

## 유동층에서 밀도가 다른 이성분 입자계의 flotsam의 유출

장현태 · 차왕석\* · 도동섭†

고려대학교 공과대학 화학공학과  
\*군산대학교 공과대학 환경공학과  
(1995년 3월 2일 접수, 1995년 7월 29일 채택)

### The Elutriation of Flotsam from Binary System with Different Density in a Fluidized Bed

Hyun Tae Jang, Wang Seog Cha\* and Dong Sup Doh†

\*Dept of Environ. Eng., Kunsan Nat'l University  
Dept. of Chem. Eng., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea  
(Received 2 March 1995; accepted 29 July 1995)

#### 요 약

밀도차이가 있는 이성분계를 대상으로 jetsam의 입도분포에 따른 flotsam입자의 유출특성을 연속식 유동층에서 고찰하였다. 본 실험에서 jetsam으로는 모래를 사용하였고, flotsam으로는 PMMA(poly methyl metacrylate)를 사용하였다. Jetsam의 입도분포에 따른 flotsam의 유출속도, 유출입자의 입도분포, 층내 압력요동특성치를 측정하였는데, flotsam 입자의 비산 유출은 jetsam입자의 입도분포에 크게 영향을 받음을 알 수 있었으며 이러한 결과를 이용하여 jetsam의 입도분포를 조절하므로써 미세입자의 유출을 일부 제어할 수 있었다. Jetsam과 flotsam입자들의 입도분포에 따라 유동층의 유동화 특성이 크게 달라지며 이러한 유동화 특성은 압력요동 특성치인 표준편차로써 해석할 수 있었다.

**Abstract**—The elutriation characteristics of flotsam for the size distribution of jetsam were investigated in continuous binary system with different density in a fluidized bed. In a fluidized bed of sand and PMMA(poly methyl metacrylate), sand was used as jetsam and PMMA as flotsam. Elutriation rate of flotsam, size distribution of elutriated particles and pressure fluctuations were measured for the size distribution of jetsam and elutriation rate of flotsam depended largely on the size distribution of jetsam. Using these results, it was found that elutriation of fine particles was partially reduced by controlling size distribution of jetsam. Fluidization characteristics were greatly influenced by the size distribution of jetsam and flotsam and these characteristics could be interpreted with standard deviation of pressure fluctuations.

*Key words: Fluidized Bed, Elutriation, Binary System, Flotsam*

#### 1. 서 론

유동층 반응기는 고체를 다루는 다른 계에 비하여 많은 장점을 가지고 있다. 반응기 내에서 고체가 액체와 같이 거동하므로 연속 조업이 가능하고, 열 및 물질전달의 우수성으로 인하여 현재 많은 분야에서 반응기로 사용하기 위한 시도가 이루어지고 있다. 이러한 유동층 반응기에서 반응에 가장 영향을 주는 인자는 혼합과 유출인데, 이 중 유출은 유동층 반응기에서 고체 반응물의 손실을 초래하고, 공해문제를 야기시킬 뿐만 아니라 층내물질의 양, 조성 그리고 층하부 배출까지도 변화시켜 유동층의 공업적 이용 및 안정한 조업을 크게 위협하고 있으므로 이의 해결이 절실한 실정이다.

유동층에서 미세입자의 유출을 각 단계별로 살펴보면 층 표면에서 기포의 파괴에 의한 층상부로의 분출(project)현상이 먼저 일어나고, 그다음 분출된 입자가 기체의 공탑속도 이하의 종말속도를 갖는

입자의 대부분은 freeboard로 상승하게 되고, 공탑속도 이상의 종말속도를 갖는 입자는 대부분 다시 유동층으로 되돌아오게 된다. 이 때 분출시 큰 에너지를 갖고 있던 입자들은 freeboard를 통하여 유출이 일어나고 적은 에너지를 갖고 있던 입자는 대부분 다시 유동층으로 돌아오게 된다.

이와 같이 유출에 영향을 주는 인자들로는 최소유동화속도, 공극률, 층높이, 공탑속도 등[1-5]이 있고, 각 인자들에 대한 영향을 많은 연구자들은 회분식계에서 실험을 수행하여 각 인자들에 대한 유출의 영향을 다양한 무차원군을 사용하여 수식화하였다[6, 7]. 그러나 회분식계에서의 실험은 시간에 따라 층내의 조성이 변하므로 항상 비정상상태에서 조업이 이루어지고 있으므로 실제 정상상태에서 조업되는 연속계에 적용하기는 어려운 상태이다.

