

상온 2단 선회류 유동층 연소로에서 미세입자의 비산유출속도에 대한 상단 가스공압속도의 영향

신용섭[†] · 장정국* · 임준혁** · 이제근* · 전해수**

경성대학교 공과대학 환경공학과
*부산수산대학교 공과대학 환경공학과
**고려대학교 공과대학 화학공학과
(1994년 6월 11일 접수, 1994년 11월 21일 채택)

Effect of Secondary Superficial Air Velocity on the Elutriation Rate of Fine Particles in a Cold Model Two-Stage Swirl-Flow Fluidized Bed Combustor

Yong-Seop Shin[†], Jeong-Gock Jang*, Jun-Heok Lim**, Jea-Keun Lee* and Hai-Soo Chun**

Dept. of Environ. Eng., Kyungsung University, Pusan 608-736, Korea

**Dept. of Environ. Eng., National Fisheries University of Pusan, Pusan 608-737, Korea*

***Dept. of Chem. Eng., Korea University, Seoul 136-701, Korea*

(Received 11 June 1994; accepted 21 November 1994)

요 약

상온 2단 선회류 유동층 연소로에서 1차 공기의 유량을 일정하게 유지하고 2차 공기의 유량만을 변화시키면서 상단에서 미세입자의 비산유출속도를 측정하였다. 상온 2단 선회류 유동층에서 입자의 비산유출속도는 본 연구의 상단 가스공압속도($U_{o2}=0.1-0.35$ m/s) 범위에서 상단 공압속도(U_{o2})가 증가함에 따라 서서히 증가하다가 상단 공압속도 0.3 m/s 이상에서 급격한 증가를 보였다. 또한 비산유출속도는 선회강도에 크게 의존하였으며 선회강도 증가에 따라 지수함수적으로 감소하였다. 상온 2단 선회류 유동층에서 입자의 비산유출속도상수는 공압속도 증가에 따라 증가하였으며 본 연구의 유속조건하에서 83-88 μ m 범위의 분리한계입경을 나타내었다. 상온 2단 선회류 유동층에서 입자의 비산유출속도상수는 상단 과잉공기속도($U_{o2}-U_{mf}$)와 d_p/d_{p100} 에 대하여 다음과 같은 상관관계를 나타내었다.

$$\frac{K^*(d_p)}{\rho_g(U_{o2}-U_{mf})} = 337.7(U_{o2}-U_{mf})^{3.6} \exp(-7.18d_p/d_{p100}) + 2.54(U_{o2}-U_{mf})^6$$

Abstract—The elutriation rate of fine particles were measured in a cold model Two-Stage Swirl-Flow Fluidized Bed Combustor(TSSF-FBC). The range of secondary air flow rate was varied from 0.1 m/s to 0.35 m/s while the primary air flow rate was kept to a constant value of 1 m/s. It was found that the elutriation rate of fine particles slightly increased with the secondary superficial air velocity. When the secondary superficial air velocity exceeded over 0.3 m/s, however, the elutriation rate rapidly increased. The elutriation rate of fine particles was strongly dependent upon the swirl intensity. It was exponentially decreased as the swirl intensity increased. The elutriation rate constant increased with the secondary superficial air velocity, and the critical particle diameters were in range of 83-88 μ m. Under the experimental conditions, the elutriation

rate constant of fine particles can be correlated with secondary excess air velocity($U_{o2}-U_{mf}$) and d_p/d_{p100} as follows;

$$\frac{K^*(d_p)}{\rho_k(U_{o2}-U_{mf})} = 337.7(U_{o2}-U_{mf})^{3.6} \exp(-7.18d_p/d_{p100}) + 2.54(U_{o2}-U_{mf})^6$$

1. 서 론

유동층 연소법은 연료종류에 대한 제약이 적고 저품질 연료도 효과적으로 연소 가능하며 장치의 소형화를 꾀할 수 있으며 저온 연소(800-900℃)가 가능하다. 또한 백운석이나 석회석과 같은 흡수제의 층 내 주입을 통하여 SO_x 와 같은 대기오염물질도 별도의 후처리 장비 없이 처리가 가능하다[1-5]. 그러나 일반적인 단순유동층 연소법은 주어진 연료물질의 처리속도와 층물질의 평균입경과 밀도를 기준으로 조업공탐속도를 결정하여 설계 조업되므로 연료의 분쇄 및 주입과정과 유동층 연소시 연료입자의 층 내 마모와 thermal shock에 의하여 필연적으로 발생하는 미분과 연료물질이 넓은 입경분포를 갖거나 밀도가 다른 입자가 혼합되어 있는 경우 종말속도가 조업공탐속도 보다 작은 미세입자들이 다량으로 비산유출된다. 따라서 동일크기의 유동층 연소로에서 공탐속도를 증가시켜 연료의 처리속도를 증가시키는 것은 미세입자의 비산유출에 의하여 제약을 받게 되며 배출된 비산유출 입자들은 대부분 연소로 내 체류시간이 짧아 미연소 상태로 배출되어 연소효율을 감소시키고 대기오염물질 배출로 공해발생의 주원인이 된다[6].

이러한 단순유동층의 단점을 해결하는 신기술로서 새로운 개념의 2단 선회류 유동층 연소법(TSSF-FBC)[6, 9-14]이 최근에 개발되었다. 이 연소법은 다단 유동층 연소법[7]과 선회류 유동층 연소법[8]의 장점을 결합하고 단점을 보완한 연소법이다. 2단 선회류 유동층 연소로의 구조를 보면 2단 선회류 유동층 연소로는 기존 유동층의 freeboard 부에 재분산판을 삽입하여 재분산판 상부에 상단 유동층이 존재하고 그 하부에 하단 유동층이 존재하는 2단 유동층의 구조이다. 상단 재분산판에는 별도의 calming section을 설치하여 상단 유동층은 2차 공기에 의하여 유동화된다. 또한 상단 분산판에는 선회류 유도노즐을 설치하여 미연소 미세입자를 포함하는 하단 연소가스가 상단 freeboard부에 접선방향으로 유입되어 선회류를 형성하도록 하였다. 따라서 상단 freeboard부가 마치 integrated cyclone combustor와 같은 역할을 하여 미세입자의 비산유출속도를 현저히 감소시키며 체류시간과 연소효율을 증진시킬 수 있으며 장치의 소형화가 가능하고 연료의 처리속도가

크며 연소로 내 압력강하가 작고 대기오염물질 처리에 유리하다[6]. Lee 등[6, 9-14]은 이제까지 2단 선회류 유동층 연소로를 석탄 및 고형폐기물 연소에 적용한 결과 연소효율 증진과 미세입자 비산유출의 감소에 있어서 우수한 성능을 확인하였고 동력학적 특성 실험[15, 16]을 통하여 미세입자 비산유출속도의 현저한 감소와 체류시간의 증진을 확인할 수 있었다.

