

2차 공기가 주입되는 상온 유동층에서 고체입자의 비산에 관한 모델

최 정 후

건국대학교 화학공학과
(1994년 3월 8일 접수, 1994년 6월 10일 채택)

Model on Particle Entrainment in a Cold Model Fluidized Bed with Secondary Air Injection

Jeong-Hoo Choi

Department of Chemical Engineering, Kon-Kuk University, Seoul 133-701
(Received 8 March 1994; accepted 10 June 1994)

요 약

2차 공기가 주입되는 상온 유동층에서 입자비산속도에 관한 간략화된 모델을 고찰하였다. 프리보드에서 비산되는 입자의 상방향 운동방정식, 총표면에서 입자의 비산속도 및 상승속도가 고려되었다. 모래를 충물질로 사용하고 공기 분배기로부터 0.2 m 높이에 2차 공기가 공급되는 상온 유동층(직경 0.1 m, 높이 2.4 m)에서 측정된 입자비산속도와 모델의 계산값을 비교 고찰하였다. 총괄 비산속도에 있어서 모델의 예측은 2차 공기분율의 영향을 잘 나타낼 수 있었다. 그러나 입도별 비산속도에 있어서 모델의 예측은 굵은 입자의 경우에는 측정값보다 컸고, 작은 입자의 경우에는 그 반대현상을 보였다. 모델의 개선을 위해서 총표면의 입도분리현상에 관한 고려가 더 개선되어야 할 것으로 사료되었다.

Abstract—A simplified model on particle entrainment was discussed in a cold model fluidized bed with a secondary air injection. The model considered the one-dimensional equation of motion for the entrained particles in the freeboard, the entrainment rate at the bed surface, and the rising velocity of the particles at the bed surface. The model was compared with the measured particle entrainment rate in a cold model fluidized bed(0.1 m-ID, 2.4 m-height) of sand as a bed material and a secondary air injection at 0.2 m above the distributor plate. For the total entrainment rate, the model described the effect of the secondary air fraction well. However, the model predicted the lower entrainment rate than the measured value for the small particles and vice versa for the large particles. It was thought that the model should consider the particle segregation additionally for the better prediction.

1. 서 론

기체 유동층에서 입자비산은 가장 중요한 고유특성 중의 하나이다. 이는 일부 반응기에서 반응효율의 감소, 경제적 손실, 분진공해 등을 유발하는 중요한 단점이기도 하지만, 순환유동층과 같은 다른 반응기에서는 규모증대의 수단으로 적정 수준이 유지되어야 하는 특

성이기도 하다.

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 유동화공정이 연소공정 등

에서 적극적으로 적용되기 시작하였고, 이같은 복잡한 형태에서 층특성의 변화가 주목되어 실험적 연구가 진행되고 있다[3-11]. 이들중 Choi 등[11]의 연구를 제외한 대부분의 연구는 순환유동층에서 수행되었으며, 실험변수로 총괄유속, 2차 공기분율, 외부 고체순환속도를 변화시키며, riser에서 고체 체류량의 변화를 관찰하였다. 이들의 연구에 대해서는 Choi 등[11]의 연구에서 대략적으로 고찰되었다.

Choi 등[11]은 공기 분배기로부터 0.2 m 높이에 2차 공기가 공급되는 직경 0.1 m, 높이 2.4 m의 상온 유동층에서 입자비산속도를 측정 및 고찰하였다. 층물질로는 체구경 0.425 mm 이하의 모래가 사용되었으며, 실험변수로는 입도(0.128-0.363 mm), 총괄유속(0.76-2.77 m/s), 2차 공기분율(0-0.5), 층높이(0.1-0.3 m)가 변화되었다. 입자비산속도에 대한 유속, 입경, 고정층높이의 영향은 일반적인 경향을 보였으며, 2차 공기분율의 증가는 입자비산속도를 감소시켰다. 2차 공기의 영향은 주입위치에 따라 다르게 나타났으며, 층내부일 경우에는 작으나, 프리보드일 경우에는 두드러졌다. Choi 등[11]의 연구에서는 측정된 입자비산속도와 기존의 상관식에 의한 예측값이 비교되었으며, 측정값과 적절히 일치하는 상관식이 없었다. 이는 비교된 상관식들이 모두 제한적인 범위에서 얻어진 실험결과를 기반으로 만들어진 순수한 실험식들로 일반화에는 미흡하였기 때문이었다.