현재 유동층소각로는 슬러지연소, 유·무연탄 혼합연소, 도시폐기물소각 등 다양한 분야에서 활발히 적용되고 있으며 이렇게 적

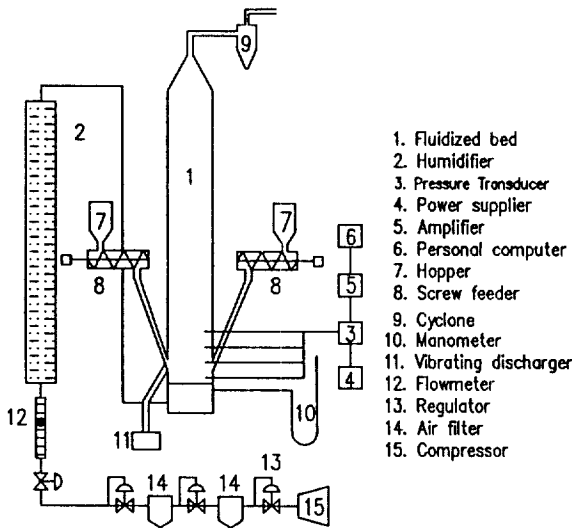


Fig. 1. Experimental facilities and data processing system.

용되고 있는 분야는 대부분이 유동화되는 층물질과 실제반응을 야기시키는 반응물과의 밀도 및 크기차가 발생하는 경우이다. 이러한 밀도 및 크기차는 적용되는 조업조건에서 층내물질간의 층분리와 입자유출을 야기시켜 반응기의 효율저하와 공해문제를 일으키는 주 요인으로 작용하게 된다.

본 실험에서는 산업적으로 이용되고 있는 유동층연소로에서와 유사한 밀도 및 입자크기차이가 있는 연속식에서 조업유속, 초기 유동화 물질의 입자크기, 주입물질의 입도분포를 변화시키면서 층내 혼합특성, 유출속도, 유출입자의 평균크기 등을 구하여 이를 압력요동 특성치와 상호연관시켜 유동층연소로의 연소공정해석에 필요한 기초자료를 제시하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2-1. 실험장치

본 실험에 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같으며, 유동층부, 시료주입 및 배출부, 측정부로 구성되어 있고, 15 hp의 공기압축기를 이용하여 유동층에 공기를 공급하였다. 유동층에 공기가 유입되기 전에 유입공기의 damping을 막기 위하여 정압기를 설치하였고, 유속은 유량계와 니들밸브를 이용하여 조절하였다. 유동층기벽과 입자간의 정전기현상을 줄이기 위하여 내경 0.109 m, 높이 1.1 m의 아크릴관에 원통형 stainless steel망을 충전시키고 물을 넣은 증습기를 설치하여 유입공기의 상대습도가 50%를 유지하도록 하였다. 유동층부는 내부를 관측할 수 있도록 아크릴로 제작되었으며, 내경 0.109 m, 높이 1.8 m이다. 기체분산판은 지름 1 mm의 구멍 345개가 뚫린 perforated type이며 개공비는 3%이다. 유동층 외벽에는 압력전달기 (pressure transducer, PT) probe의 측정위치를 변경할 수 있도록 외경 10 mm, 길이 10 mm 아크릴관을 사용하여 분산판으로부터 25 mm 간격으로 4개의 측정관을 설치하였다.

시료주입부는 PMMA와 모래의 공급을 위하여 공급관을 유동층부의 하부에 설치하여 각각 분리 공급하였고, 시료의 주입을 위하여 사용된 시료공급기는 시료의 일정한 공급과 공급기 내부에서 주입입자의 분쇄를 막기 위하여 spring screw feeder를 사용하였다. 층하부에 배출량을 조절할 수 있는 진동배출기를 설치하여 층내의 유동화 물질이 항상 일정하게 유지할 수 있게 하였다. 유동층상부

에는 비산유출되는 입자를 포집하기 위해 Lapple type의 cyclone을 설치하였다.

측정부는 압력요동을 측정할 수 있는 압력전달기(Valcom Co. LTD., model VPRN, working capacity 1 psi)와 압력전달기를 시동시키기 위한 전원 공급기 및 측정된 압력요동신호를 전환시켜주는 A/D convertor와 전환된 신호를 통계처리할 수 있는 computer부분으로 구성되어 있다. 압력전달기의 측정관을 유동층내에 삽입하기 위하여 외경 4 mm, 내경 3 mm, 길이 0.4 m의 stainless steel관을 사용하였고, 유동층내의 유동화물질이 측정관으로 들어가는 것을 방지하기 위하여 측정관의 끝 부분을 400 mesh망으로 봉하였다.

### 2-2. 실험방법

Flotsam으로는 PMMA, jetsam으로는 모래를 사용한 밀도차가 있는 이성분계에서 유출특성을 조사하였다.