고형폐기물은 구성 성분의 성상이 다양하고 연소시 연료로서의 특성 또한 균일하지 못하므로 연소로의 표준설계와 조업방법은 대상 폐기물에 따라 수정되어야 한다. 2단 선회류 유동층 연소로의 설계와 조업조건 결정시 가장 중요한 설계변수는 폐기물의 발열량, 입경 분포, 물리적 화학적 물성, 반응성과 폐기물의 처리속도이다. 설계변수가 결정되면 상·하단 직경과 공탐속도가 각각 결정되어야 한다. 따라서 연소로의 상·하단 직경과 상·하단에 공급되는 연소공기의 비는 항상 일정하지 않다. 또한 상단의 직경과 상·하단으로 공급되는 연소공기 공급비에 의하여 상단 freeboard 내의 선회류 분포가 크게 영향을 받고 이에 따라 미세입자의 비산유출량 역시 크게 영향을 받는다. 2단 선회류 유동층 연소로에서 비산유출된 미세입자들은 상단 유동층에는 별도의 폐기물 주입구가 설치되어 있지 않으므로 원천적으로는 하단 유동층으로부터 유입된 입자들 중의 일부이다. 그러나 비산유출된 미세입자들이 하단 유동층으로부터 유입된 입자들 중 일부가 상단 유동층을 거치지 않고 직접 상단 freeboard로 유입되어 비산유출된 것인지 혹은 하단으로부터 유입된 입자들이 상단 freeboard 내 선회류에 의하여 상단 유동층으로 포집된 후 2차 공기에 의하여 상단 유동층으로부터 비발동반되어 비산유출되는 것인지 명확하지 않다. 또한 미세입자가 하단으로부터 상단으로 유입되는 조건에서 미세입자의 비산유출속도를 측정하는 경우 비산유출 기구를 분명하게 결정할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 하단 유동층으로부터 1차 공기와 함께 상단으로 유입되는 하단 층물질의 영향을 제거하기 위하여 2단 선회류 유동층 연소로에서 하단 유동층이 제거되어 상단 유동층만이 존재하는 구조의 상온 선회류 유동층 연소로에서 미세입자의 비산유출속도에 대한 상단 공탐속도의 영향을 고찰하고자 한다.

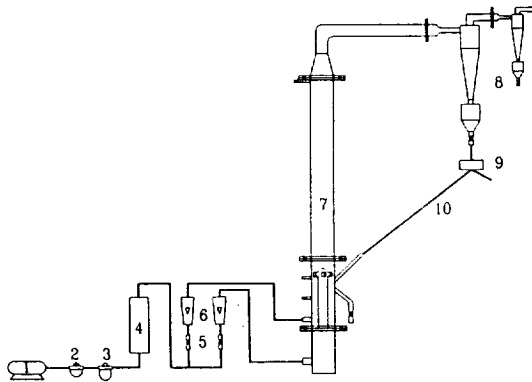


Fig. 1. Schematic flow diagram of the experimental apparatus.

- | | |
|-------------------|-------------------|
| 1. Air compressor | 2. Air regulator |
| 3. Air filter | 4. Air humidifier |
| 5. Valves | 6. Air rotameters |
| 7. Fluidized bed | 8. Cyclones |
| 9. Slide valve | 10. Dipleg |

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치

상온 선회류 유동층 연소로는 크게 압축공기 공급계통, 입자 포집 계통과 선회류 유동층 연소로로 구성되어 있으며 장치의 계통도는 Fig. 1과 같다. 상온 선회류 유동층 연소로는 2단 선회류 유동층 연소로에서 하단을 제거하고 상단만이 존재하는 단일 단으로 구성된 형태로써 분산판으로 2단 선회류 유동층 연소로의 선회류 유도노즐이 부착된 상단 분산판을 사용하였다. 선회류 유동층 연소로는 내경 11 cm의 acryl pipe로 제작되었으며 분산판으로부터 공기 배출구까지 높이는 1 m이며 calming section을 포함한 전체 높이는 1.5 m이다. 분산판으로부터 상부 5 cm 지점에는 충물질 채취용 배출구와 상부 10 cm 지점에는 cyclone에서 포집된 비산유출 입자를 유동층에 재투입하기 위한 투입구가 설치되었다. 또한 분산판으로부터 상부 2 cm 지점과 20 cm 지점에는 층의 압력강하 측정용 탭을 설치하였다.

분산판은 multi-orifice type으로 직경 2 mm의 구멍이 정삼각 pitch로 뚫려 있으며 개공비는 약 2%이고 분산판 위에는 입자의 역류를 방지하기 위하여 320 mesh screen을 설치하였으며 분산판 중앙부에는 standpipe-type의 선회류 유도노즐이 설치되었으며 분산판의 구조와 규격은 Fig. 2와 같다. 공기압축기로부터 공급되는 압축공기는 공기 여과기와 압력조절기를 거쳐 불순물이 제거되고 일정 압력으로 조절된 후 공기 유량계를 통하여 일정 유량의 1차 공기와 2차 공기로 나뉘어져 공

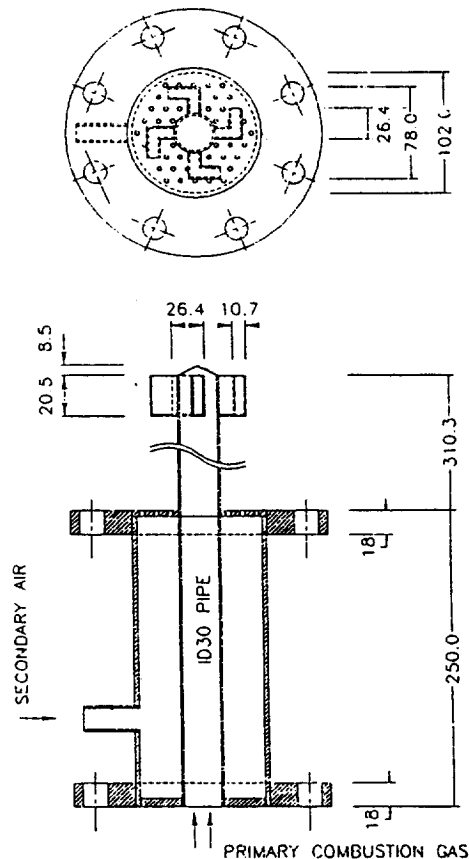


Fig. 2. Details of standpipe-type swirler and distributor.

