

2차 공기가 주입되는 유동층에서 고체입자의 비산

최정후[†] · 김규종 · 김병채^{*}

전국대학교 화학공학과

^{*}진도종합건설(주)

(1994년 1월 31일 접수, 1994년 4월 4일 채택)

Particle Entrainment in a Fluidized Bed with Secondary Air Injection

Jeong-Hoo Choi[†], Kyu-Jong Kim and Peter Kim^{*}

Department of Chemical Engineering, Kon-Kuk University, Seoul 133-701

^{*}Jindo Engineering & Construction Co.

(Received 31 January 1994; accepted 4 April 1994)

요 약

공기 분배기로부터 0.2 m 높이에 2차 공기가 공급되는 상온 유동층(직경 0.1 m, 높이 2.4 m)에서 입자 비산 속도를 측정 및 고찰하였다. 충물질로는 체구격 0.5 mm 이하의 모래가 사용되었다. 실험변수로는 입도(0.128-0.363 mm), 총괄유속(0.76-2.77 m/s), 2차 공기분율(0-0.5), 고정층 높이(0.1-0.3 m)가 변화되었다. 입자 비산속도는 유속이 증가할수록 입경이 감소할수록 증가하였다. 고정층 높이의 영향은 미약하였다. 2차 공기분율의 증가는 입자 비산속도를 감소시켰다. 이 영향은 2차 공기의 주입위치에 따라 다르며, 충내부일 경우에는 작으나, 프리보드일 경우에는 두드러졌다.

Abstract—The particle entrainment rate was measured and discussed in a cold model fluidized bed(0.1 m-ID, 2.4 m-height) which employed a secondary air injection at a height of 0.2 m above the distributor plate. Sand particles of mixed sizes under 0.5 mm in screen size were used as bed materials. The particle size(0.128-0.363 mm), the overall superficial gas velocity(0.76-2.77 m/s), the secondary air fraction(0-0.5), and the static bed height(0.1-0.3 m) were considered as experimental variables. The entrainment rate increased with the gas velocity, but with a decrease of particle size. The effect of static bed height was negligible. The entrainment rate decreased with an increase of the proportion of secondary air. The effect of secondary air fraction was appreciable for over-bed injection and was reduced as the location of second gas inlet moved toward in-bed.

1. 서 론

기체 유동층의 고유 특성은 기체-고체간의 효과적인 접촉으로 간단히 규정지을 수 있으며 이 과정에서 수반되는 가장 중요한 현상으로서 고체의 비산현상을 들 수 있다. 이러한 입자의 비산유출은 반응효율의 감소,

경제적 손실, 분진공해 등을 유발하는 중요한 단점이다. 유동층 연소로의 경우에 연소효율의 손실은 주로 비산 유출되는 미연연료에 지배되며, 이에 대응하여 비산입자를 포집하는 사이클론, 재순환 혹은 재연소 설비 등의 장치들이 부착된다.

비산입자량을 제어하고 적절한 집진설비의 선택을

위해서는 구조적 및 정량적인 비산특성의 이해가 필요하다. 분배기뿐만 기체가 공급되는 통상적인 분배구조의 유동층에서 고체의 비산속도에 관하여는 많은 연구결과가 보고되어 있다[1, 2]. 근래에는 기체가 1차, 2차 등으로 분배되어 공급되는 유동화 공정이 연소공정 등에서 적극적으로 적용되기 시작하였고, 이같은 복잡한 형태에서 층특성의 변화가 주목되어 실험적 연구가 진행되고 있다[3-9]. 대부분의 연구는 순환유동층에서 수행되었으며, 실험변수로 총괄유속, 2차 공기분율, 외부 고체순환속도를 변화시키며, riser에서 고체체류량의 변화를 관찰하였다. 이 중에서 Wu와 Alliston[9]은 직경 0.61 m, 높이 10.7 m의 상온 순환유동층에서 모래($d_p = 45\text{--}300\ \mu\text{m}$)를 층물질로 하고 총괄유속이 3.84 m/s 일 때, 2차 공기를 층하부에서 spouting 하는 경우와 분배기로부터 1.22, 2.1, 2.96 m 상부에서 주입하는 경우에 외부 고체순환속도의 변화를 보고하였다. 고체순환속도는 2차 공기를 층하부에서 spouting 할 때 가장 컸으며, 다음으로 1차 공기만 주입할 때, 상부 2차 공기를 주입할 때의 순으로 감소하였다. 층하부에서 spouting 할 때에는 2차 공기분율의 영향은 미약하였으며, 상부 2차 공기의 분율이 증가할수록(0-0.3), 주입위치가 높을수록 고체순환속도는 감소하였다(약 1.2-0.45 kg solid/kg gas; 약 5.42-2.03 kg/m²s).

외부 고체순환속도는 궁극적으로 입자비산의 관점에서 해석되어야 하겠지만, 이들의 연구는 모든 고체들이 순환되는 조건에서 수행되었고, 입자크기에 따른 순환속도나 층내 입자량 및 입도분포와 같은 정보가 불분명하며, 입도별 비산속도나 이에 관한 상관식은 고찰하지 않았다. 결과적으로 기체가 분배되어 공급되는 유동층 반응기에 적용될 수 있는 기체의 분배에 따른 입자비산특성에 관한 구체적인 측정 및 해석은 거의 보고되지 않았다고 볼 수 있다.

