

기체유동층에서 온도변화에 따른 고체입자의 비탈동반특성

최정후[†] · 최광배 · 김병채* · 선도원** · 김상돈***

건국대학교 화학공학과

*진도종합건설(주)

**한국에너지기술연구소

***한국과학기술원 화학공학과

(1995년 3월 7일 접수, 1995년 5월 31일 채택)

Effect of Temperature on Particle Entrainment in a Gas Fluidized Bed

Jeong-Hoo Choi[†], Kwang-Bae Choi, Peter Kim*, Do-Won Shun** and Sang-Done Kim***

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

**Jindo Eng. & Construction Co., Seoul*

***Korea Institute of Energy Research, Taejon*

****Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon*

(Received 7 March 1995; accepted 31 May 1995)

요 약

전기로 가열되는 직경 0.1 m, 높이 2.1 m의 유동층에서 혼합입도(0-0.425 mm)의 모래를 충물질로 사용하여 층온도의 변화에 따른 고체입자의 비탈동반특성을 고찰하였다. 실험변수로는 입도(0.075-0.425 mm), 기체유속(0.65-2.3 m/s), 유동층온도(20-600°C)가 고려되었다. 입자비산속도에 대한 층온도의 영향은 유동화속도 0.8 m/s 이하에서는 온도가 증가함에 따라 아주 완만하게 증가하는 경향을 보였다. 유동화속도 1 m/s 이상에서는 온도가 증가함에 따라 감소하다가 최소값을 보인 후 다시 증가하는 경향을 나타내었으며, 최소값의 위치는 유속이 증가함에 따라 더 높은 온도로 이동하였다. 이와 같은 경향은 유동화속도가 종말속도인 입경이 온도에 따라 변화하는 경향과 일치하였다.

Abstract—The effect of temperature on the particle entrainment rate was measured and discussed in a gas fluidized bed(0.1m in diameter, 2.1m high) which used sand as a bed material and was equipped with an electric heater. The particle size(0.075-0.425 mm), gas velocity(0.65-2.3 m/s) and bed temperature(20-600°C) were varied as experimental variables. The particle entrainment rate increased very slowly with the bed temperature at the gas velocity less than 0.8 m/s. At the gas velocity greater than 1 m/s, the particle entrainment rate decreased with increasing the bed temperature until a certain temperature above which the particle entrainment rate increased with the bed temperature. The minimum point of particle entrainment rate shifted to higher temperature with increasing gas velocity. The change of the particle entrainment rate along the bed temperature was same as that of the particle size whose terminal velocity was equal to the gas velocity.

1. 서 론

기체-고체 유동층에서 고체비산특성은 유동층의 성능과 수력학특성을 결정하는 중요한 공정인자로서 비산입자량을 제어하고 적절한 집진설비의 선택을 위해서는 구조적 및 정량적인 비산특성의 이해가 필요하다. 고체의 비산속도에 관한 기존의 연구는 주로 상온에서 기체유속, 입자크기, 입자밀도, 유동층규격 등의 영향이 실험적으로 수행되어 보고되었으며, 실제 반응온도에 적용될 수 있는 연구보고는 몇몇에 불과하여 아직도 정성적인 이해에 그치고 있다.

Table 1은 입자비산속도에 대한 온도영향에 관하여 문헌에 보고된 연구들을 요약하여 나타낸다.

Son 등[5]과 Choi 등[6]은 온도 780-940°C에서 연속운전되는 유동층연소로(단면적 0.3×0.3 m, 1.01×0.83 m)에서 온도가 증가함에 따라 총괄비산속도는 완만히 감소하는 것으로, 또 총표면에서 상승하는 입자의 초기상승속도는 온도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 보고하였다. 층온도의 변화는 없었으나 유동층연소로에서 측정된 결과로는 일찍이 Merrick과 Highley[11]의 보고도 있었다. 이들은 대형 유동층연소로(0.914×0.914×4 m-high)에서 층온도 800°C, 유속 0.61, 1.22, 2.44 m/s, 사이클론 포집입자의 재순환이 있는 경우에 측정된 결과로부터 상관식을 제시하였으며, 입도별 비산유출속도는 온도가 증가함에 따라 감소하였다. 한편 연소로에서 얻어진 결과에는 주입되는 고체로부터 비산되는

고체가 포함되어 있기 때문에 순수하게 층으로부터 비산속도만을 고려할 수 없었다.

Wen과 Chen[9]은 총표면에서 초기비산속도에 관한 상관식에서 기체의 밀도와 점도에 관한 영향을 고려하였다. 이들의 상관식에서는 온도가 증가함에 따라 초기비산속도는 감소하였다. Demmich와 Bohnet[8]은 총표면에서 기포에 의해서 올려지는 입자의 상승속도에 관한 그들의 상관식에서 기체밀도의 증가는 상승속도를 증가시키는 것으로 제시하였다. Zhang 등[10]도 기포에 의해서 올려지는 입자의 초기 상승속도분포에 관한 상관식에서 기체밀도를 고려하였으나 이의 영향은 무시될만큼 작아서 영향을 나타내는 인자로 생각하기에는 미흡하였다. 이들의 상관식들은 상온에서 얻어진 실험 자료를 근거로 하였기 때문에 엄격하게 판단되어 다른 온도 및 압력에서 이들의 유용성은 불확실하다.