사용한 flotsam과 jetsam의 밀도 및 입자크기비와 입도분포에 따라 층내 유동화기동 및 유출속도가 상당히 영향을 받으므로 이를 정량적으로 해석하고자 flotsam으로 작용하는 PMMA의 분포는 전 실험에 걸쳐 일정하게 유지한 상태에서 jetsam의 입자크기와 입도분포를 변경시키면서 유출속도, 압력변화 등을 측정하였다.

이 때 사용한 jetsam은 0.715 mm, 0.505 mm, 0.359 mm의 크기를 갖는 균일 입자계와 두 종류의 분포를 갖는 다입자계를 포함하여 5종류이다.

실험은 먼저 초기유동화물질을 유동층에 L/D가 1이 되도록 한 후 일정유속으로 유동화시킨 후 일정한 분포를 갖는 시료를 spring screw feeder에 의해 연속적으로 공급하고 또한 층하부로 진동배출기로 배출하였다.

정상상태에 도달한 후 유출률, 압력요동신호, 유출입자의 채취를 할 수 있으므로 정상상태의 판정이 중요하다. 따라서 본 실험에서는 유동층의 층하부로 배출되는 입자, 유출되는 입자의 양과 입도가 일정하여지고, 층내의 압력변화의 표준편차 및 평균압력이 일정하여지는 시간 및 평균채취시간 실험을 통하여 정상상태 도달시간을 결정하였다. 유동층이 정상상태에 도달한 이후 유출되는 입자(모래와 PMMA 혼합물)를 유동층 상부에 설치된 cyclone을 통하여 포집하고 포집된 모래와 PMMA입자를 각각 분리 및 체분석하여 유출속도와 유출입자의 입도분포를 구하였다. 이와 아울러 유동층내에 설치된 4개의 압력전달기로부터 압력요동특성치를 측정하였다.

유동층에서 압력요동의 측정은 sampling theorem의 정의를 이용하여 sampling time은 10 ms로 하였으며, sampling data의 갯수는 1024개로 하였다. 본 실험에서 분석에 사용한 압력요동의 통계적 처리는 아래와 같다. 표준편차는 압력요동의 동적성분으로서 variance of the positive square root이며, data signal의 intensity를 의미하며 식 (1)과 같이 표현된다[6].

$$S.D. = \left[ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \{X(t) - \mu_x\}^2 dt \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$\mu_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt \quad (2)$$

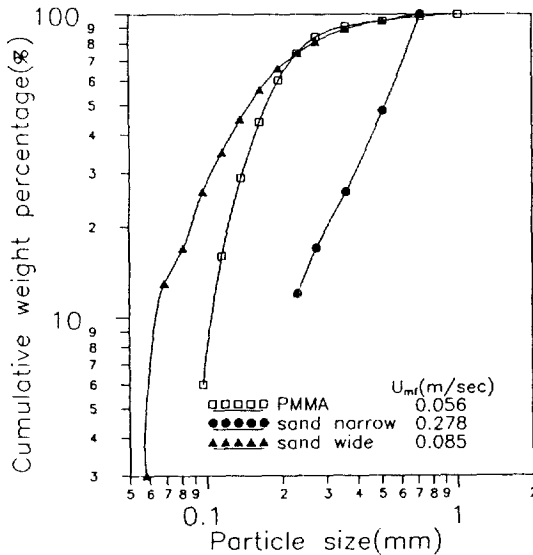
실험 조건은 Table 1에 나타내었다.

### 2-3. 시료

본 실험에 사용한 시료는 jetsam으로는 시멘트 몰탈 압축강도

**Table 1. Experimental conditions**

Aspect ratio(L/D)	1
Sand feeding rate(kg/hr)	2.40
PMMA feeding rate(kg/hr)	1.02
Superficial gas velocity(m/sec)	0.52, 0.65, 0.74, 0.83
Particle size of jetsam(mm)	0.359, 0.505, 0.715, multi-sized
Particle size of flotsam(mm)	multi-sized



**Fig. 2. Size distribution of feeding particles.**

시험용 모래인 주둔진 표준사( $\rho_p = 2620 \text{ kg/m}^3$ )를 사용하였고, flotsam으로는 PMMA( $\rho_p = 1190 \text{ kg/m}^3$ )를 사용하였다. 모래와 PMMA 모두 Geldart의 분류로 Group B에 속하며[9], 사용된 각 시료의 입도분포는 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2의 각 입도와 jetsam 균일 입자의 최소유동화속도 및 각각의 jetsam과 Fig. 2의 PMMA 입도의 혼합물의 최소유동화속도를 Table 2에 나타내었다.