본 연구는 기초연구로서 기체가 2단계로 공급되는 상온 유동층에서 유속, 2차 공기분율, 고정층 높이의 변화에 따른 입도별 비산속도를 측정 및 고찰하였다.

2. 실험

실험장치는 압축기와 유량계로 구성된 공기 주입설비, 유동층, 두 개의 사이클론과 재순환설비, 백필터로 구성되었다.

유동화 기체로는 공기가 사용되었으며, 75 Nm³/h(15 HP)의 용량을 갖는 압축기로 공급되고, 압력 조절기와 수분 제거용 prefilter를 거친 후, 적절한 유량제(flow cell type : 최대 유량 60 Nm³/hr, 40 Nm³/hr, 10 Nm³/hr)로 정량되어 유동층에 공급되었다. 기체는 분산판

Table 1. Size distribution of sand

Mesh range (mm)	-0.425 +0.3	-0.3 +0.212	-0.212 +0.15	-0.15 +0.106	-0.106 +0.075	-0.075 +0.
Mean size (mm)	0.363	0.256	0.181	0.128	0.091	0.033
Weight fraction	0.495	0.282	0.153	0.055	0.008	0.007

*Apparent density : 2600 kg/m³

*Bulk density : 1300 kg/m³

*Specific surface mean diameter : 0.247 mm

으로 공급되는 유동화 공기와 층내로 공급되는 2차 기체로 나뉘어 각각 정량되었다.

유동층은 내경 0.1 m, 높이 2.4 m의 아크릴관으로 제작되었고, 장치높이의 변정이 용이하도록 축방향으로 0.5 m×2 ea, 0.1 m×3 ea, 0.6 m, 0.4 m 각 1 ea씩 그리고 plenum(sus 304, 높이 0.1 m)의 단관을 플랜지로 연결하였다. 기체는 분배기와 분배기로부터 0.2 m 높이에 위치한 단일 수평관(25 mm-ID)으로 주입되도록 하였다. 분배기는 multi-tuyere 형으로 외경 20 mm tuyere 4개에 각각 내경 3 mm 오리피스 12개를 배치하였다. 유동층의 축방향 압력분포를 측정하기 위하여, 분산판으로부터 일정 간격(-0.04, 0.03, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.9, 1.4, 2.25 m) 축방향으로 압력점을 두고 마이크로 마노미터와 물 마노미터를 설치하였다.

기체출구(0.1 m-ID)는 분산판으로부터 2.25 m 높이에 위치하며, 기체는 1, 2차 사이클론(표준비율 : 각 원통 직경은 0.15 m, 0.1 m)과 백필터를 거쳐서 대기로 배출되도록 하였다. 1차 사이클론의 하부 배출관(0.05 m-ID)은 고체시료의 채취를 위한 diverter에 연결되고, 다음으로 로타리 밸브를 거쳐서, 분산판으로부터 높이 0.3 m에 설치된 재순환관(0.05 m-ID)을 통하여 유동층과 연결되었다. 로타리 밸브는 유동화 기체의 역흐름을 방지하기 위해서 설치되었으며, 약 15 rpm의 고정된 속도로 회전시켰다. 백필터로는 상업용으로 사용되는 필터(Nomex filter) 1개를 배출구에 연결하여 사용하였다.

층물질로는 모래(apparent density : 2598 kg/m³, bulk density : 1300 kg/m³)를 사용하였다. 모래는 체규격 0.425 mm 이하의 것을 사용하였으며, 미소하지만 매 시험조건마다 마모에 의해서 입도분포가 변화하였다. 결과의 해석에서는 각 실험조건의 입도분포가 반영되었다. Table 1은 층물질 모래의 대표적인 입도 분포를 나타낸다.

실험방법은 다음과 같다. 모래의 입도분포와 무게를 측정하는 다음, 실험조건의 고정층 높이(0.1, 0.2, 0.3 m)로

유동층에 채웠다. 재순환관의 diverter를 순환위치로 하고, 로타리 밸브를 작동시켰다. 압력 조절기의 압력을 약 $1 \text{ kg/cm}^2\text{-G}$ 로 유지하고, 유량조절 밸브와 유량계로 일정 유량의 기체를 공급하여 층을 유동화시켰다.

마이크로 마노미터와 물 마노미터로 층내 압력분포의 변화를 관찰하였다. 유동층과 1차 사이클론 포집입자의 재순환이 정상적으로 이루어져 유동층의 압력분포가 안정되었을 때 유동층의 정상상태로 간주하였다. 정상 상태에서 유동층의 압력분포를 기록하였다. 프리보드 기체출구에서 고체의 비산속도를 측정하기 위해서, 재순환관의 diverter를 일정 시간동안(5-180 sec) 젓혀서 고체를 포집하였다. Diverter에서 고체의 포집시간은 층내 입자의 양과 입도분포의 변화를 고려하여 최소화 하였다. 포집이 끝난 후, 기체주입을 중단하고 유동화 고체의 고정층 높이를 측정하여, 층내 고체량의 변화를 재고하였다.