Romanova 등[1]은 실험결과를 통하여 온도의 상승이 입자비산속도를 증가시키는 것으로 보고하였다. 그러나 그들이 제시한 결과에는 온도의 상승에 의한 기체속도의 증가영향이 함께 내포되어 있으며, 온도의 영향만을 분명하게 나타내지 않았다. George와 Grace[2]는 층온도 27-172°C 범위에서 층온도의 상승에 따른 입자비산속도의 변화는 거의 없는 것으로 보고하였다. 이는 온도 범위가 너무 좁기 때문으로 사료되었다. Chan과 Knowlton[3]은 혼합입자의 가압유동층에서 기체밀도의 증가는 비산유출량을 증가시키는 것으로 보고하였다. Knowlton[4]과 Knowlton 등[7]은 기체밀도 및 점도의 증

Table 1. Summary of previous studies

Authors	D_t [m]	H_t [m]	d_p [μ m]	ρ_p [kg/m ³]	T_b [°C]	P [kPa]	U [m/s]	Remark
Romanova et al.[1]	0.1	0.9	-2000 +25	1400	20-1000	A.C.	0.43-3.85	E_t increased with temperature
George & Grace[2]	0.25×0.43	3	102	2630	27-172	A.C.	0.2-1.3	temperature has a negligible effect on the E_t
Chan & Knowlton[3]	0.3	3.92	-370 +38	2595	A.C.	350-3100	0.2-0.5	E_t , K_t^* increased with pressure
Knowlton[4]	0.2	2.13	-250	1138	27-760	510-1970	0.08-0.2	E_t increased with gas viscosity
Son et al.[5]	0.3×0.3	4.6, 4.0	282	2180	780-940	A.C.	2.2-2.3	E_t decreased and $V_{p,max}$ increased with temperature
Choi et al.[6]	1.01×0.83							
Knowlton et al.[7]	0.2	2.13	-250	1587, 1138	22-871	510-1970	0.06-0.29	E_t increased with gas viscosity & density
Demmich & Bohnet[8]	-	-	-	-	-	A.C.	-	$V_{p,max}$ increased with gas density
Wen & Chen[9]	0.15×0.15	-	-260 +119	2850	-	A.C.	2.2-2.9	E_t at the bed surface decreased with temperature
Zhang et al.[10]	0.5×0.5	4.5	-100	-	892	A.C.	0.69	gas density has a negligible effect on the $V_{p,max}$

A.C.: ambient condition

Table 2. Size distribution of sand

Size 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.
Average size(mm)	0.363	0.256	0.181	0.128	0.091	0.033
Fraction	0.064	0.329	0.383	0.168	0.052	0.005

*Apparent density : 2509 kg/m³, Bulk density : 1298 kg/m³

*Specific surface mean diameter : 0.178 mm

가는 입자비산속도를 증가시키는 것으로 보고하였으며, 이는 기체밀도 및 점도가 증가함에 따라 입자의 종말 속도가 작아지기 때문인 것으로 해석하였다.

보고된 연구들을 종합적으로 재고하면 Chan과 Knowlton[3], Knowlton[4]과 Knowlton 등[7]의 보고만이 기체물성의 영향을 비교적 분명히 제시하고 있으나, 기체물성의 변화가 복합적으로 수반되는 온도의 영향을 나타내기에는 아직 미흡하다. 즉 온도의 증가는 기체 밀도를 감소시키며, 반면에 기체점도를 증가시킨다. 결과적으로 온도의 변화에 따라 입자비산속도가 최소값을 나타낼 수 있음이 정성적으로 예측되지만 정량적으로 해당 온도에 대해서는 아직 막연한 추측에 불과하다.

본 연구는 기체유동층에서 온도의 변화에 따른 입자 비산속도의 변화를 해석하고자 하였으며, 혼합입도의 모래를 충물질로 사용하고, 충온도와 유동화속도를 변화시키며 고체비산속도를 측정 및 고찰하였다.

2. 실험

실험장치는 압축기와 유량계로 구성된 공기주입설비, 유동층, 추가열장치, 두 개의 사이클론과 재순환설비, 백필터로 구성되었다.

유동화기체로는 공기가 사용되었으며, 75 Nm³/h(15 HP)의 용량을 갖는 압축기로 공급되고, 압력조절기와 수분제거용 prefilter를 기친 후, 적절한 유량계(flow cell type; 최대유량 60 Nm³/hr, 10 Nm³/hr, 1 Nm³/hr)로 정량되어 유동층에 공급되었다. 유동층은 직경 0.1 m 두께 6 mm 총 높이 2.1 m인 스테인레스관(SUS 316)으로 제작되었다. 추가열장치로는 내경 0.185 m, 높이 0.38 m, 두께 0.16 m, 용량 6 KW(max. 800°C) 규격을 갖는 원통형 매물히타를 사용하여 분배기로부터 0.38 m 높이까지 가열하였으며, 열손실을 최소화하기 위해서 유동층 외벽은 ceramic wool(두께 150 mm)로 단열한 후 함석판으로 마감하였다. 유동화기체는 plenum에 위치된 수평관(32 mm-ID)으로 주입되도록 하였다. 분배기는 직경 3 mm의 구멍이 사각피치(rectangular pitch)로 37개 뚫려있는 다공판(perforated plate)을 사용하였으며 입자의 통과를 방지하기 위해서 분배기위에 체

(ASTM 200 mesh)를 깔았다.

유동층의 축방향 압력분포를 측정하기 위하여, 분산판으로부터 일정간격(-0.05, 0.02, 0.2, 0.55, 0.85, 1.26, 1.97 m) 축방향으로 압력점을 두고 마이크로 마노미터와 물 마노미터를 설치하였다. 축방향 온도분포는 분배기로부터 높이 -0.05, 0.02, 0.1, 0.15, 0.39, 0.55, 0.85, 1.28, 1.97 m에 설치된 K-형(chromel-alumel) 열전대(thermocouple)와 data logger(Molytek Model 2702)에 의해서 연속적으로 측정되었다.