급된다. 1차 공기는 하단 분산판과 하단 유동층을 거쳐 상단 분산판 중앙부의 선회류 유도노즐을 통하여 free-board에 유입되어 접선방향 흐름(tangential flow)을 형성하고 2차 공기는 분산판을 통과하여 상단에 형성된 유동층 내의 입자를 유동화시킨 후 축방향 흐름(axial flow)으로 층표면을 통과하나 곧바로 swirler 출구로부터 배출되는 1차 공기와 혼합되어 선회류를 형성하고 유동층의 공기 배출구를 통하여 외부로 배출된다.

실험에 사용한 유동층 물질은 진밀도 2.62 g/cm^3 인 압축강도 시험용 주문진 표준사를 사용하였다. 실험에 사용하기 위해 시료를 Ro-Tap sieve shaker와 ASTM 표준망체를 이용하여 체가름 후 깨끗이 씻어서 입경별로 9가지를 준비하였고 체분리된 크기의 입자를 일정비율로 혼합하여 Table 1과 같은 혼합입경 시료를 만들어서 사용하였다.

2-2. 실험방법

입자의 비산유출속도는 상온 선회류 유동층에서 총

Table 1. Properties and size distribution of particles used in the experiment

Seive no.	$d_p(\text{mm})$	X_i	$V_n(\text{m/s})$
230-270	0.0580	0.0562	0.258
170-230	0.0755	0.4360	0.351
140-170	0.0965	0.1669	0.520
120-140	0.1150	0.1234	0.677
100-120	0.1375	0.0893	0.871
80-100	0.1630	0.0588	1.089
70-80	0.1935	0.0353	1.343
60-70	0.2300	0.0223	1.631
50-60	0.2735	0.0118	1.950
$d_p = 0.091 \text{ mm}$			
$\rho_s = 2.62 \text{ g/cm}^3$			

물질의 연속적인 공급 없이 유동층에 충물질을 일정량 충전하고 비산유출된 입자들을 cyclone을 사용하여 포집한 후 완전 재순환시키는 순환 연속계를 이용하여 측정하였다. 먼저 혼합 입경의 시료를 aspect ratio가 1이 되도록 일정량을 유동층에 충전한 후 1, 2차 공기의 유량을 정해진 공탐속도에 맞도록 조절한다. 본 연구에서는 1차 공탐속도를 1 m/s로 일정하게 고정하였으며, 2차 공탐속도를 0.1-0.35 m/s 범위로 변화시키며 실험하였다.

선회류 유동층으로부터 비산유출된 입자는 유동층 상부의 공기 배출구에 직렬 연결된 2개의 cyclone에 의해 포집된 후 1차 cyclone에 의해 포집된 입자들은 dipleg를 통하여 유동층으로 재순환되었으며 2차 cyclone에 포집된 입자는 본 실험기간 동안 무시해도 좋을 정도로 극히 미미한 양이었다.

미리 정해진 1, 2차 공기의 유량비 조건에서 비산유출된 입자들을 cyclone으로 포집한 후 유동층으로 완전 재순환시키면서 유동층의 입경분포가 정상상태에 도달할 때까지 약 1시간 정도 기다린 후 cyclone과 용기 사이의 dipleg에 설치되어 있는 slide valve를 사용하여 적정시간(5-20 min)동안 시료를 포집하고 포집완료 30초 전에 분산판의 5cm 위에 설치한 충물질 배출관의 밸브를 열어 충물질을 100-150 g 정도 채취한 후 각각 무게를 정량하고 표준망체와 Ro-Tap sieve shaker를 사용하여 구분하고 입경분포를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 선회류 유동층에서 입자의 비산유출속도

본 실험에서 1차 공기의 유량을 공탐속도로 환산하여 1 m/s로 일정하게 유지시키고 2차 공기의 유량을 공탐

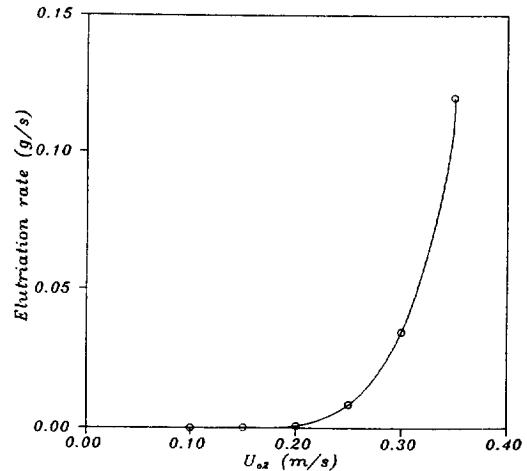


Fig. 3. Elutriation rate vs. secondary superficial air velocity in a swirl-flow fluidized bed.

속도로 환산하여 0.1-0.35 m/s로 변화시키면서 측정한 미세입자의 비산유출속도를 Fig. 3에 나타내었다.

본 연구에서는 2단 선회류 유동층 연소로에서 미세입자의 비산유출속도에 대한 상단 공탐속도의 영향을 고찰하기 위하여 하단 유동층을 제거하고 상단 유동층만을 사용하여 미세입자의 비산유출량을 측정하였으므로 Fig. 3에 나타난 비산유출된 미세입자는 상단에서만 비산유출된 입자들이다.