채취된 고체의 무게를 측정하여 단위 시간당 프리보드 기체출구에서 총괄비산속도를 결정하였고, 채분석으로 입도분포를 측정하였다. 채취된 고체를 층내로 재주입하고, 혼합된 층내 고체의 대표시료를 채취하여 입도분포를 측정함으로써 1회의 측정을 마쳤다.

실험결과 2차 사이클론 포집입자의 유량은 거의 무시될 수 있었고, 입도분포는 0.075 mm 이하를 보였다. 입자의 마모에 의한 영향과 1차 사이클론을 통과하는 입자의 영향을 배제하기 위해서 입도별 비산속도는 입경 0.106 mm 이상에서만 고려하였다.

실험변수로는 입도(평균입경: $0.363, 0.256, 0.181, 0.128 \text{ mm}$)와 총괄공압유속($0.78, 1.19, 1.59, 2, 2.76 \text{ m/s}$), 2차 공기분율($0, 0.2, 0.3, 0.5$), 고정층 높이($0.1, 0.2, 0.3 \text{ m}$)가 고려되었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 축방향 고체체류량 분포

측정된 최소 유동화 속도는 $0.07\text{-}0.11 \text{ m/s}$ 의 범위를 보였으며, 문헌[10]에 보고된 sharp sand의 sphericity와 최소 유동화 상태에서 유동층의 공극률을 적용한 Ergun 식의 결과와 유사하였다.

고정층 높이 0.1 m 일 때 압력구배는 분배기로부터 높이가 증가함에 따라 지수적으로 급격히 감소하였으며, 유속이 증가함에 따라 층영역에서 값은 감소하지만 유사한 경향을 보였다. 결과적으로 축방향 압력구배 분포로써 dense bed 영역을 분명히 규정할 수 없었다. 반면에 고정층 높이 $0.2, 0.3 \text{ m}$ 의 경우에는 축방향 압력구배 분포로써 유동층내에 dense bed 영역을 구분할 수 있었다. 층하부에서 압력구배의 굴곡이 있었으며,

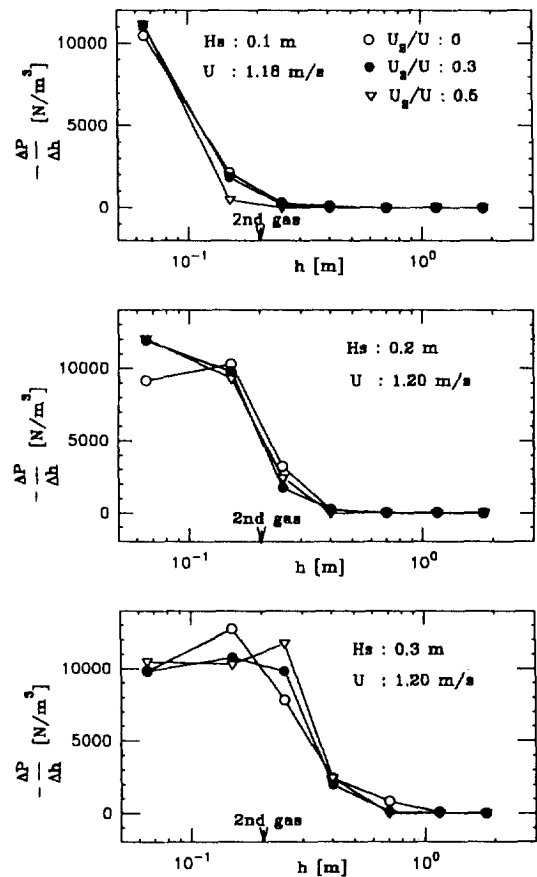


Fig. 1. Axial pressure gradient along the height above the distributor plate with secondary air injection.

이는 압력을 마노미터로 측정하여 평균값을 취함에 오차가 작용하였기 때문으로 사료되었다.

Fig. 1은 유동화 속도 1.19 m/s , 고정층 높이가 각각 $0.1, 0.2, 0.3 \text{ m}$ 이고, 2차 공기가 분율 $0, 0.3$ (혹은 0.2), 0.5 로 공급될 때, 유동층의 축방향으로 압력구배를 나타낸다. 2차 공기가 주입되지 않을 경우와 유사하게, 압력구배는 분배기로부터 높이가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 2차 공기분율의 증가는 주입구 바로 상부의 압력구배를 증가시켰으며, 이 경향은 고정층 높이 0.3 m 의 경우에 분명하게 나타났다. 그러나 이 결과를 확신하기 위해서는 더 높은 고정층 높이에서 측정결과가 뒷받침되어야 할 것으로 사료되었다.

3-2. Transport Disengaging Height(TDH)

입자 비산속도의 고찰에 앞서서 본 실험범위를 규정하기 위해서 TDH를 검토하였다. 보고된 TDH에 대한 상관식으로는 유동화 속도가 입자의 종말속도보다 큰

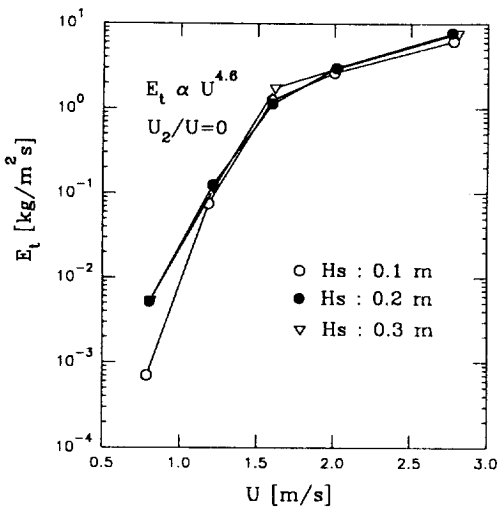


Fig. 2. Total entrainment rate versus fluidizing velocity with a primary gas input only.