기체출구(0.05 m-ID)는 분산판으로부터 1.93 m 높이에 위치하며, 기체는 직렬로 연결된 1, 2차 사이클론(표준비율; 각 직경은 0.1 m, 0.075 m)과 백필터를 거쳐서 대기로 배출되도록 하였다. 1차 사이클론의 하부 배출관(0.05 m-ID)은 고체시료의 채취를 위한 diverter에 연결되고, 다음으로 로타리밸브를 거쳐서, 분산판으로부터 높이 0.42 m에 설치된 재순환관(0.05 m-ID)을 통하여 유동층과 연결되었다. 로타리밸브는 유동화 기체의 역흐름을 방지하기 위해서 설치되었으며, 약 15 rpm의 고정된 속도로 회전하였다. 백필터로는 상업용으로 사용되는 필터(Nomex filter) 1개를 배출구에 연결하여 사용하였다.

충물질로는 모래(apparent density : 2509 kg/m³, bulk density : 1298 kg/m³)를 사용하였다. 모래는 주로 체규격 0.075-0.425 mm의 범위에 든 것을 사용하였으며, 미소하지만 매 시험조건마다 마모에 의해서 입도분포가 변화하였다. 결과의 해석에서는 각 실험조건의 입도분포가 반영되었다. Table 2는 충물질 모래의 대표적인 입도분포를 나타낸다.

실험방법은 다음과 같다. 모래의 입도분포와 무게를 측정된 다음, 실험조건의 고정충높이(0.15 m)로 유동층에 채웠다. 재순환관의 diverter를 순환위치로 하고, 로타리밸브를 작동시켰다. 압력조절기의 압력을 약 1 Kg/cm²-G로 유지하고, 유량조절밸브와 유량계로 일정 유량의 공기(유동화 속도 약 0.15 m/s)를 공급하면서 추가열장치를 서서히 작동시켰다. 유동층과 1차 사이클론 포집입자의 재순환이 정상적으로 이루어져 유동층의 압력분포가 안정되고, 충 내 온도가 일정실험조건에 도달되었을 때를 유동층의 정상상태로 간주하였다. 정상

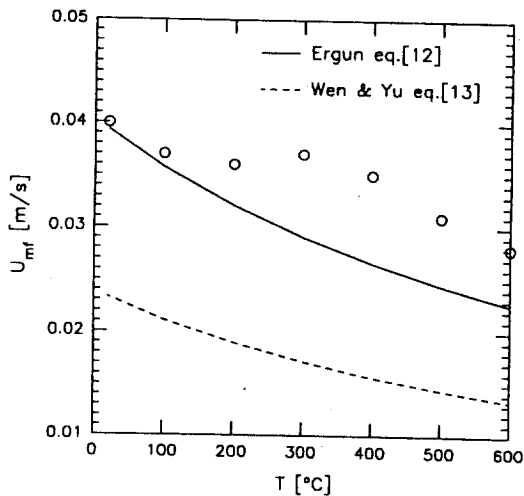


Fig. 1. Minimum fluidizing velocity versus bed temperature.

상태에서 마이크로 마노미터와 물 마노미터로 층 내 압력분포 변화추이를 관찰하였으며 data logger를 통해서 층내 온도분포를 연속적으로 관찰하였다. 프리보드 (freeboard) 기체출구에서 고체의 비산속도를 측정하기 위해서, 재순환관의 diverter를 일정 시간 동안(5-150 sec) 젓혀서 고체를 포집하였다. Diverter에서 고체의 포집시간은 층내 입자의 양과 입도분포의 변화를 고려하여 최소화하였다.

채취된 고체의 무게를 측정하여 단위시간당 프리보드 기체출구에서 총괄비산속도를 결정하였고, 체분석으로 입도분포를 측정하였다[12]. 채취된 고체를 층내로 재주입하고, 혼합된 층내 고체의 대표시료를 채취하여 입도분포를 측정함으로 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 입경 0.075 mm 이상에서 입도별 비산속도를 고려하였다.

실험변수로는 입도(평균입경: 0.363, 0.256, 0.181, 0.128, 0.091 mm)와 총괄공담유속(0.65-2.3 m/s), 유동 층온도(20-600°C)가 고려되었다. 특성값으로 축방향 압력분포 및 온도분포, 총괄 및 입도별 비산속도 등이 측정되었다. 입도별 비산유출속도는 다음식으로 정의 되어 계산되었다.

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

3. 결과 및 고찰

3-1. 최소유동화속도

Fig. 1은 층온도를 변화시키며 측정된 최소유동화속도의 변화를 나타낸다. 측정된 최소유동화속도는 0.028-0.04 m/s의 범위를 보였으며, 온도가 증가함에 따라 감소하였다. 측정된 구형도(sphericity, 0.85)와 최소유동화상태에서 유동층의 공극률을 적용한 Ergun 식[12]의 결과와 유사하였다.

3-2. 축방향 압력강하 및 온도분포

고정층 높이 0.15 m이고, 층온도와 유동화속도의 변화에 따라 측정된 유동층의 축방향으로 단위길이당 압력강하(압력구배)는 분배기로부터 높이가 증가함에 따라 지수적으로 급격히 감소하였다. 유속이 증가함에 따라 층영역에서 기울기는 감소하지만 유사한 경향을 보였다. 층온도의 영향은 두드러지지 않았다.

축방향 온도분포는 거의 균일하였으나 유속이 작고 층온도가 높을수록 프리보드에서 열손실의 영향으로 기체출구의 온도가 층온도보다 낮아지는 현상을 보였다. 층유속이 0.8 m/s이고 층온도가 600°C의 경우에 최대 온도차이를 보였으며 이 때 프리보드 기체출구의 온도는 410°C이었다.

3-3. Transport Disengaging Height(TDH)

입자비산속도의 고찰에 앞서서 본 실험범위를 규정하기 위해서 TDH를 재고하였다. TDH에 대한 상관식으로는 유동화속도가 입자의 종말속도보다 큰 고은 입자계(fine particle system)에서 사용되는 Zenz & Weil [14]의 도표와 유동화속도가 입자의 종말속도보다 작은 굵은 입자계(coarse particle system)에서 적용되는 Soroko 등[15]과 Yoon[16]의 상관식을 사용하였다.