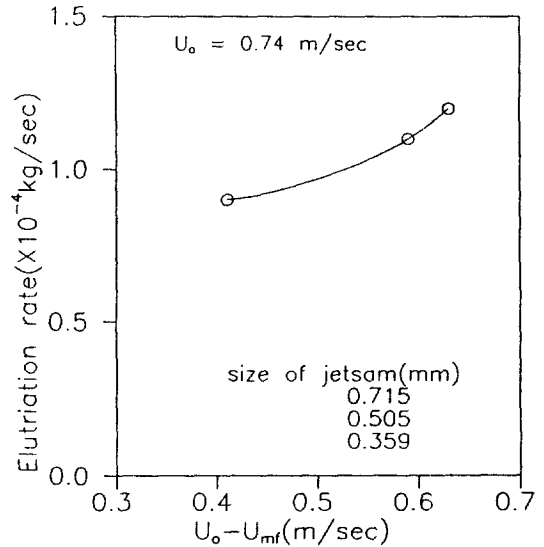
### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. Jetsam의 입자크기에 따른 flotsam의 유출

이성분계 연속식 유동층에서 기포의 크기와 유동화정도는 밀도 및 입자크기에 의존하며 이러한 기포의 크기와 유동화정도는 결국 유동층의 유출속도에 크게 영향을 미치게 된다.

Flotsam과 jetsam으로 작용하는 입자들의 밀도 및 입자크기에 따른 유출속도를 정량적으로 파악하고자 flotsam으로 작용하는 PMMA 분포를 일정하게 유지한 상태에서 jetsam의 입자크기에 따른 유출 속도와 유출된 입자의 입도분포를 Fig. 3-5에 나타내었다.

Fig. 3은 Fig. 2의 입도분포를 가진 PMMA를 주입한 상태에서 각



**Fig. 3. Variation of elutriation rate with  $U_o - U_{mf}$  according to size of jetsam particles.**

jetsam의 입자크기에 따른 유출속도를 나타낸 그림이다. 이 때 사용한 jetsam은 균일입자계이며 입자크기는 0.715 mm, 0.505 mm, 0.359 mm의 세 경우이다. Jetsam으로 작용하는 모래의 입자크기가 감소할수록 유출속도는 증가하였는데 이는 다음과 같이 설명될 수 있다. 이성분계 유동층에서 jetsam의 입자크기가 변하게 되면 층 내에서 유동화되는 flotsam과 jetsam의 혼합도 즉 입도분포가 변하게 된다. 유동화물질의 분포의 변화는 층내 공극률, 기포의 크기 및 최소유동화 속도의 변화를 야기시켜 층내 거동을 변화시키며 이러한 층내 거동의 변화는 궁극적으로 유출속도의 변화를 일으킨다. 그런데 이러한 유출속도의 변화에 대한 기존의 연구들은 공탐속도와 최소유동화속도의 비 즉 층내 이동성의 비로써 설명하거나 혹은 공탐속도에서 최소유동화속도를 뺀 과잉공기 즉 기포상태로 유동층을 빠져나가는 기체의 양으로 설명하였다. 본 실험에서의 결과는 jetsam의 입자크기가 감소함에 따라 층내 유동화 물질의 평균입경이 감소하게 되며 이에 따라 층내  $U_{mf}$ 도 감소하게 된다. 이로 인하여 동일한 공탐속도에서  $U_o/U_{mf}$ 는 증가하게 되며 이러한  $U_o/U_{mf}$ 의 증가는 기포크기, 기포함체의 빈도수 그리고 층내 입자의 이동성을 증가시키기 때문에 유출속도 또한 증가하게 된다.

Fig. 4는 층내 유동화입자의 이동성 증가에 의한 유출속도의 영향을 조사하기 위해 유출된 입자를 체분석하여 누적분포로 표시한 그림이다. 비산유출된 입자 중에서 입자크기가 작을수록 jetsam입자의 크기에 보다 더 많이 영향을 받는데 이는 앞에서 설명한 바와 같이 입자가 작을수록 층내 유동화물질의 분포, 공극률, 이동성의 비에 보다 더 민감하기 때문이다. 즉, 층내의 주입입자의 평균크기가 커짐에 따라 상대적으로  $U_o/U_{mf}$ 가 증가하고 층내에서 분출되는 양이 증가하나 유출입자의 입도분포로 보면 입경이 작은 입자의 유출은

**Table 2. The minimum fluidization velocity of binary mixture**

Mixture type	Sand uniform 0.715 mm	Sand uniform 0.505 mm	Sand uniform 0.359 mm	Multi-sized PMMA	Narrow sand
$U_{mf}$ (m/sec)	0.360	0.202	0.119	0.056	0.278
Wide sand	Sand 0.715 mm + Multi PMMA	Sand 0.505 mm + Multi PMMA	Sand 0.359 mm + Multi PMMA	Narrow sand + Multi PMMA	Wide sand + Multi PMMA
0.085	0.330	0.151	0.114	0.174	0.054