기존 실험식들의 제약을 극복하기 위한 시도로 반이론적인 해석이 있다. Choi 등[2]은 프리보드에서 운동식에 의한 비산입자의 거동 해석과 층표면에서 비산속도 및 비산입자의 상승속도를 동시에 고려한 구조적인 해석을 제시하였다. 본 연구는 Choi 등[11]의 연구에서 측정된 결과에 대한 이론적인 해석의 시도이며, 2차 공기가 주입되는 기체분배구조의 유동층에서 입자비산속도에 대한 2차 공기분율의 영향을 해석하는데 1차 공기만이 공급되는 유동층에서 유도된 단순화된 반이론적인 모델의 적용 가능성에 주목하였다. 모델로는 Choi 등[2]의 모델이 적용되었으며, 2차 공기가 주입되는 경우에 적합하도록 간략한 가정이 도입되어 고찰되었다.

2. 이론적 배경

2-1. 층팽창

유동층의 해석과 freeboard에서 입자거동의 해석을 위해서는 층과 freeboard의 경계인 층표면의 위치가 설정되어야 한다. 층표면의 입자거동은 기포파괴에 의해서 매우 격렬한 요동을 보이기 때문에 층표면의 정의는 매우 애매하다. 기체유속의 증가에 따른 층의 팽창은 층내 기포의 존재와 에멀전상의 팽창에 기인하는

것으로 볼 수 있으며, 기체흐름형태와 깊게 관련된다. 층내 기포의 존재는 기포의 파괴분율만큼 층을 팽창시키며 기포의 파괴분율은 기포흐름량과 기포의 상승속도에, 그리고 기포의 상승속도는 기포크기에 연관된다. 에멀전상의 팽창과 기포흐름에 대한 이해는 아직도 층팽창 특성을 정확히 규명하기에는 미흡하며, 더욱이 2차 공기가 주입되는 경우에는 2차 공기의 거동에 대한 견해가 애매해진다.

결과적으로 본 연구에서 층팽창의 해석에는 단순한 2상 이론[12]을 적용하였으며, 2차 공기의 주입위치가 층내일 경우에는 주입 높이이상부터 공담유속이 즉시 증가하는 것으로 가정하여 과잉기체속도($U_o - U_{mf}$)를 고려하였다.

팽창층높이와 최소 유동화 상태에서 층높이 사이의 관계는 층내에서 기포특성으로 다음과 같이 표현된다 [13, 14].

$$H_c = \frac{H_{mf}}{1 - \int_0^{H_c} \frac{U_o - U_{mf}}{U_b} dh} \quad (1)$$

$$U_b = U_o - U_{mf} + 0.711\sqrt{gD_b} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} (U_o - U_{mf})(D_b - D_{bo}) + 0.474g^{1/2}(D_b^{3/2} - D_{bo}^{3/2}) \\ = 1.132(U_o - U_{mf})h \end{aligned} \quad (3)$$

식 (1)의 풀이는 먼저 임의로 팽창층높이를 가정하고 우변을 계산하여 새로운 팽창층높이를 얻은 후 가정된 팽창층높이와 비교하고 다시 반복해서 계산하여 수렴되는 팽창층높이를 결정하였다.

2-2. 입자비산속도

2차 공기가 주입되는 유동층의 프리보드에서 입자비산현상을 모사하기 위해서 Choi 등[2]과 유사하게 다음의 간결화된 모델을 고려하였다.

(1) 층표면에서 파괴되는 기포는 입자를 층으로부터 프리보드로 비산시키며, (2) 입자와 입자사이의 상호 영향과 벽면에 의한 영향은 무시될만큼 작고, (3) 반응에 의한 입자의 무게 및 크기의 변화도 무시될만큼 작다. (4) 입자의 거동은 운동식(equation of motion)에 의해서 나타내진다. (5) 층내 입자의 마모는 무시되며, (6) 프리보드 기체출구 높이에 도달하는 비산입자는 모두 밖으로 유출되는 것으로 간주되며, (7) 층내의 입자거동은 완전혼합상태로 간주된다.

층표면에서 기포파괴에 의해서 올려지는 구형입자의 freeboard에서 수직방향 거동은 다음의 운동식으로 나타낼 수 있다[2, 15].

$$\frac{dV_p}{dt} = -\frac{3}{4} \frac{C_D \rho_g (V_p - U_o) |V_p - U_o|}{\rho_p d_p} - \frac{(\rho_p - \rho_g)g}{\rho_p} \quad (4)$$

$$\text{Initial Condition : } V_p = V_{p0} \text{ at } t=0 \quad (5)$$

Drag coefficient :

$$C_D = \frac{24}{N_{Re}} (1 + 0.15 N_{Re}^{0.687}) + \frac{0.42}{1 + 4.25 \times 10^4 N_{Re}^{-1.16}} \quad (6)$$

$$\text{if } N_{Re} = \frac{\rho_g d_p |V_p - U_o|}{\mu} < 10^5 \quad (7)$$

V_{p0} 는 초기조건으로 입자가 충표면에서 던져질 때 초기상승속도이며, U_o 는 입자의 높이에서 공탐유속으로 2차 공기가 주입될 때에는 주입높이 이상에서 공탐유속이 즉시 증가하는 것으로 간주되었다. 입자의 시간에 비산된 입자의 도달높이는 다음과 같이 표현되며

$$h_f(t) = \int_0^t V_p dt \quad (8)$$

상승높이가 프리보드 정상에 이르면 입자는 연소로 밖으로 유출되는 것으로 간주되었다.

