체에 의한 에너지 전달량은 입자 항력에 의한 마찰로 발생하는 압력강하로써 측정될 수 있다. 이제까지 많은 연구자들이 이와 같은 관계로부터 균일입자계의 최소유동화속도, 기포 분율, 공극률 등을 계산할 수 있는 식을 제시하였다[11-17]. 본 연구에서는 많은 연구자들에 의하여 균일 입자계에서 제시된 관계식을 사용하여 이성분 입자계의 혼합도와 혼합의 정도를 나타낼 수 있는 방법을 제시하기 위하여 층내의 압력강하, 혼합도, 입자의 물리적 특성치를 이용하여 다음과 같은 관계를 구하고자 하였다.

Fig. 11은 모래(0.715 mm, 50 vol%)와 PMMA(0.715 mm, 50 vol%)인 혼합물의 층 위치에 따른 측정된 압력강하값과 앞의 (2)식으로 계산된 압력강하값을 나타낸 그림이다. 식 (2)로 계산된 압력강하값은 두 입자의 물성치를 이용하여 jetsam과 flotsam의 Re 값과 Ar 값을 각각 구하고 이를 이용하여 F_j , F_f 를 구한다.

$$\Delta P = (1 - \epsilon_f) \Delta H (\rho_s - \rho_g)$$

$$(1 - \epsilon_f) = (1 - \delta)(1 - \epsilon_{mf})$$

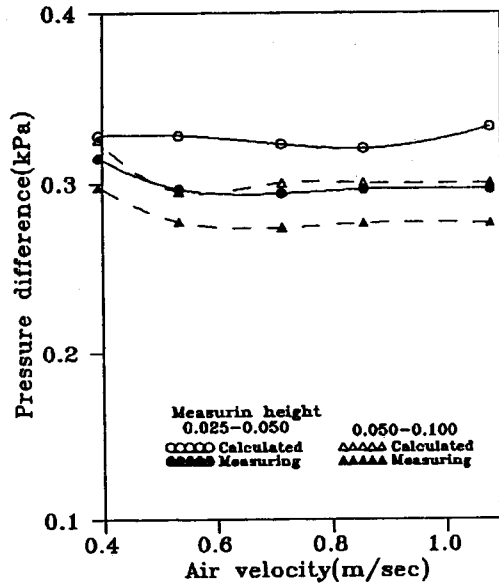


Fig. 11. Pressure difference for bed region with air velocity(sand; 0.715 mm, 50 vol%, PMMA; 0.715 mm, 50 vol%).

$$\rho_s = \rho_j X_j + \rho_F X_F$$

$$\epsilon_{mf} = \epsilon_{mff} (1 - X_j) + \epsilon_{mfj} X_j \quad (2)$$

$$F_j^* = \frac{Re_j}{\epsilon_{mff} \phi_j^2 Ar_j} \left[150 \frac{1 - \epsilon_{mff}}{\epsilon_{mff}} + 1.75 \phi_j Re_j \right]$$

$$F_F^* = \frac{Re_F}{\epsilon_{mff} \phi_F^2 Ar_F} \left[150 \frac{1 - \epsilon_{mff}}{\epsilon_{mff}} + 1.75 \phi_F Re_F \right] \quad (3)$$

F_j^* , F_F^* 와 유동층내 분산판으로부터 위치에 따른 입자분포 데이터를 이용하여 F^* 를 구한다.

$$F^* = F_j^* X_j + F_F^* (1 - X_j) \quad (4)$$

이와 같이 구하여진 F^* 를 이용하여 층내에 기포 분율을 구한다.

$$\delta^* = 0.11 (F^* - \delta - 1)^{0.34} \quad (5)$$

이와 같이 구하여진 기포 분율과 최소 유동화 상태에서 공극률을 이용하여 위 (2)식을 이용하여 압력강하를 구하였다.

Fig. 11에서 식 (2)의 계산으로 얻은 압력강하값과 실제 측정된 압력강하값이 편차를 나타내면서 경향성은 일치하게 나타나고 있다. 그림에서 계산 값은 Losfstrand 등[12]이 제시한 입자의 항력을 입자의 물성치들로부터 계산하고, 층내에 기포 크기를 구하는 경험식을 사용하여 층내에 공극률을 계산하므로써 층내에 압력강하값을 계산한 값이다.