고은 입자계(fine particle system)에서 사용되는 Zenz와 Weil[11]의 도표와 유동화 속도가 입자의 종말속도보다 작은 굵은 입자계(coarse particle system)에서 적용되는 Soroco 등[12]과 Yoon[13]의 상관식이 있다.

본 실험의 유속범위(0.78-2.76 m/s)에서 Zenz와 Weil[11]의 상관식으로는 TDH=1.4-3.5 m 이상, Soroco 등[12]의 상관식으로는 $H_s=0.1$ m 일 때 TDH=1.2-8.4 m, $H_s=0.2$ m 일 때 TDH=2.4-16.8 m, $H_s=0.3$ m 일 때 TDH=3.6-25.1 m, Yoon[13]의 상관식으로는 TDH=0.8-2.1 m로 계산되었다. 본 실험에서 사용된 유동층의 분배기로부터 기체출구까지 높이는 2.1 m이었고, 프리보드 높이는 2.1 m에서 팽창된 고체층의 높이를 뺀 값이다. 결과적으로 유속이 작은 영역에서(약 1 m/s 이하) 일부 조건의 프리보드 높이는 TDH보다 높거나 같으며, 유속 1 m/s 이상에서는 TDH보다 낮았던 것으로 사료되었다.

3-3. 총괄비산속도

Fig. 2는 기체가 분배기로부터 공급될 때, 유동화 속도의 변화와 고정층 높이의 변화에 따른 총괄비산속도를 나타낸다. 총괄비산속도는 유속이 증가함에 따라 지수적(4.6승)으로 증가하였으며, Geldart[1]의 고찰에서 언급된 것(유속의 4.8, 11.8승에 비해)과 유사하였다. 이는 상온 유동층(0.38 m-ID)에서 입경 1.41 mm 이하(비표면 평균 입경: 0.253, 0.338 mm)의 모래 입자를 충물질로 사용한 Choi 등[2]의 결과($U=0.38$, $E_t=1.76 \times 10^{-4}$; $U=1.06$, $E_t=7.90 \times 10^{-2}$; $U=2.01$, $E_t=0.846$; $U=$

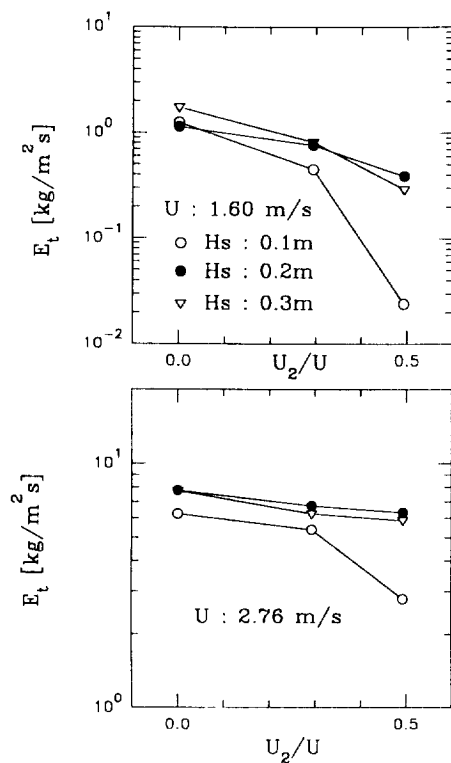


Fig. 3. Total entrainment rate versus secondary air fraction.

2.44 m/s, $E_t=3.51$ kg/m²s)와 비교하여, 유속이 작은 영역에서는 다소 작고 유속이 큰 영역에서는 다소 크지만 유사한 경향이였다.

총괄비산속도에 대한 고정층 높이의 영향은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 Choi 등[2]의 결과와 일치하지만 Baron 등[14]의 결과와는 다소 차이가 있었다. 그러나 Baron 등[14]의 보고에서(유속 0.15-0.30 m/s) 층높이를 두배 증가시켰을 때 비산속도가 12-28% 증가된 것으로 미루어 그 효과가 크지 않은 것으로 사료되었다.

Fig. 3은 2차 공기가 주입되고, 일정한 총괄유속에서 고정층 높이와 2차 공기분율이 변화하였을 때 총괄비산속도의 변화를 보여준다. 총괄비산속도는 2차 공기분율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 고정층 높이가 증가할수록 증가하였다. 그림에서 총괄유속 1.6 m/s에서 2차 공기분율의 영향은 Wu와 Alliston[9]의 보고에서 외부 고체순환속도의 변화율($U=3.84$ m/s, $U_2/U=0-0.3$ 에 대해서 약 5.42-2.03 kg/m²s)에 대한 영향과 유사하였다. 한편 2차 공기분율의 영향은 총괄유속이나 고정층 높이가 증가함에 따라 급격히 감소되는 현상을 보였다.