충표면에서 올려진 입자의 프리보드내 체적과 비산속도를 결정하기 위해서 초기 상승속도와 초기 비산속도는 다음과 같이 표현되었다.

$$\frac{V_{p0}}{V_{pmax}} = \exp(-2.44x) \quad (9)$$

$$\frac{V_{pmax}}{U_{bs}} = 0.71 d_p^{-1.65} \quad (10)$$

$$E_o = 9.6(U_o - U_{mf})^{2.5} AD_{hs} \quad (11)$$

입자의 초기상승속도는 동일한 입경이라 할지라도 입자의 속도분포를 가지며 식 (9)와 (10)은 입의 유동조건에서 입경에 따른 최대 상승속도와 초기 상승속도 분포를 나타낸다. 여기서 x 는 입경 d_p 인 입자중 초기상승속도가 V_{p0} 보다 큰 입자의 누적분율을 나타낸다. 식 (10)에서 입경(d_p)의 단위는 mm이다. 충표면에서 초기에 비산되는 입자들의 입도분포는 충의 입도분포와 동일한 것으로 간주되었다.

결과적으로 입자비산속도는 식 (4)부터 식 (11)이 연립되어 결정된다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 총괄 입자비산속도

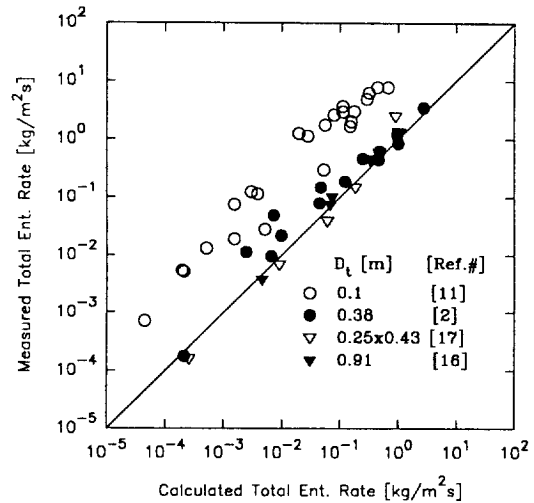


Fig. 1. Comparison between calculated total entrainment rate and measured value with primary air only.

Fig. 1은 2차 공기의 주입이 없는 경우에 모델에서 계산된 총괄 입자비산속도와 문헌[2, 11, 16, 17]의 값과 비교를 나타낸다. Choi 등[2]의 보고에서는 자신들의 실험결과와 Gugnoni와 Zenz[16], George와 Grace[17]의 실험결과를 기반으로 Wen과 Chen[18]의 충표면에서 초기 비산속도에 관한 상관식의 비례상수를 수정하여 식 (11)을 제시하였으며, 그림에서 나타내는 것과 같이 모델의 계산값은 이들의 측정값과 잘 일치하였다. 그러나 Choi 등[11]의 실험결과보다는 거의 일정한 비로 더 작은 값을 보였다.

이들의 실험조건을 비교해 보면, 유속의 영향은 유사하였으며[2, 11], 충의 직경이 0.1, 0.25×0.43, 0.38, 0.91 m로 큰 차이가 있었다. 측정된 입자비산속도를 기반으로 식 (11)의 충직경(hydraulic diameter)의 영향을 재고하였으며, 충표면에서 초기비산속도는 다음의 상관식으로 표현되었다.

$$E_o = 4.04(U_o - U_{mf})^{2.5} D_{hs} D_t^{0.511} \quad r^2 = 0.74 \quad (12)$$

한편 충표면에서 총괄비산속도에 관한 상관식에 대해서는 더 많은 개선이 계속되어야 할 것이며, 본 연구에서는 기존의 단순화된 반이론적인 모델에 의한 입자비산속도의 예측이 2차 공기가 주입되는 유동충에도 적용될 수 있는가에 주안점을 두어 이후의 모델계산에서는 식 (11) 대신에 식 (12)를 사용하였다.