본 연구의 이성분계에 대하여는 각 조업조건에서 측정한 측방향분포 데이터로부터 각 지점에서의 공극률을 계산하고 이로부터 각 위치의 압력강하를 계산하였다. 그림에서와 같이 두 값이 잘 일치하고 있음이 나타나고 있으며 또한 층 위치별 값도 잘 일치한다. Fig. 12는 같은 방법으로 jetsam입자 혼합비가 30%인 경우에 대하여 실선은 위의 식에서 구한 공극률과 측정된 압력강하를 이용하여 구한 공극률을 나타낸 것으로 측정값과 일치함을 나타낸다. Losfstrand 등[12]이 제시한 입자의 물리적 특성치로부터 구한 기포분율값은 이성분계 유동층의 기포 분율을 예측할 수 있고, 이성분계 유동층에서 압력강하와 층내 공극률의 관계로부터 얻은 압력강하값이 잘 일치

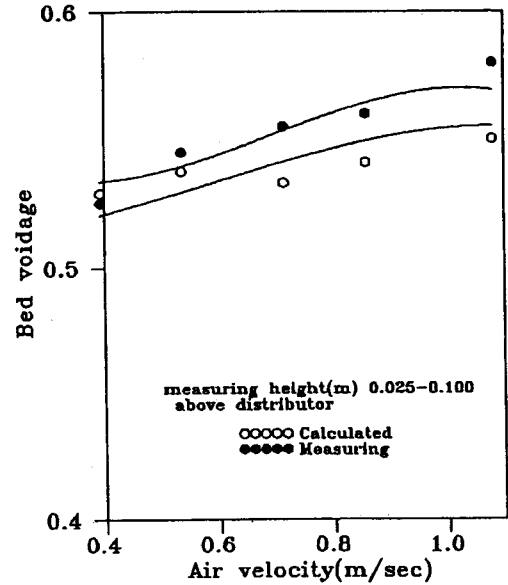


Fig. 12. Bed voidage according to air velocity(sand; 0.715 mm, 30 vol%, PMMA; 0.715 mm, 70 vol%).

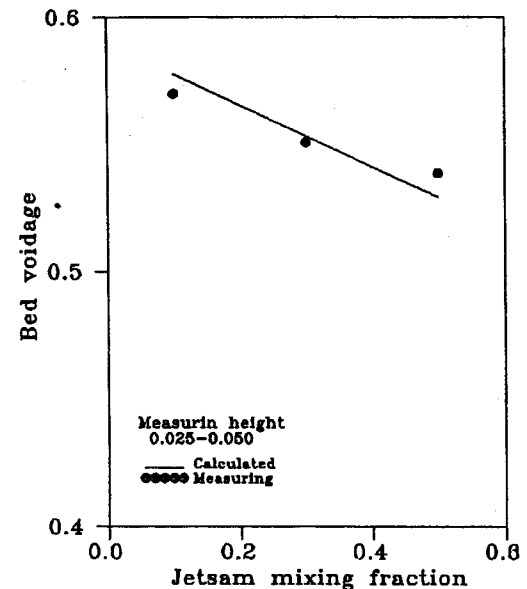


Fig. 13. Bed voidage according to jetsam fraction($U=0.393$ m/sec).

함을 알 수 있었다.

Fig. 13은 jetsam의 혼합비에 따라 압력강하를 측정하여 구한 공극률과 계산으로 구한 공극률이 위치와 혼합비에 따라 일치함을 알 수 있다. 따라서 층의부에서 유속에 따라 측정된 압력요동특성치 중의 평균압력으로부터 층내 입자의 분포를 예측할 수 있고, 층내 혼합정도와 유동화상태를 예측할 수 있었다.

4. 결 론

이상의 밀도차가 있는 이성분계에 대한 실험에서 flotsam rich계와 jetsam rich계에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 밀도차가 있는 이성분계의 flotsam rich계와 jetsam rich계의 구분은 유속에 따른 압력강하 곡선의 변화로 알 수 있었다.