그림에 나타난 바와 같이 U_{a2} 가 0.2 m/s 이하의 범위에서 미세입자의 비산유출속도는 극히 적은 양이었으며 U_{a2} 가 0.3 m/s 이상으로 증가함에 따라 미세입자의 비산유출속도는 급격히 증가하는 경향을 보인다. 그림에 나타난 미세입자 비산유출속도는 공탐속도의 약 8승에 비례하였다. Zenz와 Weil[17]의 연구 결과에 의하면 일반적인 유동층에서 미세입자의 비산유출속도는 유체의 포화수송능력(saturation carrying capacity)에 의존하고 공탐속도의 4-6승 범위의 지수를 갖는다고 하였다. 따라서 선회류 유동층에서 측정된 미세입자의 비산유출속도는 공탐속도에 대하여 일반적인 유동층에서 보다 더욱 큰 의존성을 갖는다. 이와 같이 미세입자 비산유출속도의 공탐속도에 대한 높은 의존성은 유동층 표면에서의 미세입자의 초기비발동반속도와 선회류 유동층의 freeboard 내에서 선회류 유속분포에 의한 입자의 분리현상에 의하여 설명될 수 있다. George와 Grace[18], Caram 등[19]의 연구 결과에 의하면 유동층 표면에서 기포 파괴로 인하여 유동층 내 입자들이 freeboard로 방출되고 이렇게 방출된 입자들은 유체 흐름에 비발동반되어 freeboard 내를 상승하게 된다. Wen과

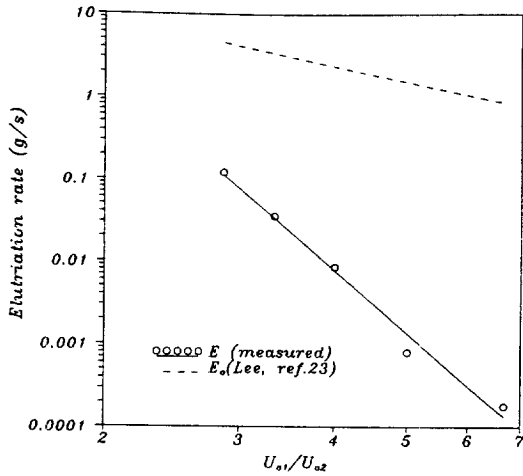


Fig. 4. Elutriation rate vs. U_{o1}/U_{o2} in a swirl-flow fluidized bed.

Chen[20], Choi 등[21]의 연구에 의하면 유동층 표면에서 입자의 비탈동반속도는 과잉공기속도(excess velocity, $U_o - U_{mf}$)의 2.5승과 층표면에서 기포직경에 비례한다고 하였다. 또한 Horio 등[22]의 연구 결과에 의하면 층표면에서 기포 파괴로 인하여 유체의 난류요동이 발생하며 freeboard 내에서 유체의 난류강도가 축방향으로 감소함에 따라 입자의 비탈동반속도가 감소한다고 하였다. Wen과 Chen[20]의 연구 결과에 의하면 일반적인 유동층의 freeboard 내에서 입자의 비탈동반속도는 지수함수적으로 감소한다고 하였다. 선회류 유동층의 경우에는 일반적인 유동층의 freeboard 내에 선회류가 존재하므로 유동층 표면에서 입자의 초기비탈동반속도는 일반 유동층과 같은 현상이며 freeboard 내에서 입자의 분리 현상만이 다르다. 선회류 유동층에서 미세입자의 비산유출속도에 대한 입자의 초기비탈동반속도의 영향과 freeboard 내 선회류에 의한 영향을 고찰하기 위하여 Fig. 4에 미세입자의 비산유출속도와 U_{o1}/U_{o2} 의 관계를 도시하였다.

일반적으로 선회류의 세기를 표시하는 방법으로써 선회강도(swirl intensity, S)를 사용하며 이것은 아래식 (1)과 같이 접선방향 운동량의 축방향 flux와 축방향 운동량의 축방향 flux의 비로 정의된다[23].

$$S = \frac{\int (\rho_k U W_t + \rho_k \bar{U} \bar{W}_t') r^2 dr}{R \int (\rho_k U^2 + \rho_k \bar{U}^2 + (P - P_x)) r dr} \approx \frac{W_t}{U} = \text{const} \times \frac{U_{o1}}{U_{o2}} \quad (1)$$

여기서, U , W 는 축방향 속도성분과 접선방향속도

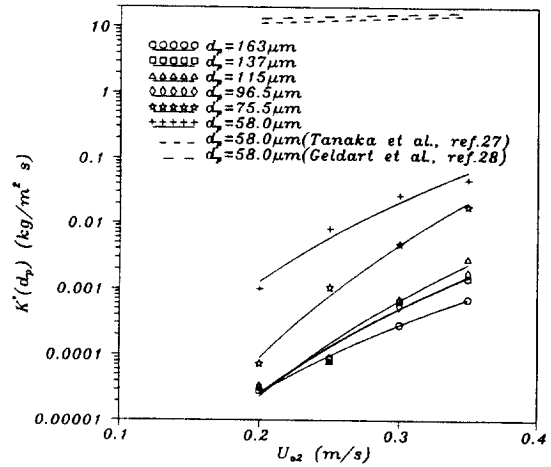


Fig. 5. Elutriation rate constant vs. secondary superficial air velocity in a swirl-flow fluidized bed.

성분의 fluctuation velocity를 나타낸다. 따라서 U_{o1}/U_{o2} 은 선회강도를 대표하는 값으로 본 실험에서 1차 공기 유량 즉, U_{o1} 의 값은 1 m/s로 일정하게 유지하였으므로 2차 공기유량 즉, U_{o2} 값의 증가는 U_{o1}/U_{o2} 값의 감소를 의미하며 이것은 선회강도의 감소를 표시한다. Fig. 4를 보면 미세입자의 비산유출속도는 선회강도 증가에 따라 즉, U_{o2} 감소에 따라 지수함수적으로 감소함을 볼 수 있다. Fig. 4에 나타난 점선은 본 연구와 동일한 입경 분포와 동일한 규격을 갖는 일반유동층에서 Lee[24]가 측정된 층표면에서 입자의 초기비탈동반속도를 본 연구와 비교하여 도시한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 Lee[24]가 측정된 입자의 초기비탈동반속도는 공압속도(U_{o2}) 감소에 따라 공압속도(U_{o2})의 약 2승에 비례하여 감소하는 반면에 미세입자의 비산유출속도는 공압속도 감소에 따라 지수함수적으로 감소하므로 선회류 유동층에서 미세입자의 비산유출속도는 층표면에서 입자의 초기비탈동반속도 보다는 freeboard 내 선회류의 영향을 더욱 크게 받을을 알 수 있다.