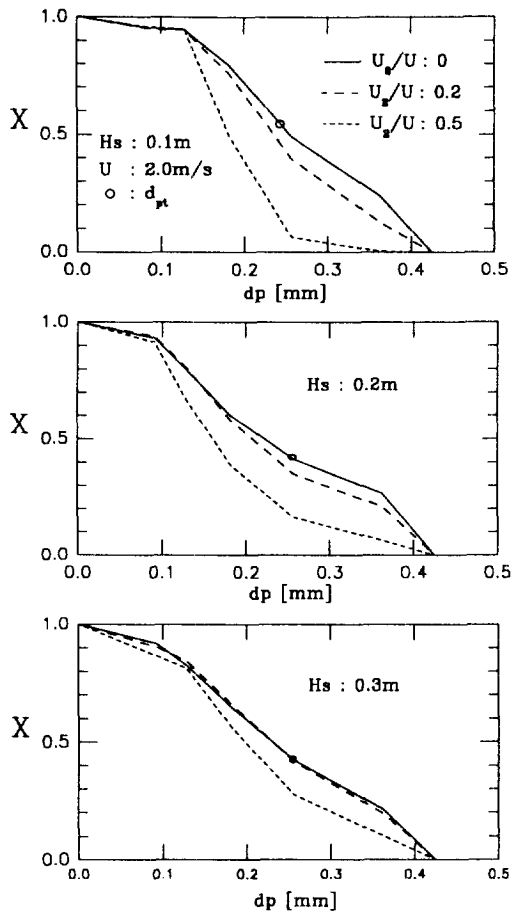


Fig. 4. Size distribution of entrained particles with secondary air injection.

이같은 현상은 2차 공기의 주입위치와 밀접한 관계가 있는 것으로 판단되었다. 고정층 높이가 낮고(0.1m), 1차 공기의 유속이 작은 조건에서는 2차 공기의 주입 위치가 프리보드에 위치하게 된다. 총괄기체유속이 일정한 가운데 2차 공기유량의 증가는 1차 공기유량을 감소시키므로 총표면에서 초기 비산속도의 감소를 가져와 총괄비산속도를 감소시킨다. 동일한 고정층 높이에서 총괄기체유량의 증가로 1차 공기유량이 증가하면, 층이 팽창하여 2차 공기 주입위치가 splash영역, 총표면, 혹은 층내에 위치하게 되므로 비산속도를 증가시키는 것으로 사료되었다.

고정층 높이가 0.2, 0.3m의 조건에서는 2차 공기 주입위치가 항상 층내에 위치하여 2차 공기도 1차 공기와 같이 총표면에서 초기 비산속도를 결정하기 때문에 1차 공기만 공급될 때와 유사한 거동을 보여 입자 비산속도에 대한 2차 공기분율의 영향이 크지 않은 것으로

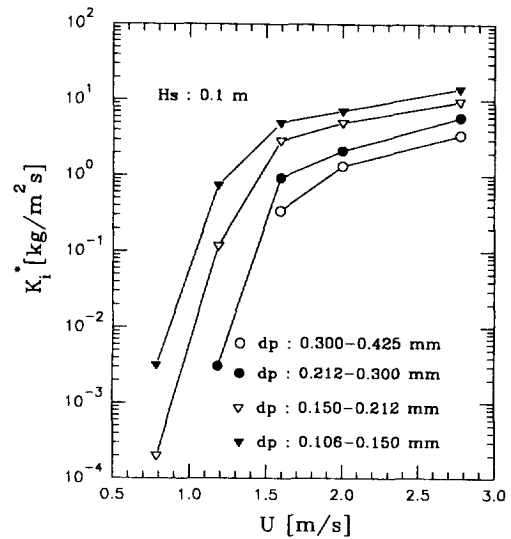


Fig. 5. Entrainment rate constant versus fluidizing velocity with a primary gas input only.

사료되었다.

3-4. 비산입자의 입도분포

기체가 분배기만으로 공급되고, 고정층 높이가 0.1m일 때, 유동화 속도가 변화되는 조건에서 비산된 입자의 입도분포(평균 입경)는 유속이 증가함에 따라 증가하였다. 이는 유속이 증가함에 따라 고체에 작용하는 drag force가 증가하여 더 굵은 입자들이 비산되기 때문이며, 유속 2.78 m/s에서는 비산입자의 입도분포가 층입자의 입도분포와 유사해 지는, 즉 층내의 거의 모든 입자가 비산되는 조건에 도달됨을 보였다.

Fig. 4는 2차 공기가 주입되고, 총괄기체속도가 2m/s이며, 일정한 고정층 높이 조건에서 2차 공기분율을 변화시켰을 때, 비산된 입자의 입도분포(누적 분율)를 나타낸다. 비산된 입자의 평균입도는 2차 공기분율이 증가할수록 감소하며, 2차 공기분율의 영향은 고정층 높이가 증가할수록 감소하였다. 이는 앞서 총괄비산속도에 대한 2차 공기분율의 영향과 동일하며, 또 그와 유사하게 설명될 수 있었다. 그럼에서는 각 총괄유속이 종말속도인 입경(d_{p0} , 계산값)을 함께 나타내고 있다 [10]. 고체의 구형도(sphericity)는 sharp sand로 고려하여 문헌의 값 0.67을 사용하였다.

