

기체유동층에서 입자비산속도에 대한 온도와 입자밀도의 영향

류호정 · 최정후*

전국대학교 화학공학과
(1996년 4월 3일 접수, 1996년 11월 6일 채택)

Effects of Temperature and Particle Density on Particle Entrainment Rate in a Gas Fluidized Bed

Ho-Jung Ryu and Jeong-Hoo Choi*

Department of Chemical Engineering, Kon-Kuk University, Seoul 143-701, Korea
(Received 3 April 1996; accepted 6 November 1996)

요 약

입자비산속도에 대한 정성적인 온도영향을 광범위하게 이해하기 위해서 기체유동층(직경 0.1 m, 높이 2.1 m)에서 유속(0.8-2.2 m/s), 온도(12-600 °C), 입자밀도(2509-6158 kg/m³), 입도(0.091-0.363 mm)에 따른 입자비산속도를 측정하였다. 입자비산속도는 온도가 증가함에 따라 감소하여 최소값을 보인 후 다시 증가하는 경향을 나타내었으며, 유속 또는 입자밀도가 증가함에 따라 온도의 영향은 둔화되었다. 본 실험범위에서 입자비산속도의 변화경향은 유동화속도가 종말속도인 입경의 변화와 매우 유사함을 확인할 수 있었다.

Abstract—To understand qualitative effect of temperature on particle entrainment rate, experiments were carried out in a gas fluidized bed(0.1 m i.d. and 2.1 m height). Gas velocities(0.8-2.2 m/s), bed temperatures(12-600 °C), particle densities(2509-6158 kg/m³) and particle sizes(0.091-0.363 mm) were considered as the experimental variables. The particle entrainment rate increased after an initial decrease with increasing bed temperature. The effect of temperature on particle entrainment rate decreased as the gas velocity or the particle density increased. Within the experimental range, it could be confirmed that the change of the particle entrainment rate was very similar to the change of the particle size of which terminal velocity was equal to the gas velocity.

Key words: Gas Fluidized Bed, Particle Entrainment Rate, Temperature Effect

1. 서 론

기체-고체 유동층에서 고체비산특성은 유동층의 성능과 수력학적 성을 결정하는 중요한 공정 인자이다. 고체비산속도에 관한 기존의 연구는 주로 상온에서 수행되었으며, 기체 유속, 입자 크기, 입자 밀도, 유동층규격 등의 영향이 실험적으로 보고되었다. 그러나 다른 반응온도에 적용될 수 있는 기체밀도, 점도의 영향에 대한 해석은 아직도 현상론적인 이해와 아울러 연구결과의 축적단계에 있다.

Table 1은 압력과 온도변화에 따른 기체물성의 변화가 입자비산속도에 미치는 영향에 관하여 문헌에 보고된 연구들을 요약하여 나타낸다.

Choi 등[1]과 Son 등[2]은 온도 780-940 °C에서 연속 운전되는 두 규모의 유동층연소로(0.3×0.3×4.6 m, 1.01×0.83×4.0 m)에서 온도가 증가함에 따라 총괄비산속도가 완전히 감소하며 이는 층온도 증가에 따라 기체의 밀도가 감소하기 때문인 것으로 보고하였다. Merrick과 Highley[3]는 유동층연소로(0.91×0.91×3.96 m)에서 층온도 800 °C, 유속 0.61, 1.22, 2.44 m/s이고, 사이클론 포집입자의 재순환

이 있는 경우에 측정된 입도별 비산유출속도의 결과로부터 상관식을 제시하였으며, 그들의 상관식에서 입도별 비산유출속도는 온도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. Lee 등[4]은 850-950 °C에서 조업되는 유동층연소로(직경 0.11 m, 높이 2.10 m)에서 온도가 증가함에 따라 총괄비산속도가 감소하는 것으로 보고하였으며, Park 등[5]과 Lee 등[6]은 내부순환유동층에서 온도가 증가함에 따라 총괄비산속도가 감소하는 것으로 보고하였다. Lee 등[6]은 층온도 증가에 따른 총괄비산속도의 감소원인을 층온도 증가에 따라 층내에서 탄소전환율이 커지고, 프리보드에서 비산되는 입자의 재연소가 일어나며, 온도증가에 따라 기체의 밀도가 감소하기 때문인 것으로 보고하였다. 이상의 보고들은 연속운전되는 유동층연소로에서 얻어진 결과이므로 주입되는 고체로부터 비산되는 고체가 포함되어 있어서 순수하게 층으로부터의 비산속도만을 고려할 수 없었다.