3-2. 선회류 유동층에서 입자의 비산유출속도상수

미세입자의 비산유출속도는 동일한 선회류 유동층 연소로의 구조와 조업조건하에서도 유동층에 존재하는 입자의 입경분포에 따라 상이한 결과를 초래한다. 따라서 이와 같은 입경분포의 영향을 제거하는 방법으로써 비산유출속도상수 $[K'(d_p)]$ 를 사용하는 방법이 있다. Kunii와 Levenspiel[25]에 의하면 유동층에서 입자의 비산유출속도상수는 다음 식 (2)와 같이 정의된다.

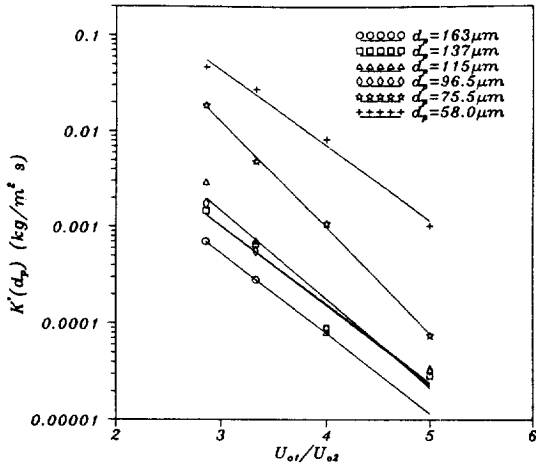


Fig. 6. Elutriation rate constant vs. U_{o1}/U_{o2} in a swirl-flow fluidized bed.

$$-\frac{1}{A} \frac{dW(d_p)}{dt} = K^*(d_p) \times \frac{W(d_p)}{W} \quad (2)$$

$$\text{여기서, } K^*(d_p) = \frac{E \cdot y(d_p)}{A \cdot x(d_p)}$$

식 (2)를 이용하여 계산된 미세입자의 비산유출속도상수와 상단공탑속도(U_{o2})와의 관계를 Fig. 5에 도시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 비산유출속도상수는 상단공탑속도(U_{o2}) 증가에 대하여 증가함을 알 수 있으며 특이한 것은 입자의 종말속도(terminal velocity)가 공탑속도 보다 큰 96.5 μm 이상의 큰 입자들도 비산유출되었다는 점이다. 일반적으로 유동층에서 freeboard의 높이가 TDH(Transport Disengaging Height) 보다 높은 경우 비산유출 가능한 입자들은 입자의 종말속도가 공탑속도 보다 작은 입자들이다. 선회류 유동층에서 비록 유동층으로 공급되는 2차 공기의 유량은 공탑속도로 환산하였을 때 최대 0.35 m/s이나 freeboard로 공급되는 1차 공기의 유량은 공탑속도로 환산하였을 때 1 m/s이므로 이 둘을 합친 전체 유량을 공탑속도로 환산하면 1.1-1.35 m/s에 해당된다. 따라서 일반적인 유동층에서와 같이 freeboard로 공급되는 1차 공기가 접선 방향으로 유입되어 선회류를 형성하지 않고 freeboard 중앙부를 향하여 직선적으로 공급된다면 freeboard 내에서 공탑속도는 1.1-1.35 m/s의 선속도를 갖게 되며 96.5 μm 이상의 큰 입자들도 충분히 비산유출 가능하다. 그러나 선회류 유동층에서 1차 공기는 freeboard 내에 접선 방향으로 유입되므로 유동층으로부터 freeboard 내로 비탈동반된 입자들은 중력과 함께 강한 원심력을 받게

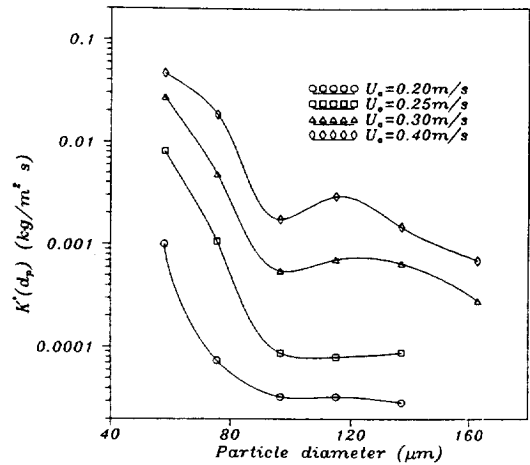


Fig. 7. Elutriation rate constant vs. particle diameter in a swirl-flow fluidized bed.

된다. 이러한 원심력에 의해 입자들은 반경방향으로 이동하게 되고 freeboard 기벽과 충돌하여 운동량을 잃고 기벽을 따라 침강하게 된다. 이와 같은 선회류 유동층에서 입자의 원심력에 의한 freeboard 기벽방향으로의 이동과 기벽을 따른 침강은 실험과정에서 목측(visual observation)된 바 있으며 본 실험장치의 freeboard에서 입자의 동력학적 특성과 유사한 특성을 가진 선회류 유동층에서 freeboard 내 입자의 농도분포를 측정된 Nieh와 Yang[26]의 연구 결과에서도 확인된 바 있다. 미세입자의 비산유출속도상수에 대한 Tanaka 등[27]과 Geldart 등[28]이 제안한 상관관계식을 사용하여 본 연구에서 사용한 $U_{o1} + U_{o2}$ 범위에 대하여 계산된 비산유출속도상수 값들을 Fig. 5에 함께 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 선회류 유동층에서 미세입자의 비산유출속도상수가 일반 유동층에서의 비산유출속도상수보다 월등하게 작은 값을 알 수 있으며, 이러한 결과는 선회류 유동층의 freeboard 내에 존재하는 선회류의 원심력 효과 때문인 것으로 생각된다. Fig. 6은 선회류 유동층에서 미세입자의 비산유출속도상수와 U_{o1}/U_{o2} 와의 관계를 나타낸 그림으로써 미세입자의 비산유출속도상수 역시 비산유출속도와 마찬가지로 U_{o1}/U_{o2} , 즉 선회강도 증가에 따라 지수함수적으로 감소함을 알 수 있다.