Fig. 2는 기체가 분배기로만 공급될 때, 유동화속도의 변화와 고정층높이의 변화에 따라 측정된 총괄비산속도와 계산값의 비교를 나타낸다. 총괄비산속도는 유속이

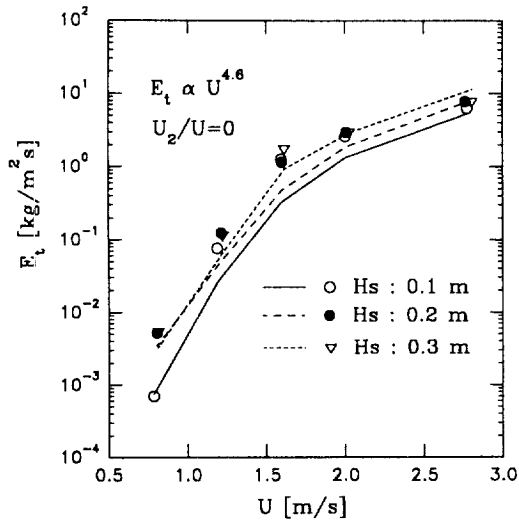


Fig. 2. Total entrainment rate versus fluidizing velocity with primary air only[11].

증가함에 따라 지수적으로 증가함을 보이며, 모델의 예측이 측정값의 경향에 잘 일치함을 보였다. 총괄비산속도에 대한 고정층높이의 영향은 모델에서도 크지 않게 나타났다.

Fig. 3은 2차 공기가 주입되고, 일정한 총괄유속에서 고정층높이와 2차 공기분율이 변화하였을 때 측정된 총괄비산속도와 계산된 값의 비교를 보여준다. 총괄비산속도는 2차 공기분율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 고정층높이가 증가할수록 증가하였다. 2차 공기분율의 영향은 총괄유속이나 고정층높이가 증가함에 따라 급격히 감소되는 현상을 보였다. 그림에서 나타내는 것과 같이 계산값은 측정값과 정성적으로나 정량적으로 비교적 잘 일치함을 보였다.

3-2. 비산입자의 입도분포

Fig. 4는 2차 공기가 주입되고, 총괄기체속도가 2 m/s이며, 일정한 고정층높이 조건에서 2차 공기분율을 변화시켰을 때, 비산된 입자의 입도분포(누적분율)와 계산값의 비교를 나타낸다. 측정된 비산입자의 평균입도는 2차 공기분율이 증가할수록 감소하였으며, 2차 공기분율의 영향은 고정층높이가 증가할수록 감소하였다. 계산값은 고정층높이가 0.1 m의 경우에는 측정값과 잘 일치하는 경향을 보였으나 고정층높이 0.2, 0.3 m의 경우에는 측정값보다 굵은 입도를 보였다. 이 층높이에서는 2차 공기의 주입위치가 층내이며, 이러한 차이를 보이는 중요한 요인으로 층내에서 입도분리현상(segregation)을 고려할 수 있는 것으로 사료되었다. 입도분

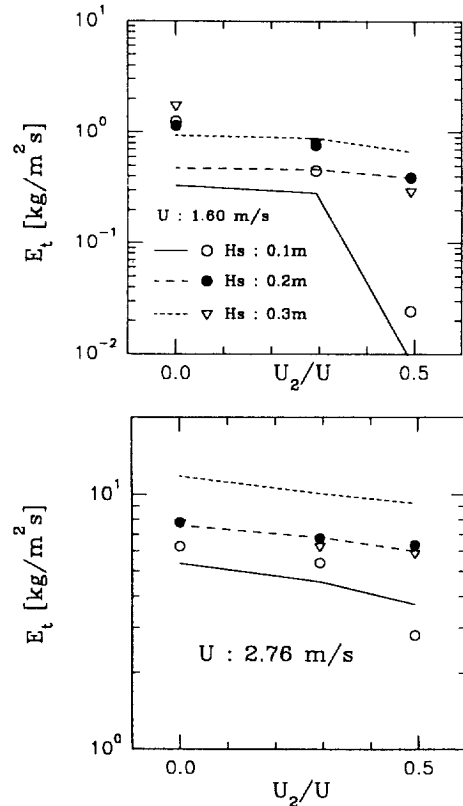


Fig. 3. Total entrainment rate versus secondary air fraction[11].

리현상의 요인으로서는 층높이(aspect ratio)의 영향이 먼저 생각될 수 있었고, 앞서 순환유동층에서 수행된 연구 [4-10]에서 관찰되었듯이 2차 공기의 주입에 의한 측방향 고체혼합의 저하로 인한 영향을 고려할 수 있었다. 그림에서 고정층높이가 0.3 m일 때 계산값의 경우에 2차 공기분율 0.2, 0.5에서 비산입자의 입도가 미소하나마 증가된 경향을 보이는 것은 2차 공기비 0.2, 0.5인 실험조건에서 사용된 층내 입자의 입도분포가 1차 공기만을 주입한 경우보다 미소하게나마 컸기 때문이었다.