3-5. 입도별 비산유출속도

입도별 비산유출속도는 다음식으로 정의되어 계산되었다.

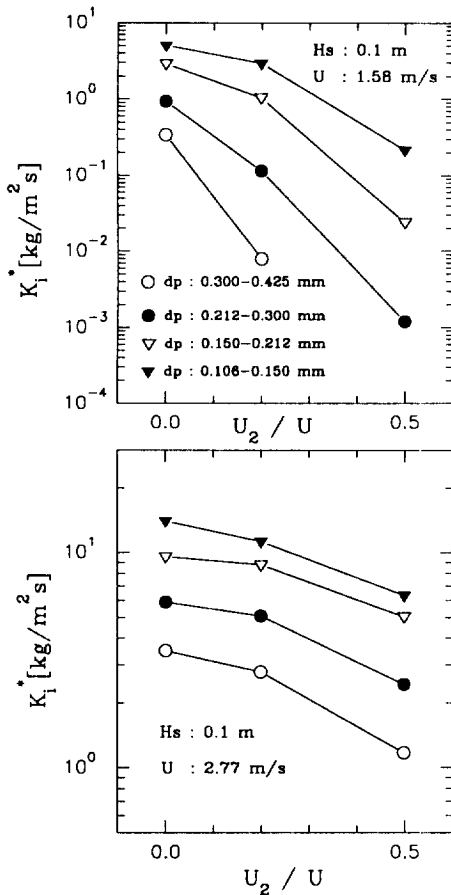


Fig. 6. Entrainment rate constant versus secondary air fraction($H_s=0.1\text{m}$).

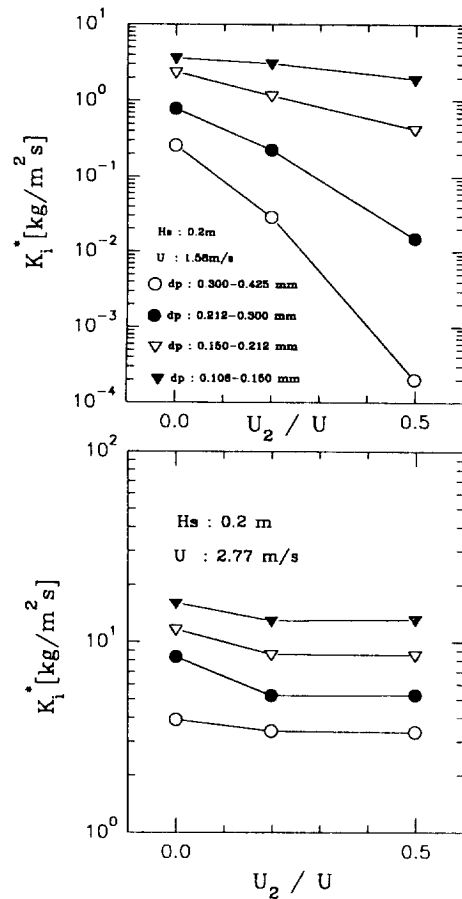


Fig. 7. Entrainment rate constant versus secondary air fraction($H_s=0.2\text{m}$).

$$K_i^* = \frac{\text{entrainment flux of particles of } i \text{ size}}{\text{weight fraction of bed particles of } i \text{ size}}$$

Fig. 5는 기체가 분배기로만 공급될 때 유동화 속도의 변화에 따른 입도별 비산유출속도를 나타낸다. 입도별 비산유출속도는 유동화 속도가 증가함에 따라 지수적으로 증가하고, 입경이 감소함에 따라 증가하는 일반적인 경향을 보였다. Choi 등[2]의 보고(입도범위: 0.127-0.335 mm)에서는 $U=0.74\text{ m/s}$ 일 때 $K_i^*=4.02 \times 10^{-3}$ - $2.06 \times 10^{-5}\text{ kg/m}^2\text{s}$, $U=1.63\text{ m/s}$ 일 때 $K_i^*=3.41$ - $1.19 \times 10^{-3}\text{ kg/m}^2\text{s}$, $U=2.44\text{ m/s}$ 일 때 $K_i^*=8.65$ - $3.88\text{ kg/m}^2\text{s}$ 를 보였다. 이에 비교하면 본 결과는 유속이 작은 범위에서 큰 입도의 K_i^* 가 비교적 크게 나타났으며, 그 밖의 경우에는 매우 유사하였다. 이는 본 실험장치의 프리보드 높이가 Choi 등[2]보다 낮았기 때문으로 사료되었다. 본 실험조건에서 고정층 높이의 영향은 미약하였다.

Fig. 6부터 Fig. 8까지는 2차 공기의 공급이 있고, 일정한 총괄유속(1.6, 2.77 m/s), 일정한 고정층 높이(0.1, 0.2, 0.3 m)에서 2차 공기분율을 변화시켰을 때 입도별 비산유출속도의 변화를 나타낸다. 입도별 비산유출속도는 입도가 감소할수록 크며, 2차 공기분율이 증가할수록 감소하였다. 앞서 총괄비산속도에 관한 경향에서 나타난 것과 같이, 2차 공기분율의 영향은 고정층 높이가 증가할수록, 총괄기체유속이 증가할수록 약화되었으며, 그 이유도 동일하게 설명될 수 있었다.