(2) 크기차가 없고 밀도차가 존재하는 flotsam rich계는 층하부에 서는 유속의 증가에 따라 jetsam이 층상부로 take-over 되고 이에 따라 유속증가와 함께 압력강하가 감소되며, jetsam rich계에서는 jetsam에 의한 효과가 지배적이므로 층상부와 하부에서 층 팽창에 의한 압력강하값의 감소만을 나타낸다.

(3) 크기차와 밀도차가 있는 이성분계에서는 유속의 증가에 따른 혼합의 증가와 더불어 공극률의 감소가 발생되어 층 전체의 압력강하값이 증가되고, 유속에 따른 층하부와 상부의 압력강하값의 비교로써 jetsam rich계와 flotsam rich계의 구분이 가능하다.

(4) 압력강하 값은 층내의 무게 변화에 의한 것이므로 압력강하 곡선의 변화값과 제시된 식을 이용하여 층내의 혼합도를 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

감 사

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구과제(92-26-00-02)연구비 지원에 의해 이루어진 연구결과의 일부이며 연구비를 지원해주신 당 재단에 감사드립니다.

사용기호

Ar	: Archimedes number [-]
D	: bed diameter [m]
d_p	: particle diameter [mm]
F^*	: dimensionless drag force [-]
g	: acceleration of gravity [m/sec ²]
H	: bed height [m]
H_f	: bed height at fluidization state [m]
h	: height above distributor [m]
L	: static bed height [m]
P	: pressure [kPa]
Re	: Reynolds number [-]
U	: superficial gas velocity [m/sec]
U_{mf}	: minimum fluidization velocity [m/sec]
X	: fraction of particle [-]

그리스 문자

δ	: bed expansion ratio [-]
ϵ	: bed voidage [-]
ϵ_{mf}	: bed voidage at minimum fluidization velocity [-]
ρ_g	: gas density [kg/m ³]

ρ_p	: particle density [kg/m ³]
ϕ	: shape factor, sphericity [-]

하첨자

J	: jetsam
F	: flotsam

참고문헌

1. Chiba, S., Chiba, T., Nienow, A. W. and Kobayashi, H.: *Powder Technol.*, **22**, 255(1979).
2. Hiramata, T., Tomita, M., Chiba, T. and Kobayashi, H.: *Int. Chem. Eng.*, **24**, 502(1984).
3. Nienow, A. W., Rowe, P. N. and Cheung, L. Y. L.: *Powder Technol.*, **20**, 89(1978).
4. Peeler, J. P. K. and Huang, J. R.: *Chem. Eng. Sci.*, **44**, 1113(1989).
5. Rowe, P. N., Nienow, A. W.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **50**, 324 (1972).
6. Choi, J.-H., Yi, C.-K. and Son, J.-E.: *Korean J. Chem. Eng.*, **7**(4), 306(1990).
7. Seo, Y. C., Ko, M. H. and Kang, Y.: *Korean J. Chem. Eng.*, **9**(4), 212(1993).
8. Jang, H. T., Hong, S. C. and Doh, D. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **33**(3), 353(1995).
9. Chiba, S.: *Powder Technol.*, **26**, 1(1980).
10. Cheung, L., Nienow, A. W. and Rowe, P. N.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 1031(1974).
11. Cooper, G. R. and McGillem, C. D.: "Probabilistic Methods of Signals and System Analysis", Holt, Rinehart and Winston Inc. (1971).
12. Löfstrand, H., Almstedt, A. E. and Andersson, S.: *Chem. Eng. Sci.*, **50**, 245(1995).
13. Campos, J. B. L. M. and Guedes de Carvalho, J. R. F.: *Chem. Eng. Sci.*, **47**, 4057(1992).
14. Johnsson, F., Andersson, S. and Leckner, B.: *Powder Technol.*, **68**, 117(1991).
15. Olowson, P. A. and Almstedt, A. E.: *Chem. Eng. Sci.*, **47**, 357 (1992).
16. Mayrhofer, B. and Neuzil, L.: *Collection Czechoslov., Chem. Commun.*, **42**, 1502(1977).
17. Naor, P. and Shinar, R.: *Ind. Eng. Chem. Fundamentals*, **2**, 278 (1963).