3-3. 입도별 비산유출속도

입도별 비산유출속도는 다음식으로 정의되어 계산되었다.

$$K_i^* = \frac{\text{entrainment flux of particles of } i \text{ size}}{\text{weight fraction of bed particles of } i \text{ size}} \quad (13)$$

Fig. 5는 기체가 분배기로만 공급될 때 유동화속도의

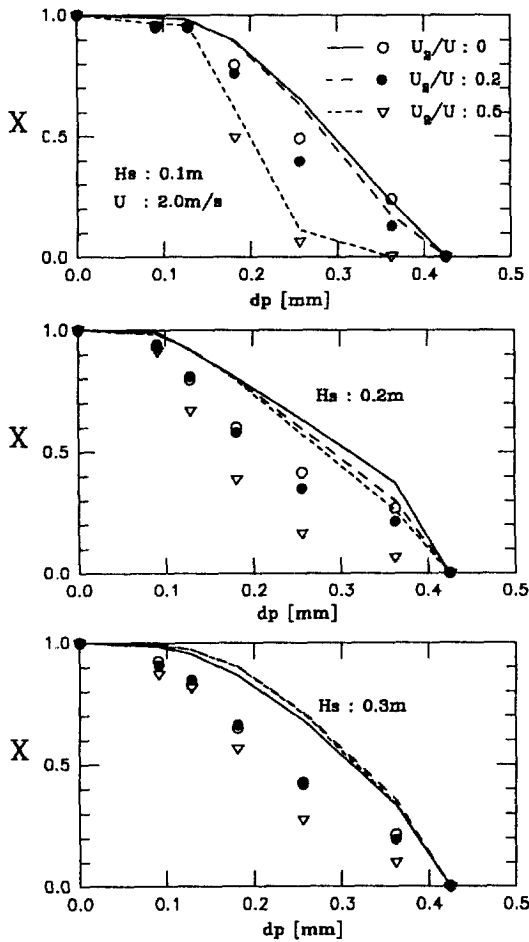


Fig. 4. Size distribution of entrained particles with secondary air injection[11].

변화에 따라 측정된 입도별 비산유출속도와 계산값의 비교를 나타낸다. 입도별 비산유출속도는 유동화속도가 증가함에 따라 지수적으로 증가하고, 입경이 감소함에 따라 증가하는 일반적인 경향을 보였으며, 계산값의 경향은 측정값과 비교적 잘 일치하였다. 굵은 입자의 경우에는 측정값과 계산값이 좋은 일치를 보이나, 작은 입자의 경우에는 측정값이 예측값보다 다소 컸다. 이와 같은 차이의 요인도 Fig. 4에서 고찰되었듯이 모델에서 가정한 완전혼합조건의 층내 입도분포와 층표면에서 실제 입도분포 사이에 차이가 있기 때문이며, 층표면에서 작은 입자의 분율이 더 컸던 것으로 사료되었다.

Fig. 6부터 8까지는 2차 공기의 공급이 있고, 일정한 총괄유속(1.6, 2.77 m/s), 일정한 고정층높이(0.1, 0.2, 0.3 m)에서 2차 공기분율을 변화시켰을 때 측정된 입도별 비산유출속도와 계산된 값의 비교를 나타낸다. 입도별

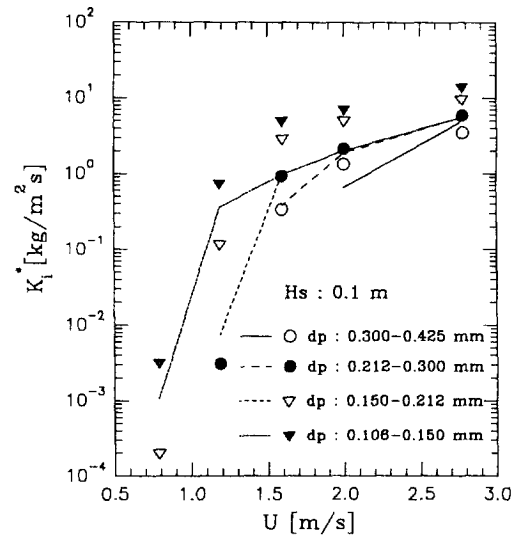


Fig. 5. Entrainment rate constant versus fluidizing velocity with a primary gas input only[11].