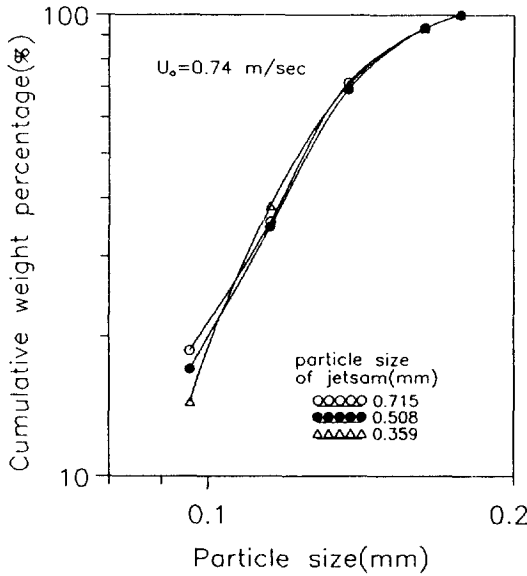


Fig. 4. Cumulative size distribution of elutriated particle with particle size of jetsam.

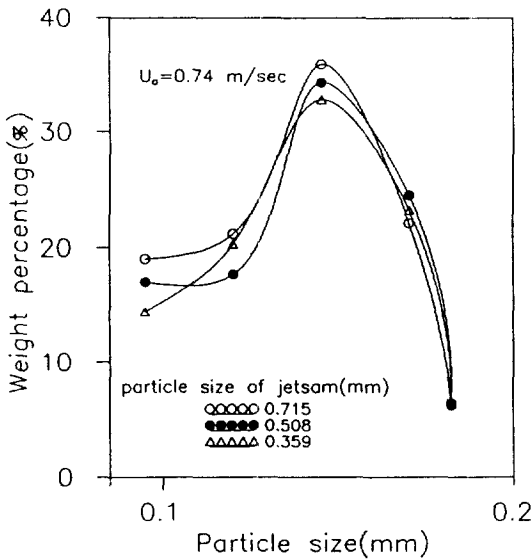


Fig. 5. Size distribution of elutriated particles with particle size of jetsam.

주입입자의 크기가 큰 경우가 작게 나타난다.

Fig. 5는 층상부로 유출된 입자들을 포집 및 체분석하고 이를 백분율로 계산하여 각 입자크기별로 나타낸 그림이다. 사용된 모래입자 크기에 따른 유출입자의 분포에서 jetsam으로 투입된 모래 입자크기의 약 1/4배되는 입자들의 유출이 가장 적게 나타났다. 이는 Cheung 등[14]이 제시한 바와 같이 입자간 크기비가 약 4배가 되는 경우 큰 입자들 사이의 공극에 작은 입자가 끼어있는 상태로 존재하므로 입자간 치밀도가 증가하기 때문이다. 이러한 현상은 유동층부에 분산판으로부터 25 mm 간격으로 설치된 압력전달기를 이용하여 측정된 평균압력으로부터 유동층부의 각 위치에서의 압력강하값을 나타낸 Table 3에서도 확인할 수 있다. Table 3은 분산판으로부터 25 mm에서 100 mm 간격에서의 압력강하값, 분산판으로부터 25 mm에서 50 mm 사이의 값, 75 mm에서 100 mm 사이의

Table 3. The pressure drop according to particle size of jetsam in binary mixture ( $U_0 = 0.74$  m/sec)

Size of jetsam particle of binary mixture (mm)	0.715	0.505	0.359
Pressure difference (kPa) (according to measuring height (mm))			
25-100	0.865	0.856	0.790
25-50	0.248	0.216	0.180
75-100	0.300	0.276	0.269

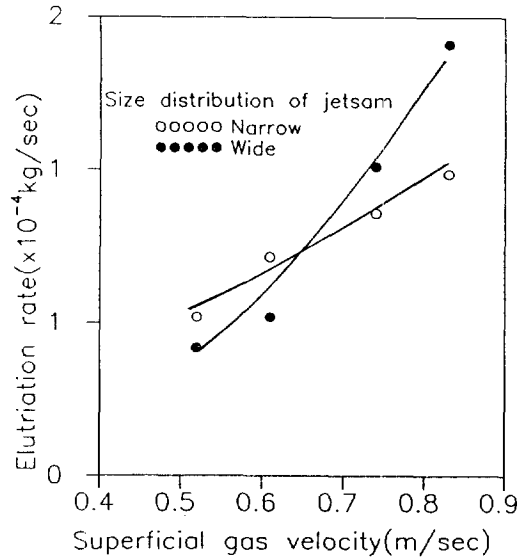


Fig. 6. Elutriation rate for the size distribution of jetsam with superficial gas velocity.