Wen과 Chen[7]은 층표면에서 초기비산속도에 관한 상관식에서 기체의 밀도와 점도에 관한 영향을 고려하였다. 이들의 상관식에서는 온도가 증가함에 따라 초기비산속도가 감소하는 것으로 나타내진다. Demmich와 Bohnet[8]은 그들의 상관식에서 기체밀도의 증가

Table 1. Summary of previous studies on the effect of gas properties on the particle entrainment rate

Investigators	Classifications	D[m]	H _g [m]	Gases	Particles	d _p [mm]	ρ_p [kg/m ³]	T _g [°C]	P[kPa]	U[m/s]	Remarks
Choi et al.[1]	CFBC	0.3×0.3	4.6	Air	Coal+Sand	0.282	2180	780-940	A.C.	2.2-2.3	E _r decreases and V _{pmass} increases with increasing temperature
Son et al.[2]		1.01×0.83	4.0			0.784	2630				
Merrick & Hightley[3]	CFBC	0.91×0.91	3.96	Air	Coal	0.492	2170-2750	800	A.C.	0.61-2.44	K _r ' decreases with increasing temperature
					Coal+limestone						
Lee et al.[4]	FBC	0.11	2.10	Air	Coal	0.234	1400	850-950	A.C.	0.9-1.5	E _r decreases with increasing temperature
Park et al.[5]	ICFBC	0.4×0.2	0.6	Air	Coal+Sand	0.530	1400	750-950	A.C.	0.038-0.15	E _r decreases with increasing temperature
						0.300	2600				
Lee et al.[6]	ICFBC	0.3	0.6	Air	Coal+Sand	0.530	1400	800-900	A.C.	0.36-0.73	E _r decreases with increasing temperature
						0.311	2620				
Wen & Chen[7]	Model	-	-	-	-	-	-	-	-	-	E _r at the bed surface decreases with increasing temperature
Demmich & Bohnet[8]	Model	-	-	-	-	-	-	-	-	-	V _{pmass} increases with gas density
Zhang et al.[9]	FBC	0.5×0.5	4.5	Air	Coal	0.100	2180	892	A.C.	0.69	The effect of gas density on V _{pmass} is negligible
Romanova et al.	BFB	0.1	0.9	Air	Keramzit	2.000	1400	20-1000	A.C.	0.43-3.85	E _r increases with temperature
						+0.250					
Milne et al.[11]	ICFB	0.152	1.15	Air	Sand	0.956	2630	20-800	A.C.	0.17-0.62	Riser solid flux increases with temperature
George & Grace[12]	BFB	0.25×0.43	3.0	Air	Silica sand	0.102	2630	27-172	A.C.	0.2-1.3	The effect of temperature on E _r is negligible
May & Russel[13]	PFB	-	-	Air	FCC	0.085	1700	A.C.	101.3-1370	0.15-0.64	E _r increases with pressure
						+0.075					
Zenz & Weil[14]	Model	-	-	-	-	-	-	-	-	-	E _r increases with pressure
Chan & Knowlton[15]	PFB	0.3	3.92	Nitrogen	Sand	0.370	2595	A.C.	350-3100	0.2-0.5	E _r & K _r ' increase with pressure
						+0.038					
Knowlton[16]	PFB	0.2	2.13	Nitrogen	Lignite char+limestone	0.250	1138	27-760	510-1970	0.08-0.2	E _r increases with gas viscosity
Knowlton et al.[17]	PFB	0.2	2.13	Nitrogen	Coke breeze, Lignite char	0.250	1587, 1138	22-871	510-1970	0.06-0.29	E _r increases with gas viscosity & density
Choi et al.[18]	BFB	0.1	2.1	Air	Sand	0.178	2509	20-600	A.C.	0.65-2.3	E _r & K _r ' represent minimum values with increasing temperature

A.C.: Ambient condition, BFB: Batch type fluidized bed, CFBC: Circulating fluidized bed combustor, FBC: Fluidized bed combustor, ICFBC: Internally circulating fluidized bed combustor, PFB: Pressurized fluidized bed.