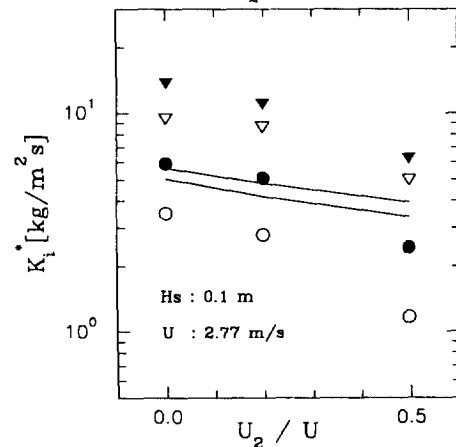
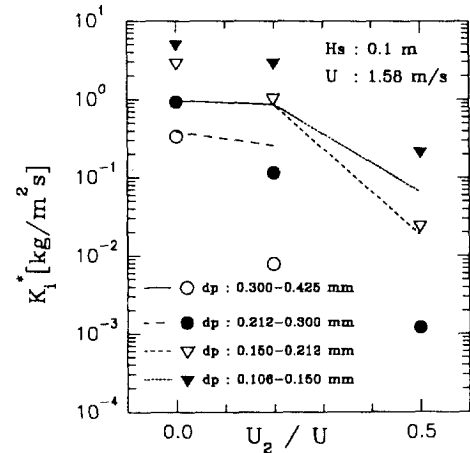


Fig. 6. Entrainment rate constant versus secondary air fraction($H_s=0.1$ m)[11].

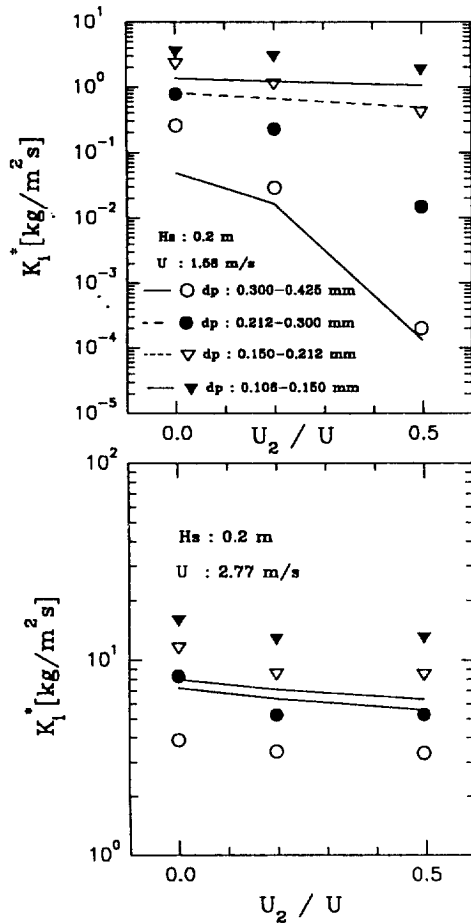


Fig. 7. Entrainment rate constant versus secondary air fraction($H_s=0.2$ m)[11].

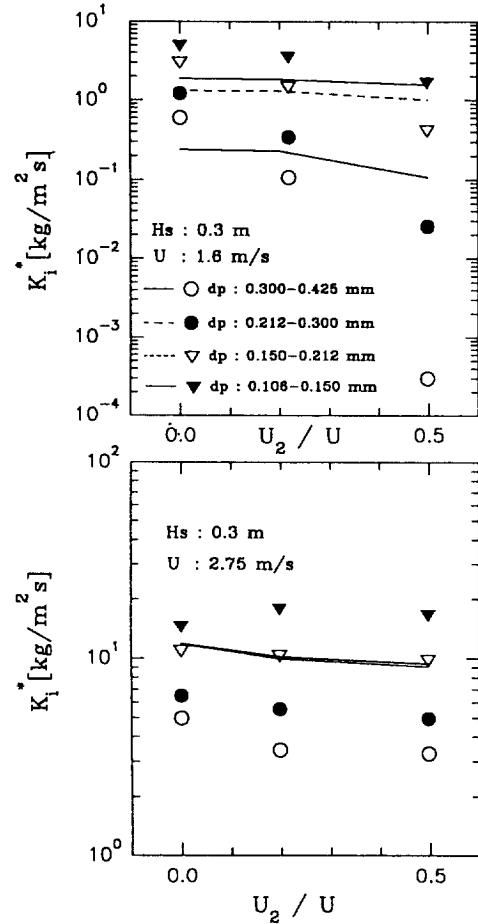


Fig. 8. Entrainment rate constant versus secondary air fraction($H_s=0.3$ m)[11].