본 실험의 유속범위(0.65-2.3 m/s)에서 Zenz와 Weil [14]의 상관식은 $TDH = 1.2-2.9$ m 이상, Yoon[16]의 상관식은 $TDH = 1.4-3.6$ m로 계산되었다. Soroko 등[15]의 상관식은 $H_b = 0.15$ m일 때 $TDH = 5.4-33$ m로 과도하게 큰 값을 보였다. 전자의 두 상관식의 예측값으로 고려할 때, 본 실험에서 사용된 유동층의 분배기로부터 기체출구까지 높이는 1.9 m이고, 유동층의 팽창을 고려하면, 유속이 작은 영역에서(약 1.1 m/s 이하) 프리보드 높이는 TDH보다 높거나 같으며, 유속 1.1 m/s 이상에서는 TDH보다 낮은 것으로 사료되었다.

3-4. 총괄 입자비산속도

Fig. 2는 주어진 층온도에서 유동화속도의 변화에 따

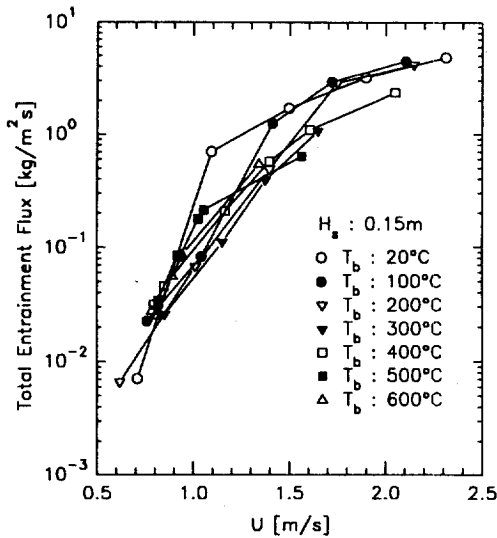


Fig. 2. Total entrainment rate versus fluidizing velocity at various bed temperatures.

라 측정된 총괄비산속도의 변화를 나타낸다. 본 실험 범위에서 총입자의 입도분포는 Table 2와 매우 유사하였으며, 비표면평균입경의 범위는 0.17-0.19 mm이었다. 총괄비산속도는 유속이 증가함에 따라 지속적으로 증가하였으며(유속의 2.5-5.8승에 비해), Geldart[17]의 고찰에서 유속의 4.8-11.8승에 비례한 것과 비교하여 작은 범위의 의존성을 보였다. 총괄비산속도에 대한 온도의 영향은 복잡한 경향을 나타내었다.

Fig. 3(a)는 측정된 총괄비산속도를 주어진 유동화속도에서 총온도에 따라 나타낸다. 총온도의 영향은 유속 0.8 m/s에서는 아주 완만한 증가 경향을 보였으며, 유속 0.92 m/s 이상에서는 온도가 증가함에 따라 감소하여 최소점을 보인 후 다시 증가하는 경향을 나타냈다. 또 유속이 증가함에 따라 낮은 온도에서 온도에 따라 감소하는 기울기가 더 완만해지면서 최소점의 위치가 더 높은 온도로 이동하는 경향을 보였다.

Fig. 3(b)에서는 George와 Grace[2] 그리고 Knowlton[4]과 Knowlton 등[7]의 실험결과를 함께 나타내고 있다. 전자의 경우 유속 0.26, 0.36, 0.53, 0.85 m/s, 총온도 27-172°C 일 때의 결과를 나타낸다. 평균입경(0.102 mm)이 본 실험조건보다 작기 때문에 같은 유속에서 비산속도는 더 크지만, 온도범위가 좁기 때문에 온도영향은 뚜렷이 나타나지 않았다. Knowlton[4]과 Knowlton 등[7]은 밀도가 다른 두 입자계(각각의 밀도 1.59, 1.14 g/cm³)에서 온도를 변화시키며 동시에 압력을 가해 온도변화에 따른 기체밀도의 변화는 고려되지 않았으며,

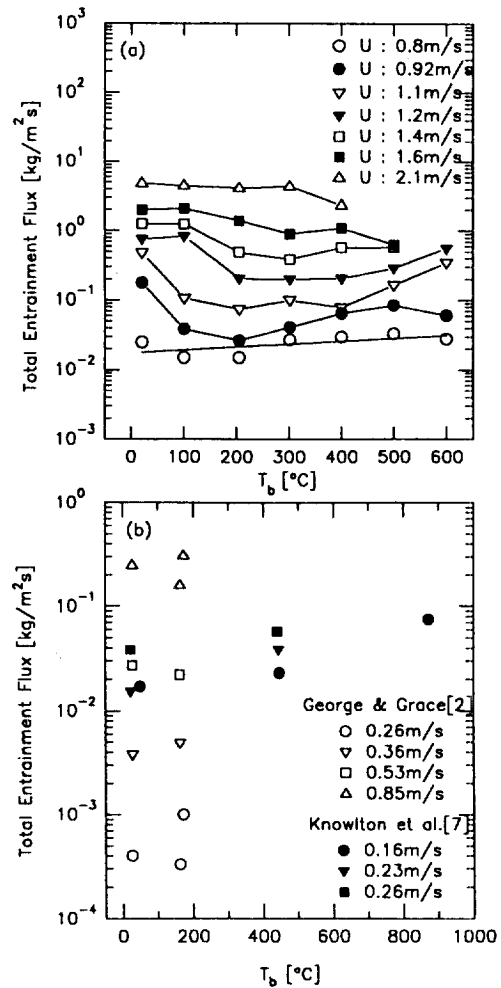


Fig. 3. Effect of bed temperature on total entrainment rate at various fluidizing velocity.