3-6. 문헌의 상관식과 비교

Fig. 9는 고정층 높이와 총괄기체유속이 일정할 때, 2차 공기분율과 입경에 따라 측정된 비산유출속도와 문헌의 상관식들에[11, 15-21] 의해서 계산된 값과의 비교를 나타낸다. Fig. 10은 일정한 고정층 높이에서, 2차 공기분율과 총괄기체유속에 따라 측정된 입도 0.181 mm

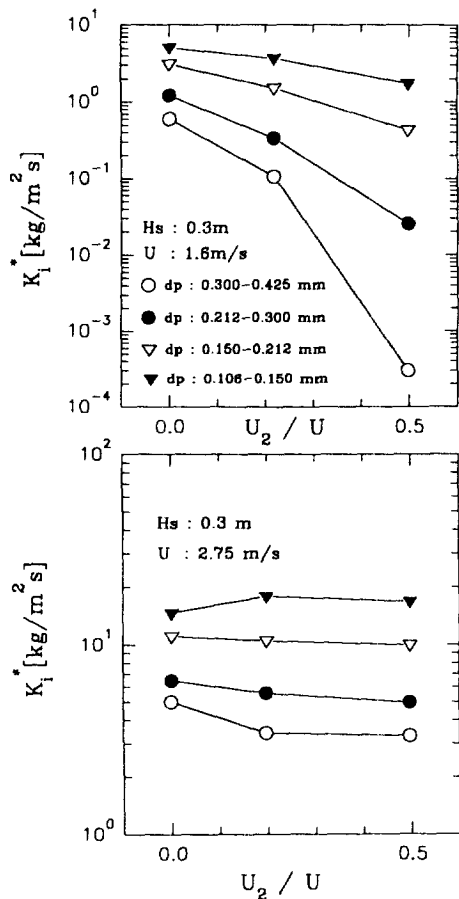


Fig. 8. Entrainment rate constant versus secondary air fraction($H_s = 0.3\text{m}$).

입자의 비산속도와 문헌의 상관식들[11, 15-21]에 의해서 계산된 값과의 비교를 나타낸다. 그림에서 모든 상관식들의 계산값은 총괄유속 조건에서 고려되었다. 비교된 상관식중 Merrick와 Highley[18]와 Wen과 Chen[21]의 상관식은 TDH 이하 및 이상에서 모두 적용되며, 그밖의 상관식은 TDH이상에서 적용된다.

그림에서 나타내는 것과 같이 일부 상관식들[19, 20]은 부분적으로 측정값과 유사한 경우도 있으나, 전반적인 영역에서 측정값과 만족하게 일치를 보이는 상관식은 없었다. Fig. 9에서 보이듯이 특히 TDH이상에서 적용되는 여러 상관식들의 값이 측정값보다 훨씬 큰 경향을 보였다. Wen과 Chen[21]의 상관식은 측정값보다 훨씬 작은 경향을 보였다. 이와 같은 차이의 가장 큰 원인은 입자비산구조가 유동층의 기하적 인자에 크게 영향을 받음에도 불구하고, 기존의 상관식들은 매우 간단한 무차원식으로 표현되어 상관식의 일반성이 떨어

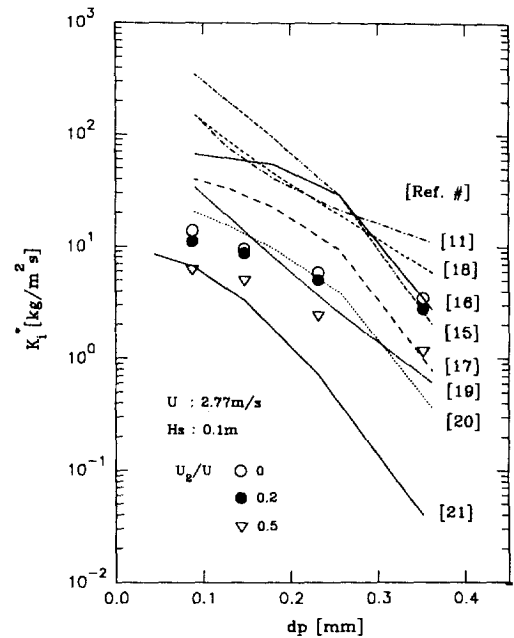


Fig. 9. Comparison between measured entrainment rate constants with calculated values by various correlations.

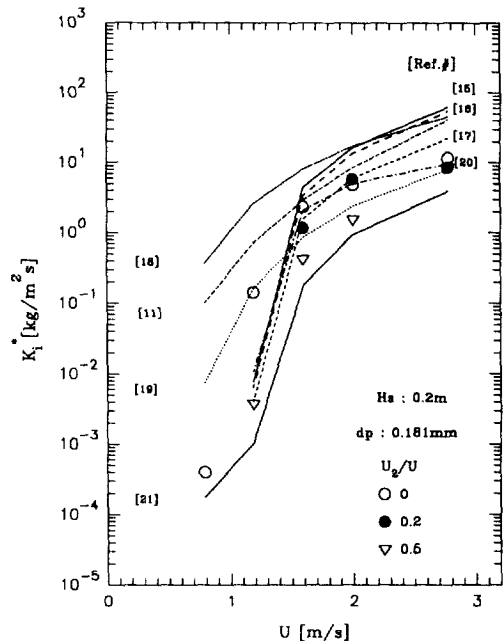


Fig. 10. Comparison between measured entrainment rate constants with calculated values by various correlations.