비산유출속도는 입도가 감소할수록 크며, 2차 공기분율이 증가할수록 감소하였다. 앞서 총괄비산속도에 관한 경향에서 나타난 것과 같이, 2차 공기분율의 영향은 고정층높이가 증가할수록, 총괄기체유속이 증가할수록 약화되었다. 그림에서 나타내는 것과 같이 계산값은 측정값과 비교적 유사한 경향을 나타내었으나, 굵은 입자의 경우에는 대체로 측정값보다 크고, 작은 입자의 경우에는 측정값보다 작았다. 굵은 입자의 경우에 측정값과 차이는 유속이 작을수록, 고정층 높이가 클수록, 2차 공기분율이 클수록 증폭되었다. 이와 같은 차이도 모델에서 가정한 완전혼합조건의 입도분포와 총표면에서 실제 입도분포 사이에 차이에 기인하는 것으로 사료되었다.

그림에서 고정층 높이 0.2, 0.3 m이고, 총괄유속 1.58 m/s(혹은 1.6 m/s)의 경우에 평균입경 0.181, 0.128

mm의 계산된 비산속도는 동일한 값을 갖었다(상부 곡선). 또 전 고정층 높이에서 총괄유속 2.75 m/s(혹은 2.77 m/s)의 경우에 평균입경 0.256, 0.181, 0.128 mm의 계산된 비산속도도 동일한 값을 갖었다(상부 곡선). 이는 이들 조건에서 총표면의 공탐유속이 이들 입자의 종말속도보다 컸기 때문이었다.

고정층높이 0.3 m의 경우와 같이 2차 공기가 층내로 주입될 때에는 모델계산에서 2차 공기분율이 증가할수록 층의 기포특성중 기포의 파괴분율이 작아지고, 팽창층높이가 낮아져서, 총표면에서 기포크기가 작게 고려되었다. 따라서 총표면에서 초기비산속도와 비산고체의 초기상승속도가 작게 고려되었다.

한편 Fig. 5에서 나타내는 것과 같이 실험에서는 유속 1.59 m/s에서 비산되는 입경 0.3-0.425 mm의 입자가 상당한 양이었으나 모델에서는 프리보드 기체출구에 도

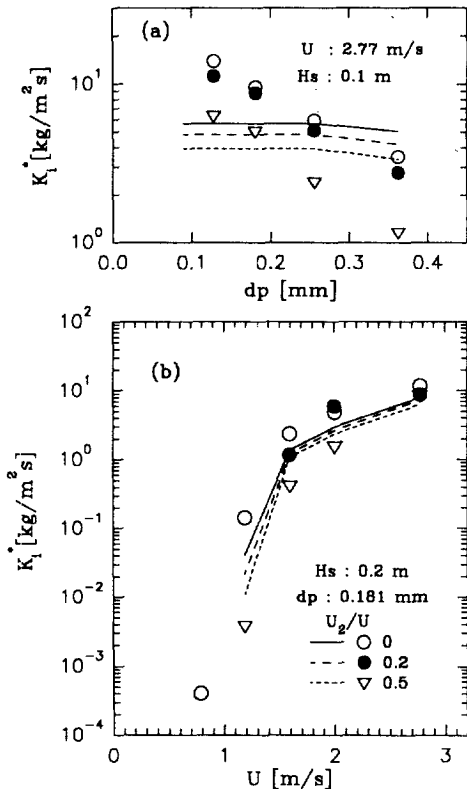


Fig. 9. Comparison between measured entrainment rate constants[11] with calculated values.

달하는 입자의 최대입경이 0.29 mm로 계산되어, 근소한 입경 차이로 이 유속에서 비산되는 입경 0.3-0.425 mm의 입자는 없는 것으로 계산되었다. 또 Fig. 6에서도 총괄 유속 1.58 m/s의 경우에 입경 0.3-0.425 mm 입자의 비산속도도 2차 공기분율 0에서 0.2에 이르기까지 상당한 값을 나타내었으나, 모델에서는 프리보드 기체출구에 도달하는 입자의 최대입경이 $U_2/U=0, 0.2$ 의 경우에 각각 0.29, 0.275 mm로 계산되어, 근소한 입경차이로 이 유속에서 비산되는 입자가 없는 것으로 계산되었다. 이와 유사한 결과는 비록 측정된 비산속도가 작지만 일부 작은 입자의 경우에도 유속이 작은 조건에서 나타났다[Fig. 5, 9(b)]. 이는 모델 상관식들의 해석에서 수반된 가정 혹은 오차에 기인하는 것으로 사료되었으며, 이를 보완하기 위해서는 모델에서 계산되는 프리보드 기체출구에 도달하는 입자의 최대입경을 일정 범위(약 10%)에서 더 크게 고려함이 바람직한 것으로 사료되었다.