또한 Fig. 6에서 미세입자의 경우 입경이 감소함에 따라 비산유출속도상수가 큰 차이를 보인다. 그러나 96.5 μm 보다 입경이 큰 입자들의 경우 동일 U_{o1}/U_{o2} 조건에서 입경증가에 따라 비산유출속도상수 값의 변화가 거의 없음을 볼 수 있다. 이러한 현상을 확인하기 위하여

Fig. 7에 미세입자의 비산유출속도상수와 입경과의 관계를 도시하였다. Fig. 7을 보면 동일 유속조건하에서 96.5 μm 보다 입경이 큰 입자들은 입경증가에 따라 비산유출속도상수값의 변화가 매우 적어 비산유출속도상수의 입경에 대한 의존성이 매우 약한 것을 볼 수 있으며 96.5 μm 보다 입경이 작은 입자들의 경우 비산유출속도상수값이 입경 감소에 따라 지수함수적으로 증가함을 볼 수 있다. 따라서 96.5 μm 근방의 입경이 입자의 비산유출 가능성을 판정하는데 기준이 되는 한계입경(critical diameter)으로 생각되며, 이와 같은 현상은 cyclone에서 부분집진효율이 100%인 절단입경(cut diameter) 보다 큰 입자들에 대한 부분집진효율(fractional collection efficiency)이 거의 100%에 가까운 값으로 일정하고 절단입경 보다 작은 입자들에 대한 부분집진효율은 지수함수적으로 감소하는 현상과 매우 유사하다. 또한 freeboard 내의 선회류 존재가 freeboard를 마치 cyclone과 같은 역할을 수행하도록 한다는 점을 감안한다면 Fig. 7과 같은 결과를 이해할 수 있다.

선회류 유동층의 freeboard 내에는 3차원 유속분포를 갖는 선회류가 존재하므로 이와 같은 선회류 내에 존재하는 입자들 역시 축방향, 반경방향과 접선방향의 3방향 속도성분을 갖는 3차원 운동을 하게 된다. 이와 같은 입자의 속도성분 중에서 입자의 비산유출 여부를 결정하는 직접적인 요인은 입자의 반경방향속도와 축방향속도이다. 선회류 유동층에서 비산유출되지 않는 입자 즉, 100% 부분집진효율을 갖는 입자는 freeboard의 중심으로부터 기벽까지 반경방향으로 이동하는데 걸리는 이동시간과 freeboard의 최하부 유동층 표면으로부터 freeboard의 최상부까지 축방향으로 상승하는데 걸리는 시간이 같은 입자일 것이다. 이와 같은 조건은 아래와 같은 식 (3)으로 표현될 수 있다.

$$t_R = \frac{R}{V_R} = t_Z = \frac{H_f}{V_Z} \quad (3)$$

일반적으로 cyclone 내에서 입자의 반경방향속도가 유체의 반경방향속도와 크기가 같을 때 그 입자는 100% 부분집진효율을 얻는다고 간주한다[23]. 따라서 일반적인 cyclone에서와 같이 100% 부분집진효율을 갖는 입자의 반경방향이동속도 V_R 은 유체의 평균적인 반경방향속도와 같다고 가정하면 다음 식 (4)와 같이 표현될 수 있다[28].

$$V_R = \frac{Q_{total}}{2\pi R_{cm} H_f} \quad (4)$$

여기서 R_{cm} 는 유체의 선회류 속도성분 중 접선방향 속도성분의 반경방향 분포에서 최대값이 나타나는 반

Table 2. Values of d_{p100} for several experimental conditions

$Q_{total}(l/min)$	660	688	715	743
$U_{o1}(m/s)$	1.0	1.0	1.0	1.0
$U_{o2}(m/s)$	0.2	0.25	0.3	0.35
$d_{p100}(\mu m)$	82.98	84.69	86.37	88.02

경방향 위치로 vortex core의 크기를 말하며 선회류 분포의 특성에 의하여 결정된다. 본 연구와 동일한 구조의 선회류 유발장치(swirler 혹은 swirl generator)와 유속조건에서 선회류 분포를 측정한 Lim 등[30]의 연구결과에 의하면 vortex core의 크기(R_{core})는 선회류 유발장치 상부에서 5 cm 정도에 해당한다고 보고하였다. 또한 freeboard 내에서 유체의 평균적인 축방향속도는 공탐속도와 같다고 가정하고 입자의 운동은 독립적이라고 가정하면 종말속도가 총괄공탐속도($U_{o1} + U_{o2}$) 보다 작은 입자의 축방향 상승속도 V_Z 는 아래 식 (5)와 같다.

$$V_Z = \frac{Q_{total}}{A} - V_i = U_{o1} + U_{o2} - V_i \quad (5)$$

입자가 구형이라고 가정하였을 때 입자의 종말속도 V_i 는 다음 식 (6)과 같다[25].

$$V_i^2 = \frac{4d_p(\rho_s - \rho_g)g}{3\rho_g C_D} \quad (6)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} + 3.3643Re_p^{0.3471} + \frac{0.4607Re_p}{Re_p + 2682.5} \quad (7)$$

따라서 식 (3)-(6)을 정리하면 주어진 유속조건에서 부분집진효율이 100%인 입경, d_{p100} 는 다음과 같은 식 (8)로 표시될 수 있다.

$$d_{p100} = \frac{3\rho_g C_D}{4(\rho_s - \rho_g)g} \left\{ U_{o1} + U_{o2} - \frac{Q_{total}}{2\pi R R_{core}} \right\}^2 \quad (8)$$

윗 식 (7)을 사용하여 본 연구의 유속조건에서 d_{p100} 을 계산한 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2를 보면 본 실험조건하에서 d_{p100} 은 83-88 μm 범위의 값을 가짐을 알 수 있다.

선회류 유동층의 유동층 표면에서 초기비발동반된 입자들이 freeboard 내를 상승하면서 분리되어 비발동반속도가 축방향으로 감소하게 되고 비발동반된 입자들이 freeboard 최상부의 출구에 도달하였을 때 갖는 비발동반속도가 곧 미세입자의 비산유출속도와 같다. 이제까지의 실험결과를 종합하여 보면 미세입자의 비산유출속도는 유동층 표면에서 입자의 초기비발동반속도와

freeboard 내에서 선회류에 의한 입자분리에 영향을 받으며 freeboard 내 입자의 분리에는 특정한 한계입경이 존재함을 알 수 있다. 일반적인 유동층의 freeboard 내에서 입자의 비말동반속도는 Geldart[31]에 의하면 다음과 같이 비산유출속도상수로써 표현될 수 있다.

$$K_s^*(d_p) = K_{\infty}^*(d_p) + [E_0 - K_{\infty}^*(d_p)] \exp\{-\alpha(d_p)h\} \quad (9)$$