기체점도의 영향만을 고찰하였다. 이들의 유속범위는 0.06-0.29 m/s로 매우 작았으며, 프리보드의 높이를 달리하여 실험하였다. 공기의 점도는 온도에 따라 거의 선형으로 변화하며, 그림에서 나타내는 것과 같이 총괄비산속도는 점도가 증가함에 따라 지속적으로 증가하였다.

본 연구에서는 Fig. 3(a)에서 보여주는 총괄비산속도에 대한 온도의 영향이 총입자에 따라 다를 수 있다는 가정하에 동일한 유속에서 총입자의 평균입경을 달리한 경우를 실험해 보았다. Fig. 4는 총입자의 평균입경을 달리하고(비표면 평균입경: 0.11, 0.28 mm) 주어진 유속에서 총온도에 따라 측정된 총괄비산속도를 나타낸다. 그 결과 이 경우에도 Fig. 3(a)에서 보여주는 것과 유

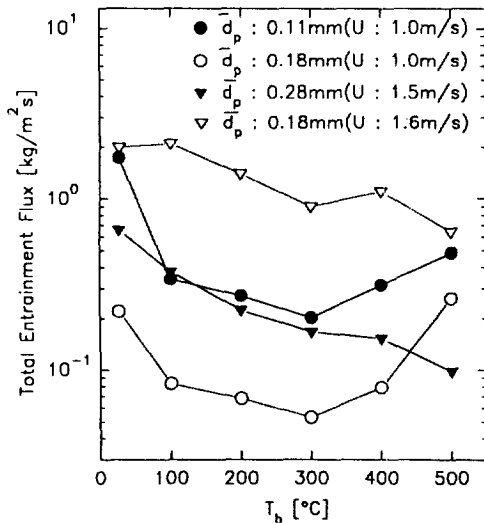


Fig. 4. Effect of bed temperature on total entrainment rate with different bed particle sizes.

사한 변화를 나타내었다. 즉 유속 1.0 m/s일 때 총괄비 산속도는 온도가 증가함에 따라 감소하여 최소값을 보인 후 다시 증가하며, 유속 1.5 m/s의 경우에는 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 한편 층의 평균 입경이 클수록 총괄비산속도는 감소하였다.

Fig. 3과 4에서 보여주는 결과는 Chan과 Knowlton [3], Knowlton[4]과 Knowlton 등[7]의 보고를 제외한 그밖의 다른 연구결과[1, 2, 5, 6, 9]와 부분적으로 혹은 전적으로 상반됨을 알 수 있다.

온도의 증가에 따른 입자비산속도의 변화는 입자에 가해지는 항력(drag force)의 변화와 밀접한 관련이 있다. Chan과 Knowlton[3], Knowlton[4]과 Knowlton 등[7]의 보고에 의하면 입자비산속도는 기체밀도가 증가할수록 증가하고, 기체점도가 증가할수록 증가하였다. 온도의 상승은 기체의 밀도를 감소시키지만 반면에 기체의 점도를 증가시킨다. 그러므로 온도의 증가에 따른 항력의 변화에는 기체밀도의 감소 영향과 기체점도의 증가 영향이 동시에 작용하게 되며, 두 영향이 교차하는 중에 임의의 점에서 입자비산속도의 최소점이 나타나고, 각 영향이 지배적인 영역에서 입자비산속도가 각각 증가하거나 감소하는 것으로 사료될 수 있다. 본 실험결과도 대부분 이와 같은 맥락에서 설명될 수 있었다.

유동층에서 입자비산속도의 변화경향은 유동화속도가 종말속도인 입경(d_{pt})의 변화로 정성적으로 나타낼 수 있다. Fig. 5는 온도 20°C부터 900°C 사이에서 유동화속도가 종말속도인 입경(d_{pt})의 온도에 따른 변화를 보여준다[12]. 여기서 입자의 구형도(sphericity)는 1로

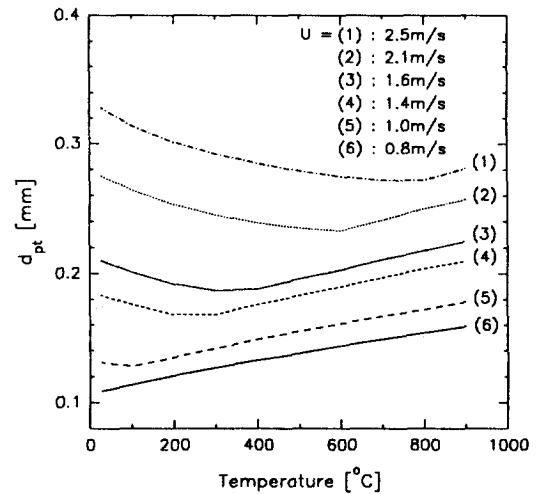


Fig. 5. Effect of temperature on particle diameter whose terminal velocity is equal to the gas velocity.

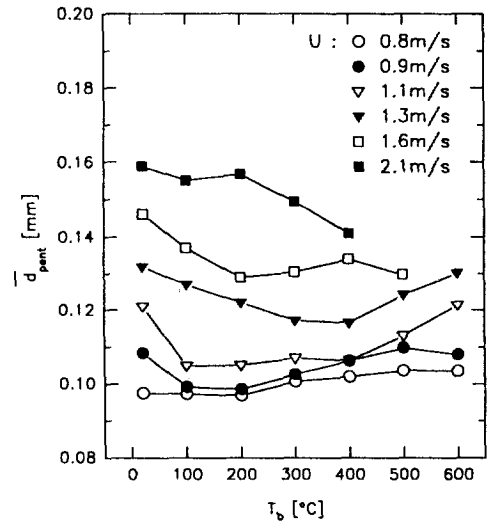


Fig. 6. Mean particle diameter of entrained particles with bed temperature.