어지거 때문으로 사료되었다. 결과적으로 기존의 상관식으로 2차 공기의 주입에 따른 영향도 만족스럽게 나타낼 수 없었으며, 다만 공기공급의 경우에는 장치의 규격과 공기의 주입위치와 같은 기하적 영향과 주입된 기체의 거동이 보다 구체적으로 적용될 수 있는 해석이 필요한 것으로 사료되었다.

4. 결 론

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 입자비산속도는 유속이 증가할수록, 입경이 감소할수록 증가하였다.

(2) 입자비산속도에 대한 고정층 높이의 영향은 미약하였다.

(3) 2차 공기분율의 증가는 입자비산속도를 감소시켰다.

(4) 총괄기체유량이 일정한 조건에서 2차 공기분율의 영향은 2차 공기의 주입위치에 따라 다르며, 주입위치가 층내부일 경우에는 작으나, 주입위치가 프리보드일 경우에는 두드러지게 나타났다.

(5) 기체가 분배기만으로 공급되는 유동층에서 얻어진 기존의 상관식들로는 2차 공기가 공급되는 유동층에서 입자비산속도를 예측할 수 없었으며, 새로운 해석의 제시가 필요하였다.

감 사

본 연구는 환경처의 선도기술개발 사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 저자는 깊은 감사를 표합니다.

사용기호

- d_p : particle diameter [mm]
 d_{pt} : particle diameter having a terminal velocity that is equal to the superficial velocity [mm]
 E_t : total entrainment flux at the freeboard gas exit [kg/m²-s]
 h : height above the distributor plate [m]
 H_s : static bed height [m]
 K_i^* : entrainment rate constant of a particle of i size [kg/m²-s]
 P : pressure [Pa]
 U : total superficial gas velocity [m/s]
 U_2 : superficial gas velocity by secondary air input [m/s]
 X : cumulative fraction of particles greater than d_p

in size [-]

참고문헌

- Geldart, D.: in "Fluidization", edited by Davidson, J. F., Clift, R. and Harrison, D., Academic Press, London, 383(1985).
- Choi, J. H., Son, J. E. and Kim, S. D.: *J. Chem. Eng. Japan*, **22**, 597(1989).
- Wang, X. S. and Gibbs, B. M.: in "Circulating Fluidized Bed Technology III", edited by P. Basu, M. Horio and M. Hasatani, Pergamon Press, Oxford, 225(1991).
- Arena, U., Cammarota, A., Marzocchella, A. and Massimilla, L.: Proc. of the 12th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, 899(1993).
- Arena, U., Marzocchella, A., Bruzzi, V. and Massimilla, L.: Preprint Volume for the 4th Int. Conf. on Circulating Fluidized Beds, 660(1993).
- Baskakov, A. P., Maskae, V. K., Usoltsev, A. G., Ivanov, I. V. and Zubkov, V. A.: Preprint Volume for the 4th Int. Conf. on Circulating Fluidized Beds, 380(1993).
- Brereton, C. M. H. and Grace, J. R.: Preprint Volume for the 4th Int. Conf. on Circulating Fluidized Beds, 169(1993).
- Cho, Y. J., Namkung, W., Kim, S. D. and Park, S.: *J. Chem. Eng., Japan*, **27**, 158(1994).
- Wu, S. and Alliston, M.: Proc. of the 12th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, 1003(1993).
- Kunii, D. and Levenspiel, O.: "Fluidization Engineering", 2nd ed., Butterworth-Heinemann, 95 (1991)
- Zenz, F. A. and Weil, N. A.: *AIChE J.*, **4**, 472(1958).
- Soroko, V. E., Mikhalev, M. F. and Mukhlenov, I. P.: *Int. Chem. Eng.*, **9**, 280(1969).
- Yoon, Y. S.: "Entrainment of Coal in Fluidized Beds", Master Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Seoul, Korea(1981).
- Baron, T., Briens, C. L., Galtier, P. and Bergougou, M. A.: *Powder Technology*, **63**, 149(1990).
- Yagi, S. and Aochi, T.: Paper presented at Soc. Chem. Engrs.(Japan) Spring Meeting(1955).
- Wen, C. Y. and Hashinger, R. F.: *AIChE J.*, **6**, 220 (1960).
- Tanaka, I., Shinohara, H., Hirose, H. and Tanaka, Y.: *J. Chem. Eng. Japan*, **5**, 51(1972).
- Merrick, D. and Highley, J.: *AIChE Symp. Ser.*, **70**, 366(1974).

19. Geldart, D., Cullinan, J., Georghiades, S., Gilvray, D. and Pope, D.J.: *Trans. IChemE*, **57**, 269(1979).
20. Colakyan, M. and Levenspiel, O.: *Powder Technology*, **38**, 223(1984).
21. Wen, C. Y. and Chen, L. H.: *AIChE J.*, **28**, 117 (1982).