선회류 유동층에서의 비산유출속도상수 역시 위의 식 (8)과 유사한 의존성을 가질 것으로 판단된다. 그러나 앞에서 언급된 바와 같이 선회류 유동층의 freeboard 내에서 선회류에 의한 입자의 분리 즉, 비말동반속도의 감소는 선회류의 특성에 크게 의존하므로 위의 식 (8)의 지수함수항이 freeboard의 높이 보다는 절단입경의 함수로 표현되는 것이 보다 합리적일 것으로 판단된다. 따라서 일반적인 cyclone에서와 같이 d_p/d_{p100} 의 지수함수로 표현되는 것이 보다 적절하다고 생각된다. 그러므로 식 (8)은 다음 식 (9)와 같이 표현될 수 있다.

$$K_s^*(d_p) = K_{\infty}^*(d_p) + E_0 \exp(-Cd_p/d_{p100}) \quad (10)$$

($\because E_0 \gg K_{\infty}^*(d_p), E_0 - K_{\infty}^*(d_p) \approx E_0$)

여기서 Wen과 Chen[20]의 연구 결과에 의하면 초기비말동반속도 E_0 는 과잉공기속도(excess air velocity), $(U_0 - U_{mf})^n$ 에 의존하고, TDH 이하에서의 $K_{\infty}^*(d_p)$ 역시 $(U_0 - U_{mf})^n$ 에 의존하므로 선회류 유동층에서 미세 입자의 비산유출속도상수는 다음과 같은 함수관계가 성립된다고 생각할 수 있다.

$$K_s^*(d_p) = C_1(U_{o2} - U_{mf})^{n1} \exp(-C_2 d_p/d_{p100}) + C_3(U_{o2} - U_{mf})^{n2} \quad (11)$$

입자의 비산유출속도상수에 대한 상관관계를 검토한 결과 비산유출속도상수 보다는 비산유출속도상수를 공기의 밀도와 과잉공기속도(excess velocity)로 나눈 무차원 그룹으로 한 경우 좀더 나은 선형성을 보였다. 따라서 식 (11)의 좌변을 무차원 그룹으로 변형시켜 선회류 유동층에서 측정된 미세입자의 비산유출속도상수의 상관관계식을 구한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 볼 수 있는 바와 같이 비산유출속도상수는 식 (11)과 같은 상관관계식으로 나타낼 수 있으며 이때 상관계수 $r^2=0.91$ 이었다.

$$\frac{K_s^*(d_p)}{\rho_g(U_{o2} - U_{mf})} = 337.7(U_{o2} - U_{mf})^{3.6} \exp(-7.18d_p/d_{p100}) + 2.54(U_{o2} - U_{mf})^6 \quad (12)$$

윗식을 보면 선회류 유동층에서 공압속도(U_{o2})의 증가는 입자의 초기비말동반속도 E_0 를 증가시켜 free-

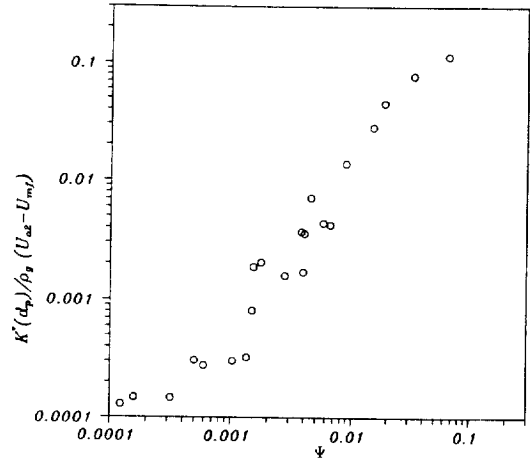


Fig. 8. Correlation curve of the elutriation rate constant in a swirl-flow fluidized bed.

$$\{\Psi = 337.7(U_{o2} - U_{mf})^{3.6} \exp(-7.18d_p/d_{p100}) + 2.54(U_{o2} - U_{mf})^6\}$$

board로 유입되는 입자의 유량을 증가시키고, 동시에 $K_{\infty}^*(d_p)$ 값을 증가시켜 입자의 비산유출속도를 증가시킨다. 반면에 freeboard 내 선회류강도의 증가는 d_p/d_{p100} 값을 감소시켜 d_p/d_{p100} 값을 증가시킴으로써 입자의 비산유출속도를 감소시키는 작용을 함을 알 수 있다.

4. 결 론

2단 선회류 유동층 연소로에서 미세입자의 비산유출속도에 대한 상단 공압속도의 영향을 알아보기 위하여 2단 선회류 유동층 연소로의 하단이 제거된 선회류 유동층에서 미세입자의 비산유출속도를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 선회류 유동층에서 입자의 비산유출속도는 상단 가스공압속도(U_{o2}) 증가에 따라 증가하였으며 상단 가스공압속도 0.3 m/s 이상에서 급격한 증가를 보였다.

(2) 선회류 유동층에서 입자의 비산유출속도는 선회류강도에 크게 의존하였으며 선회류강도 증가에 따라 지수함수적으로 감소하였다.

(3) 선회류 유동층에서 입자의 비산유출속도상수는 상단가스공압속도가 증가함에 따라 증가하였으며 본 연구의 유속조건하에서 83-88 μ m 범위의 분리한계입경을 나타내었다.

(4) 선회류 유동층에서 입자의 비산유출속도상수를 과잉공기속도와 d_p/d_{p100} 의 함수로 상관관계를 구한 결과 다음과 같은 상관관계식을 얻을 수 있었다.

$$\frac{K^*(d_p)}{\rho_g(U_{o2}-U_{mf})} = 337.7(U_{o2}-U_{mf})^{3.6} \exp(-7.18d_p/d_{p100}) + 2.54(U_{o2}-U_{mf})^6$$

감 사

이 논문은 1991년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 자유공모(지방대학육성)과제 학술연구조성비와 동원학술연구재단의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