간주되었다. 그림에서 보여주는 것과 같이 d_{pt} 는 유속이 작은 경우(0.8 m/s)에는 온도가 증가함에 따라 단조증가 경향을 보이지만 유속이 큰 경우(1.0 m/s 이상)에는 온도가 증가함에 따라 감소하여 최소점을 보인 후 다시 증가하는 경향을 보였으며, 최소값의 위치는 유속이 증가함에 따라 더 높은 온도로 이동하였다.

본 실험결과는 온도의 증가에 따른 d_{pt} 의 변화경향으로 설명될 수 있었다. 즉 d_{pt} 의 증가는 입자에 가해지는 항력의 증가를 의미하고 이어서 입자비산속도의 증가를

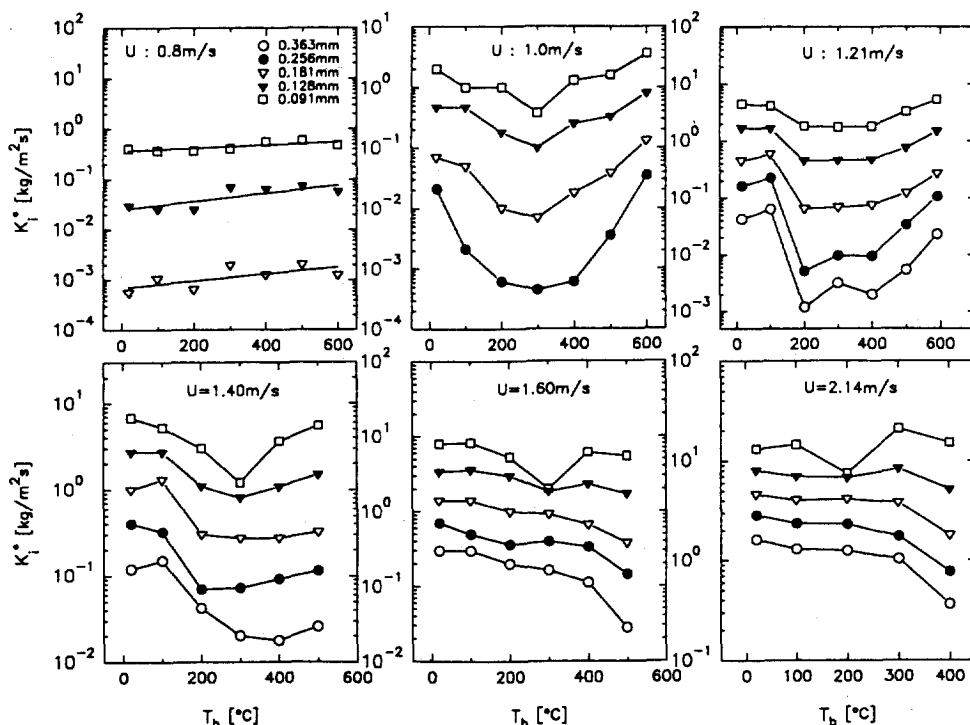


Fig. 7. Elutriation rate constant versus bed temperature.

뜻할 수 있다. d_p 의 온도에 따른 변화 경향은 George와 Grace[2]의 실험영역에서는 미소하게 증가하는 경향으로 그들의 실험결과와 같이 거의 일정한 것으로 간주될 수 있었다. Knowlton[4]과 Knowlton 등[7]의 실험영역에서는 온도가 증가함에 따라 d_p 가 증가하는 경향을 나타내어 입자비산속도의 변화경향과 일치하였다. Romanova 등[1], Son 등[5], Choi 등[6]의 실험영역에서는 온도가 증가함에 따라 d_p 는 증가하였다.

3-5. 비산입자의 입도분포

비산입자의 평균입경은 유속이 증가함에 따라 증가하였으며, 유속 2.3 m/s 이상에서는 비산입자의 입도분포가 층입자의 입도분포와 유사해지는 즉 층내의 거의 모든 입자가 비산되는 조건에 도달됨을 보였다.

Fig. 6은 각 실험조건의 기체속도에서 층온도 변화에 따른 비산된 입자의 평균입경의 변화를 나타낸다. 평균입경의 계산에서는 입자의 마모에 의해서 생성된 미분의 영향을 배제하기 위해서 0.075 mm 이하의 분진은 제외시켰다. 유동화속도가 0.8 m/s일 때 비산입자의 평균입경은 온도가 증가함에 따라 완만한 증가를 보였으며, 0.9 m/s 이상에서는 층온도가 증가함에 따라 감소하여 최소값을 보인 후 다시 증가하는 경향을 보였다.

또한 유속 2.1 m/s의 경우에는 층온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이는 d_p 의 온도변화에 따른 경향과 매우 유사하였다.

3-6. 입도별 비산유출속도

층온도가 일정할 때, 유동화속도의 변화에 따른 입도별 비산유출속도는 유동화속도가 증가함에 따라, 입경이 감소함에 따라 지수적으로 증가하는 일반적인 경향을 보였다.

Fig. 7은 유동화속도가 일정한 가운데 층온도의 변화에 따른 입도별 비산유출속도를 나타낸다. 유속이 0.8 m/s일 때, 입도별 비산유출속도는 온도에 따라 완만하게 증가하는 경향을 보였다. 유속이 1.0, 1.2, 1.4 m/s에서 입도별 비산유출속도는 온도가 증가함에 따라 감소하여 최소값을 보인 후 증가하는 경향을 보였으며, 유속 1.6, 2.1 m/s에서는 온도에 따라 다소 감소하는 경향까지만 볼 수 있었다. 결과적으로 최소값을 보이는 온도는 유속이 증가함에 따라 다소 증가하는 것으로 추론되었다. 이는 앞의 총괄비산속도에서와 같은 논리로 d_p 의 온도에 따른 경향으로 설명될 수 있었다.