값을 나타낸 것으로써 층내 각 위치에서의 압력강하값이다. Table에서 측정위치에 관계없이 jetsam입자의 크기가 증가할수록 압력강하의 값도 증가하였다. 일반적으로 균일한 크기의 입자만을 유동화시키는 균일입자계에서는 유동화물질의 입자크기가 증가할수록 층내의 공극률이 작아지며 이로 인해 층내의 압력강하의 값도 증가하게 된다. 즉, 입자의 크기와 밀도가 상대적으로 작은 경우 최소유동화속도의 감소로  $U-U_m$  값의 증가로 층 팽창율도 증가하고 공극률의 증가를 유발하여 층내 동일 구간의 압력강하 값의 감소를 가져온다. 본 실험의 결과도 유동화물질 즉 jetsam입자의 크기가 증가할수록 압력강하의 값도 증가하였다. 이는 jetsam입자의 크기가 증가할수록 flotsam으로 작용하는 PMMA입자들이 유동화물질 사이의 공극을 메움으로서 층 내의 치밀도가 증가하였으며 이러한 PMMA에 의한 치밀도의 증가는 층내의 더욱 많은 양의 PMMA 미세입자가 존재함을 알 수 있다.

### 3-2. 다입자계에서 입도분포에 따른 유출특성

다양한 분야에서 실제적으로 적용되고 있는 유동층은 밀도 및 크기차가 있는 다입자계가 대부분이다. 따라서 균일한 크기를 갖는 모래를 jetsam으로 사용한 3-1절의 결과를 바탕으로 실제 유동층 연소소에서 jetsam으로 사용하는 입도분포와 유사한 분포를 가지는 다입자계 모래를 대상으로 조입유속 및 입도분포에 따른 유출속도, 유출된 입자의 입도분포, 압력유동 특성치를 Fig. 6-9에 나타내었다. 이 때 flotsam으로 사용한 PMMA의 입도분포는 3-1절에서 사용한 입도분포와 동일하다. Fig. 6은 jetsam의 입도분포가 넓은 경우와

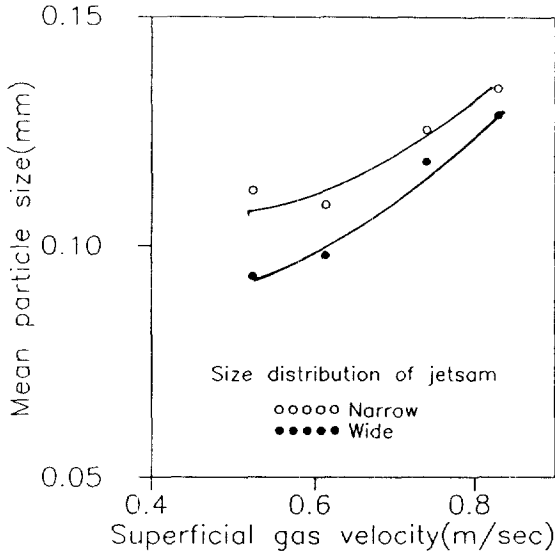


Fig. 7. Mean size of elutriated PMMA particle according to the size distribution of jetsam with superficial gas velocity.

좁은 경우에 대해 flotsam의 유출속도를 조업유속에 따라 나타낸 그림이다. 좁은 분포의 모래를 사용한 경우는 조업유속에 따라 유출속도가 점진적으로 증가하나 넓은 분포의 모래를 사용한 경우 초기의 낮은 유속에서는 유출속도가 좁은 분포의 모래를 사용한 경우보다 낮은 유출속도를 보이나 유속이 증가함에 따라 급격히 증가하여 월등히 증가된 형태를 보인다. 넓은 분포의 모래를 사용한 경우 유속에 따른 급격한 유출속도 증가현상은 다음과 같이 설명될 수 있다. Geldart 등[12]에 의하면 유동층에 미세입자들이 주입되면 gas stream에 solid loading이 증가되며 이것은 다시 기체의 carrying capacity를 증가시킨다고 하였다. 즉 유동화기체의 유속보다 낮은 종말속도를 가지는 입자들은 다음과 같이 유동화기체의 effective gas density로서 작용하게 된다.

$$\rho_r = \rho_k + \rho_s \quad (3)$$

따라서 본 실험의 넓은 분포를 가지는 모래를 jetsam으로 사용한 경우 유동화 기체의 종말속도보다 낮은 미세입자들은 유동층을 통과하면서 유동화 medium으로 작용하며 유동화기체가 dense해 지기 때문이다. 미세입자에 의한 유동화기체 density의 증가는 유속이 증가할수록 보다 더 가속되며 이러한 요인이 작용함으로 인해 유출속도가 급격히 증가하게 된다.