사용기호

A : cross-sectional area of column [m]
 A_n : cross-sectional area of swirler nozzle [m]
 C, C₁, C₂, C₃ : constants [-]
 d_p : diameter of the particle [μm]
 d_{p100} : cut diameter defined by eq. (7) [μm]
 E_∞ : entrainment rate of particles at the freeboard height of infinity [kg/m²s or g/s]
 E : total elutriation rate of particles [kg/s or g/s]
 E_o : initial entrainment rate of particles at the surface of fluidized bed [kg/m²s or g/s]
 g : acceleration of gravity [9.8 m/s²]
 h : axial position in the freeboard [m]
 H_f : height of freeboard [m]
 K*(d_p) : elutriation rate constant of particles of size d_p [kg/m²s]
 K_h*(d_p) : elutriation rate constant of particles of size d_p at axial position h [kg/m²s]
 K_∞*(d_p) : elutriation rate constant of particles of size d_p at infinite freeboard height [kg/m²s]
 n, n₁, n₂ : constants [-]
 Q₁, Q₂ : primary and secondary air flow rate [m³/s]
 Q_{total} : total air flow rate [m³/s]
 r : radial position [m]
 R : radius of column [m]
 R_{car} : radius of vortex core [m]
 S : swirl intensity defined by eq. (1) [-]
 t_R : time to be taken for a particle to move from column center to the wall [s]
 t_Z : time to be taken for a particle to rise freeboard [s]
 U_a : superficial air velocity [m/s]
 U_{a1}, U_{a2} : primary and secondary superficial air velocity [m/s]
 U_{mf} : minimum fluidization velocity [m/s]
 V_R : radial velocity of particles [m/s]

V_t : terminal velocity of the particle [m/s]
 V_Z : axial velocity of particles [m/s]
 x(d_p) : weight fraction of particle of size d_p in the fluidized bed [-]
 y(d_p) : weight fraction of particle of size d_p in the elutriated particles [-]
 W : total weight of bed material [kg]
 W(d_p) : weight of particle of size d_p in the fluidized bed [kg]
 W_t : tangential velocity component in the swirl flow [m/s]

그리스 문자

α : decay constant of entrainment rate of particles in the freeboard [m⁻¹]
 ρ_g : air density [kg/m³]
 ρ_s : particle density [kg/m³]
 μ_g : air viscosity [kg/m s]
 Ψ : function defined by eq. (12) [kg/m²s]

참고문헌

1. Sarofim, A. F.: "Handbook of Solid Waste Management: Thermal Processing; Incineration and Pyrolysis", Van Nostrand Reinhold Co., New York (1977).
2. Berkowitz, N.: "An Introduction to Coal Technology", Chap. 10, Academic Press, New York (1979).
3. Radovanovic, M.: "Fluidized Bed Combustion", Chap. 1, Hemisphere Publishing Co., New York (1986).
4. Taylor, T. E.: Proc. of the 2nd Eng. Found. Conf. on FBC, 258 (1978).
5. Anthony, E. J., Becker, H. A., Code, R. K., Liang, D. T. and Stephenson, J. R.: Proc. of the 8th Int. Conf. on FBC, 32 (1985).
6. Lee, J. K., Hu, C. G., Shin, Y. S. and Chun, H. S.: *Can. J. Chem. Eng.*, **68**(5), 824 (1990).
7. Chen, T. P. and Saxena, S. C.: Proc. of the 2nd Eng. Found. Conf. on FBC, 151 (1978).
8. Korenberg, J.: Proc. Int. Conf. on Fluidization, 491 (1983).
9. 이제근, 이기호, 이규현, 전해수: 화학공학, **28**(4), 470 (1990).
10. 이제근, 이기호, 장정국, 임준혁, 임종성, 전해수: 화학공학, **30**(4), 499 (1992).
11. 이제근, 장정국, 여석준, 허철구, 임준혁, 전해수: 한국폐기물학회지, **9**(1), 45 (1992).
12. Lee, J. K., Lee, K. H., Jang, J. G., Shin, Y. S. and

- Chun, H. S.: *J. Chem. Eng. of Japan*, **24**(6), 703 (1991).
13. Lee, J. K., Lee, K. H. and Chun, H. S.: *J. Chem. Eng. of Japan*, **26**(2), 179(1993).
 14. Lee, J. K., Lee, K. H., Jang, J. G. and Chun, H. S.: *J. Chem. Eng. of Japan*, **26**(4), 368(1993).
 15. Gong, J. H., Lim, J. H., Shin, Y. S., Lee, J. K. and Chun, H. S.: Proc. 1st Asian Conf. on Fluidized Bed and 3-Phase Reactors, Tokyo Japan, 253(1988).
 16. Lim, J. H., Lim, J. S., Shin, Y. S. and Chun, H. S.: Proc. of 2nd Asian Conf. on Fluidized Bed and 3-Phase Reactors, Kenting Taiwan, 202(1990).
 17. Zenz, F. A. and Weil, N. A.: *AIChE J.*, **4**(4), 472 (1958).
 18. George, S. E. and Grace, J. R.: *Can. J. Chem. Eng.*, **59**, 279(1981).
 19. Caram, H. S., Levy, E. K., Dille, J. C. and Edelstein, S.: *AIChE J.*, **29**(3), 383(1983).
 20. Wen, C. Y. and Chen, L. H.: *AIChE J.*, **28**(1), 117 (1982).
 21. Choi, J. H., Son, J. E. and Kim, S. D.: *J. Chem. Eng. of Japan*, **22**(6), 597(1989).
 22. Horio, M., Shibata, T. and Muchi, I.: Proc. 4th Int. Conf. on Fluidization, 307(1984).
 23. Gupta, A. K., Lilley, D. G. and Syred, N.: "Swirl Flow", Chap. 1, Chap. 5, Abacus Press, New York (1984).
 24. Lee, T. E.: M.S. Thesis, Kyungsung University, Pusan, Korea(1992).
 25. Kunii, D. and Levenspiel, O.: "Fluidization Engineering", 2nd ed., Ch. 7, Butterworth-Heinemann Inc., New York(1991).
 26. Nieh, S. and Yang, Y.: *Powder Technol.*, **50**, 121 (1989).
 27. Tanaka, I., Shinohara, H., Hirose, H. and Tanaka, Y.: *J. Chem. Eng. of Japan*, **5**(1), 51(1972).
 28. Geldart, D., Cullinan, J., Georgiades, S., Gilvary, D. and Pope, D. J.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **5**, 269 (1979).
 29. Fayed, M. E. and Otten, L.(edited): "Handbook of Powder Science and Technology", Ch. 16, Van Nostrand Reinhold Co., New York(1984).
 30. Lim, J. H., Shin, Y. S., Lee, J. K. and Chun, H. S.: Proc. 3rd Asian Conf. on Fluidized Bed and 3-Phase Reactors, Kyongju Korea, 504(1992).
 31. Geldart, D.(edited): "Gas Fluidization Technology", Ch. 6, John Wiley & Sons Co., New York (1986).