Fig. 9(a)는 고정충높이와 총괄기체속도가 일정할 때, 2차 공기분율과 입경에 따라 측정된 비산유출속도와

계산값의 비교를 나타낸다. Fig. 9(b)는 일정한 고정충높이에서, 2차 공기분율과 총괄기체속도에 따라 측정된 입도 0.181 mm 입자의 비산속도와 계산값의 비교를 나타낸다. 입자비산속도는 입도가 작을수록, 2차 공기분율이 작을수록, 유속이 증가할수록 증가하였다. 계산값은 측정값과 유사한 경향을 보였으며, 앞서 Choi 등[11]의 연구에서 비교된 기존의 상관식들보다 더 잘 일치하였다.

4. 결 론

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다. 프리보드에서 비산되는 입자의 상방향 운동방정식, 총표면에서 초기비산속도, 초기상승속도를 고려하는 입자비산속도에 관한 모델은 세부적으로는 미흡하지만 2차 공기가 공급되는 유동층에서 입자비산속도를 예측하는데 유효하였다. 총괄 비산속도에 있어서 모델의 예측은 2차 공기분율의 영향을 잘 나타낼 수 있었다. 그러나 입도별 비산속도에 있어서는, 굵은 입자의 경우 예측값이 측정된 값보다 컸으며, 작은 입자의 경우에는 그 반대 현상을 보였다. 모델의 미흡함을 보완하기 위해서는 총표면에서 입도분포에 관한 고려가 더 개선되어야 할 것으로 사료되었다.

사용기호

- A : cross-sectional area of bed surface [m²]
- C_D : drag coefficient [-]
- D_b : spherical bubble diameter [m]
- D_{bo} : D_b at the distributor [m]
- D_{bs} : D_b at the bed surface [m]
- d_p : particle diameter [m]
- D_r : hydraulic diameter of bed surface [m]
- E_o : total entrainment flux at the bed surface [kg/m² s]
- E_t : total entrainment flux at the freeboard gas exit [kg/m² s]
- g : gravitational acceleration [m/s²]
- h : height above the distributor plate [m]
- H_e : expanded bed height [m]
- h_f : height above the bed surface [m]
- H_{mf} : bed height at minimum fluidizing state [m]
- H_s : static bed height [m]
- K_i^* : entrainment rate constant of a particle of i size [kg/m² s]
- N_{Re} : Reynolds number [-]
- r : regression coefficient [-]

- t : time [s]
 U : total superficial gas velocity [m/s]
 U_b : bubble rising velocity [m/s]
 U_{bs} : bubble rising velocity at the bed surface [m/s]
 U_{mf} : superficial gas velocity at minimum fluidizing state [m/s]
 U_o : superficial gas velocity at a height above the distributor plate [m/s]
 U_2 : superficial gas velocity by secondary air input [m/s]
 V_p : rising velocity of an entrained particle in the freeboard [m/s]
 V_{po} : V_p at bed surface [m/s]
 V_{pmax} : maximum V_{po} [m/s]
 X : cumulative fraction of particles greater than d_p in size [-]
 x : cumulative fraction of particles having initial rising velocities greater than V_{po} among particles which is d_p in diameter
 μ : gas viscosity [Pa s]
 ρ_g : gas density [kg/m³]
 ρ_p : solid density [kg/m³]

참고문헌

- Geldart, D.: "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).
- Rhodes, M. J. and Geldart, D.: *Chem. Eng. Res. Des.*, **67**, 20(1989).
- Wang, X. S. and Gibbs, B. M.: "Circulating Fluidized Bed Technology III", edited by Basu, P., Horio, M. and Hasatani, M., 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., Maskaev, 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., Park, S. W. and Kim, S. D.: *J. Chem. Eng. Japan*, **27**, 158(1994).
- Wu, S. and Alliston, M.: Proc. of the 12th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, 1003(1993).
- Choi, J. H., Kim, K. J. and Kim, P.: *HWAHAK KONGHAK*, **32**, 489(1994).
- Toomy, R. D. and Johnstone, H. F.: *Chem. Eng. Symp. Ser.*, **49**, 51(1953).
- Davidson, J. F. and Harrison, D.: "Fluidized Particles", Cambridge Univ. Press, London(1963).
- Choi, J. H., Son, J. E. and Kim, S. D.: *J. Chem. Eng. of Japan*, **21**, 171(1988).
- Do, H., Grace, J. R. and Clift, R.: *Powder Technology*, **6**, 195(1972).
- Gugnoni, R. J. and Zenz, F. A.: in "Fluidization", edited by Grace, J. R. and Matsen, J. N., Plenum Press, New York, 501(1980).
- George, S. E. and Grace, J. R.: *Can. J. Chem. Eng.*, **59**, 279(1981).
- Wen, C. Y. and Chen, L. H.: *AIChE J.*, **28**, 117 (1982).