Fig. 7은 유출된 PMMA입자를 체분석하여 평균입자크기를 구하고 이를 조업유속에 따라 나타낸 그림이다. 그림에서 jetsam으로 좁은 분포의 모래를 사용한 경우 유출된 입자의 평균크기가 넓은 분포의 모래를 사용한 경우보다 전 유속에 걸쳐 더 큰 것으로 나타났다. 좁은 분포의 모래를 사용한 경우 입자간 공극에 있어 넓은 분포의 모래보다 커서 각 입자들 사이에 작은 PMMA입자들이 끼어들어 미세입자의 유출이 일부 제어되어 상대적으로 큰 입자들이 많이 유출되기 때문이다. 이와는 달리 넓은 분포의 모래를 사용한 경우는 주입시부터 미세입자의 모래가 큰 모래입자에 끼어 있어 PMMA입자들이 모래입자사이로 적게 끼어들게 되며 이로 인해 작은 입자들이 많이 유출되기 때문이다. 따라서 이러한 결과로부터 jetsam으로 작용하는 유동화물질의 입도분포를 조절함으로써 미세입자의 유출을 일부 제어할 수 있다. Jetsam입자들의 공극에 의한

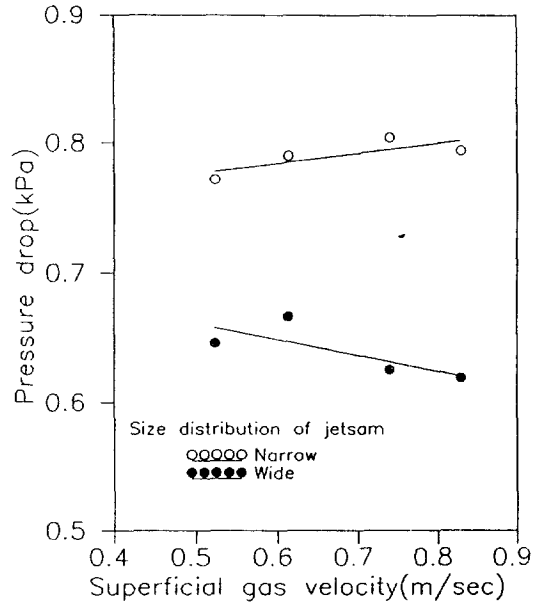


Fig. 8. Pressure drop between two position according to the size distribution of jetsam with superficial gas velocity (pressure measuring height 25 mm, 100 mm above distributor).

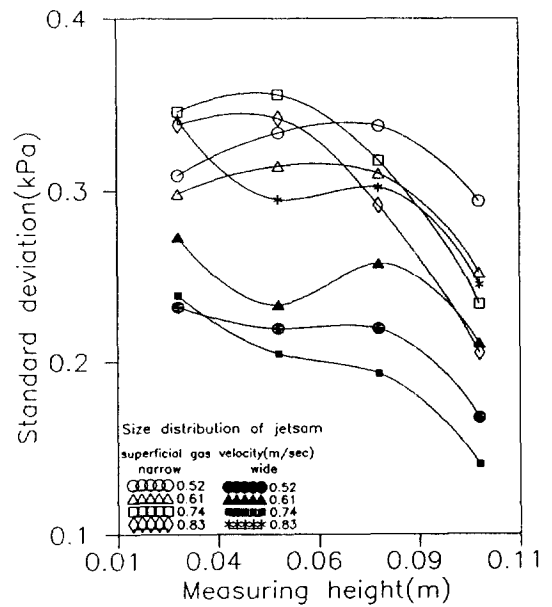


Fig. 9. Standard deviation of pressure fluctuations for the size distribution of jetsam with superficial gas velocity.

미세입자 유출제어현상은 층내 압력강하를 나타낸 Fig. 8에서도 확인할 수 있다.

Fig. 8은 유동층의 분산판 상부 0.025 m 지점부터 0.1 m 지점까지의 영역에서 발생한 압력강하값을 jetsam 입도분포에 따라 조업유속 별로 나타낸 그림이다. 그림에서 좁은 입도분포의 경우 유속이 증가함에 따라 동일구간에서 압력강하값이 증가하는 경향을 보여주나 넓은 입도분포의 경우 유속증가에 따라 감소하는 경향을 보여주고 있다. 일반적으로 유속이 증가하면 층의 팽창이 일어나 공극률이 증가하여 동일지점사이의 압력강하는 감소하나 좁은 입도분포를