Fig. 8은 유동화속도가 각각 1.0, 1.5 m/s일 때, 층입자의 평균입경을 변화시킨 후(비표면 평균 직경: 0.11,

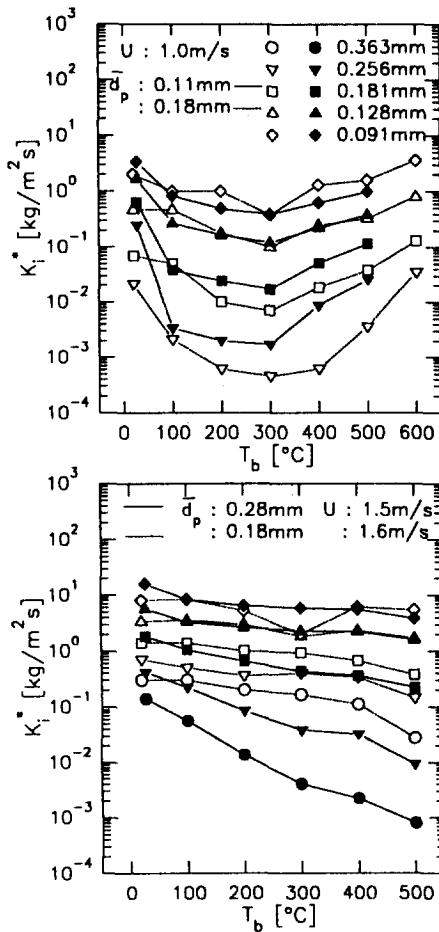


Fig. 8. Elutriation rate constant versus bed temperature for different bed particles.

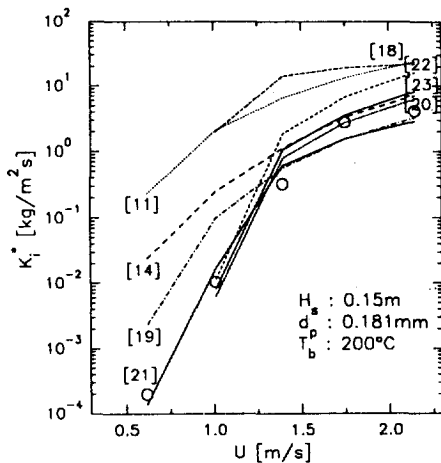


Fig. 9. Comparison between measured elutriation rate constants and values calculated by various correlations.

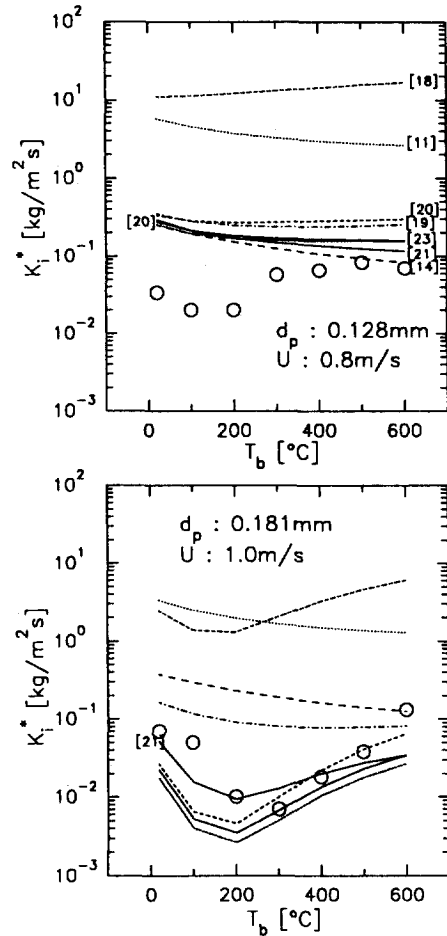


Fig. 10. Comparison between measured elutriation rate constants and values calculated by various correlations.

0.28 mm), 층온도의 변화에 따라 측정된 입도별 비산 유출속도를 나타낸다. 같은 유속에서 비산유출속도에 대한 온도의 영향은 앞서와 동일한 경향을 보였다. 결과적으로 입도별 비산유출속도의 온도에 따른 변화경향에 대한 층물질 입도분포의 영향은 무시될 수 있으며, 유속의 영향이 지배적임을 보였다. 그림에서 입자가 굵어질수록 측정값에 차이를 보였으며 이는 평균직경이 작을수록 가는 입자를 많이 포함하며, 가는 입자의 비산이 굵은 입자의 비산을 가속시키는 영향때문으로 사료되었다[17].

Fig. 7과 8에서 나타내는 것과 같이 온도에 따른 비산유출속도의 변화는 입경이 클수록 급격하였다. 이는 일반적으로 비산경향은 입경이 클수록 지수적으로 감소하기 때문으로 사료되었다.

3-7. 문헌의 상관식과 비교

Fig. 9는 층온도가 200°C이고 입경 0.181 mm에서 유속의 변화에 따라 측정된 비산속도와 문헌의 상관식들 [11, 14, 18-23]에 의해서 계산된 값과의 비교를 나타낸다. 그림에서 나타내는 것과 같이 일부 상관식(Tanaka 등[20], Wen과 Chen[21], Yagi와 Aochi[23])의 예측 값이 측정값과 유사한 일치를 보였다. 그러나 전반적인 실험영역에서 측정값과 만족한 일치를 보이는 상관식은 없었다.