사용한 경우는 이와 반대로 압력강하가 증가하는 형태를 보여주고 있다. 이는 유속이 증가함에 따라 공극률이 감소하며 이 공극을 flotsam인 PMMA입자들이 채우기 때문에 압력강하값이 증가하게 된다. 이러한 PMMA입자들에 의한 공극메움현상은 공극적으로 층내의 혼합도를 향상시킨다. 그러나 넓은 입도분포의 경우 주입시 이미 공극의 상당부분이 모래입자로 채워져 있으므로 PMMA입자들이 혼합되지 않고 층분리되는 경향을 보이므로 일반적인 경우와 같이 유속증가에 따라 압력강하도 감소하게 된다. 입도분포에 따른 jetsam과 flotsam의 혼합특성은 압력변화 특성치인 표준편차로서 해석할 수 있으며 여기서 표준편차는 층내의 에너지상태를 나타내는데 표준편차가 높다는 것은 기포와 유동화물질간의 격렬한 혼합이 일어남을 의미하나 표준편차가 낮다는 것은 이러한 혼합이 약하게 일어나고 있음을 의미한다.

Fig. 9는 jetsam의 각 입도분포에서의 압력변화의 표준편차를 조업유속에 따라 측정위치별로 나타낸 그림이다. 좁은 입도분포의 경우 유속이 증가함에 따라 층내의 혼합도가 증가하는 일반적인 경향 즉 표준편차가 증가하여 정점을 이룬 후 감소하는 형태를 보여주고 있으나 넓은 입도분포의 경우 표준편차가 감소, 증가, 감소하는 형태를 보여주고 있다. 이는 jetsam으로 작용하는 모래와 flotsam으로 작용하는 PMMA가 서로 혼합되지 않고 jetsam인 모래는 층하부로, flotsam인 PMMA는 층상부에 층을 형성하여 층분극이 일어나기 때문이며 이러한 현상은 유동화조업시 관찰할 수 있었다. 따라서 압력변화의 표준편차로서 유동층의 유동화 및 혼합특성을 파악할 수 있었다.

#### 4. 결 론

(1) 밀도차이가 있는 이성분 다입자계 유동층에서 flotsam입자의 비산유출은 jetsam 입자의 입도분포에 크게 영향을 받았으며, 이러한 결과로부터 jetsam의 입도분포를 조절함으로써 미세입자의 유출을 일부 제어할 수 있음을 알 수 있다.

(2) 입자의 유출은 층내 혼합도와 관계가 있으며 혼합도의 증가에 따라 층내 공극률의 감소를 층내 평균압력의 변화로 알 수 있고, 층내 공극률의 감소로 인하여 유출속도도 감소함을 알 수 있다.

(3) Jetsam과 flotsam입자들의 입도분포에 따라 유동층의 유동화 및 혼합특성이 크게 달라지며 이러한 특성들은 압력변화의 표준편차로서 측정 및 해석할 수 있다.

#### 감 사

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구과제(92-26-00-02)연구

비 지원에 의해 이루어진 연구결과의 일부이며 연구비를 지원한 한국과학재단에 감사드립니다.

#### 사용기호

- S.D. : standard deviation of pressure fluctuations [kPa]
- T : observation time [sec]
- t : time [sec]
- $U_o$  : superficial gas velocity [m/sec]
- X(t): sample time history at time t
- $\mu_x$  : mean pressure [kPa]
- $\rho_p$  : particle density [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_e$  : effective gas density [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_g$  : gas density [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_s$  : solids loading in exit gas [kg/m<sup>3</sup>]

#### 참고문헌

1. Chen, T. P. and Saxena, S. C.: Proc. Second Eng. Foundation Conference, Cambridge University Press, 151(1978).
2. Tanaka, I., Shinohara, H., Hirose, H. and Tanaka, Y.: *J. of Chem. Eng. of Japan*, **5**(1), 51(1972).
3. Saxena, S. C. and Jadav, S.: *Powder Technol.*, **36**, 61(1983).
4. Geldart, D.: *Powder Technol.*, **6**, 201(1972).
5. Choi, J. H., Son, J. E. and Kim, S. D.: *J. of Chem. Eng. of Japan*, **22**(6), 597(1989).
6. Wen, C. Y. and Chen, L. H.: *AIChE J.*, **28**(1), 117(1982).
7. Hazlett, J. D. and Bergougnou, M. A.: *Powder Technol.*, **70**, 99(1992).
8. Bendart, J. S. and Piersol: "Random Data", John Wiley, New York(1971).
9. Geldart, D.: *Powder Technol.*, **7**, 285(1973).
10. Gabor, J. D.: *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, **62**(67), 35(1965).
11. Baeyens, J., Geldart, D. and Wu, S. Y.: *Powder Technol.*, **71**, 71(1992).
12. Geldart, D., Cullinan, J., Georgiades, S., Gilvray, D. and Pope, D. J.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **57**, 269(1979).
13. Sciazko, M., Bandrowski, J. and Raczek, J.: *Powder Technol.*, **66**, 33(1991).
14. Cheung, L., Ninow, A. W. and Rowe, P. N.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 1301(1974).