Fig. 10은 유속과 입경이 일정한 조건에서 층온도의 변화에 따라 측정된 비산속도와 상관식과의 비교를 나타낸다. 유속 0.8 m/s, 입경 0.128 mm의 경우에 측정값은 온도가 증가함에 따라 감소 후 다시 완만한 증가를 보였으나 이와 유사한 경향의 상관식은 없었다. 유속 0.9-1.6 m/s에서 측정된 모든 입도의 비산유출속도는 200-400°C 근방에서 최소값을 보였다. 그러나 문헌의 상관식에 의한 예측은 Tanaka 등[20], Wen과 Chen[21], Wen과 Hashinger[22] 그리고 Yagi와 Aochi[23]의 상관식이 그림에서 나타내는 조건(유속 1.0 m/s, 입경 0.181 mm)에서만 유사한 경향을 보일뿐 다른 입경에서는 단조 감소를 나타내며 측정값과 일치하지 않았다. 이와 같은 부분적인 일치는 이들의 상관식 중에 입도별 종말속도가 변수로 고려되었고, 입도 0.181 mm의 경우에 한하여 종말속도가 온도에 따라 증가한 후 감소하는 경향을 나타내기 때문으로 사료되었다.

결과적으로 기존의 상관식들은 온도의 영향을 고려하지 않았기 때문에 온도변화에 따른 비산유출속도의 변화경향을 만족스럽게 나타낼 수 없었으며, 이를 보완한 해석이 필요한 것으로 사료되었다.

4. 결 론

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 입자비산속도에 대한 층온도의 영향은 유속에 따라 달랐다. 유속이 0.8 m/s 이하에서는 온도가 증가함에 따라 완만한 증가경향을 나타내었으며, 유속 1 m/s 이상에서는 온도가 증가함에 따라 감소하여 최소값을 보인 후 다시 증가하는 경향을 보였다. 최소값을 보이는 온도는 유속이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 이와 같은 변화는 입경이 클수록 급격하였다.

(2) 온도의 변화에 따른 입자비산속도의 변화경향은 유동화속도가 종말속도인 입경의 변화경향과 일치하였다.

(3) 문헌에 보고된 모든 상관식은 온도의 변화에 따른 입자비산속도의 변화경향을 표현할 수 없었으며, 새로운 해석의 제시가 필요하였다.

감 사

본 연구는 정부의 선도기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 저자는 깊은 감사를 표합니다.

사용기호

- d_p : particle diameter [mm]
- \bar{d}_p : mean particle diameter [mm]
- \bar{d}_{pent} : mean particle diameter of entrained particles [mm]
- d_{pt} : particle diameter having a terminal velocity that is equal to the superficial velocity [mm]
- D_b : bed diameter [m]
- E_t : total entrainment rate [$\text{kg/m}^2\text{s}$]
- H_s : static bed height [m]
- H_c : column height [m]
- K_i^* : elutriation rate constant of a particle of i size [$\text{kg/m}^2\text{s}$]
- P : pressure [kPa]
- T_b : bed temperature [$^{\circ}\text{C}$]
- U : superficial fluidizing gas velocity [m/s]
- U_{mf} : minimum fluidizing velocity [m/s]
- V_{pmax} : maximum rising velocity of an entrained particle at the bed surface [m/s]
- ρ_p : apparent particle density [kg/m^3]

참고문헌

1. Romanova, T. T., et al.: Deposited Doc., Viniti 5129-80(1980).
2. George, S. E. and Grace, J. R.: *Can. J. Chem. Eng.*, **59**, 279(1981).
3. Chan, I. H. and Knowlton, T. M.: "Fluidization", edited by Kunii, D. and Toei, R., Engineering Foundation, 283-290(1984).
4. Knowlton, T. M.: "Fluidization VII", edited by Potter, O. E. and Nicklin, D. J., 27(1992).
5. Son, J. E. and Choi, J. H. and Kim, S. D.: "Fluidization VI", edited by Grace, J. R., Shemilt, L. W. and Bergougnou, M. A., Engineering Foundation, 113 (1989).
6. Choi, J. H., Son, J. E. and Kim, S. D.: *J. Chem. Eng. Japan*, **22**, 597(1989).
7. Knowlton, T. M., Findlay, J. and Sishtla, C.: Final Report, DOE/MC/22061-2883, DE90 009699(1990).
8. Demmich, J. and Bohnet, M.: *Verfahrenstechnik*,

- 12, 430(1978).
9. Wen, C. Y. and Chen, L. H.: Proc. 6th Int. Conf. on FBC, III, 1115(1980).
10. Zhang, X., Cao, Y., Ren, Y., Chen, J. and Hong, Y.: Proc. 8th Int. Conf. on FBC, I, 75(1985).
11. Merrick, D. and Highley, J.: *AIChE Symp. Ser.*, **70**(137), 366(1974).
12. Kunii, D. and Levenspiel, O.: "Fluidization Engineering", 2nd ed., Butterworth-Heinemann, 95 (1991).
13. Wen, C. Y. and Yu, Y. H.: *AIChE J.*, **12**, 610(1966).
14. Zenz, F. A. and Weil, N. A.: *AIChE J.*, **4**, 472(1958).
15. Soroko, V. E., Mikhalev, M. F. and Mukhlenov, I. P.: *Int. Chem. Eng.*, **9**, 280(1969).
16. Yoon, Y. S.: "Entrainment of Coal in Fluidized Beds", Master Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology(1981).
17. Geldart, D.: "Fluidization", edited by Davidson, J. F., Clift, R. and Harrison, D., Academic Press, London, 383(1985).
18. Colakyan, M. and Levenspiel, O.: *Powder Technology*, **38**, 223(1984).
19. Geldart, D., Cullinan, J., Georghiades, S., Gilvray, D. and Pope, D. J.: *Trans. IChemE*, **57**, 269(1979).
20. Tanaka, I. and Shinohara, H., Hirose, H. and Tanaka, Y.: *J. Chem. Eng. Japan*, **5**, 51(1972).
21. Wen, C. Y. and Chen, L. H.: *AIChE J.*, **28**, 117 (1982).
22. Wen, C. Y. and Hashinger, R. F.: *AIChE J.*, **6**, 220 (1960).
23. Yagi, S. and Aochi, T.: Paper Presented at Soc. Chem. Engrs.(Japan) Spring Meeting(1955).