는 총표면에서 기포에 의해 올려지는 입자의 초기상승속도를 증가시키는 것으로 제시하였다. Zhang 등[9]은 기포에 의해서 올려지는 입자의 초기상승속도분포에 관한 상관식에서 기체밀도를 고려하였으나 이의 영향은 무시될만큼 작아서 영향을 나타내는 인자로 생각하기에는 미흡하였다. 한편 이들의 상관식들은 상온에서 얻어진 실험자료를 근거로 하였으므로 다른 온도 및 압력에서의 유용성은 불확실하다.

Romanova 등[10]은 층온도 20-1000 °C의 고온유동층(직경 0.1 m, 높이 0.9 m)에서 층온도가 증가함에 따라 입자비산속도가 증가하며 이는 온도의 증가에 따른 기체의 물리적 특성변화 때문인 것으로 보고하였다. 또한 Milne 등[11]은 층온도 20-800 °C의 내부순환유동층(상승관: 직경 0.0349 m, 높이 1.15 m)에서 층온도가 증가함에 따라 상승관내 고체플럭스(kg/m²·s)가 증가하는 것으로 보고하였다. 그러나 Romanova 등[10]과 Milne 등[11]이 제시한 결과에는 온도의 상승에 의한 유속의 증가영향이 함께 내포되어 있어서 일정유속에서 입자비산에 미치는 온도만의 영향이 분명하게 나타나지 않았다.

George와 Grace[12]는 총온도 27-172 °C 범위에서 총온도의 상승에 따라 입자비산속도의 변화가 거의 없는 것으로 보고하였는데, 이는 그들이 실험한 온도범위가 너무 좁기 때문으로 사료되었다.

May와 Russell[13]은 총압력 101.3-1370 kPa의 가압유동층에서 증
물질로 FCC입자를 사용하여 입자비산에 미치는 압력의 영향을 실험
하였으며 유속이 일정할 때 압력이 증가함에 따라 총괄비산속도
가 증가하는 것으로 보고하였고 Zenz와 Weil[14]은 그들이 제시한
실험적인 상관식이 고압에서도 적용가능함을 May와 Russell[13]의
실험결과와 비교하여 보고하였다.

Chan과 Knowlton[15]은 혼합입자의 가압유동층(350-3100 kPa)에서 압력의 증가에 따른 기체밀도의 증가는 비산유출량을 증가시키는 것으로 보고하였으며, 이는 압력의 증가에 따라 입자의 종말속도가 작아지기 때문인 것으로 해석하였다.

Knowlton[16]과 Knowlton 등[17]은 510-1970 kPa의 가압유동층에서 압력증가에 따른 기체밀도의 증가 및 온도증가에 따른 기체점도의 증가는 입자비산속도를 증가시키는 것으로 보고하였으며, 이는 기체밀도 및 점도가 증가함에 따라 입자의 종말속도가 작아지기 때문인 것으로 해석하였다.

Choi 등[18]은 온도도 20-600 °C의 범위에서 입자비산속도에 대한 온도도의 영향은 온도가 증가함에 따라 감소하여 최소값을 보인 후 다시 증가하는 경향을 보이는 것으로 보고하였다. 이들은 이러한 경향이 유속이 종말속도인 임경(d_m)의 변화경향과 일치함을 보고하였고 이를 이용하여 해석하였다.

보고된 연구들을 종합적으로 재고하면 Chan과 Knowlton[15], Knowlton[16]과 Knowlton 등[17], Choi 등[18]이 비교적 분명하게 입자비산에 미치는 기체물성의 영향을 제시하고 있으나, 입자비산속도의 변화경향을 비산가능한 최대입자크기의 변화경향으로 나타낸 Choi 등[18]의 해석이 입자비산에 미치는 온도의 영향을 보다 직접적으로 나타낸다. 한편 이들의 연구에서 사용된 고체의 밀도가 서로 유사하기 때문에, 입자비산에 미치는 온도영향에 관한 보다 광범위한 해석을 위해서는 고체의 물성, 즉 입자밀도의 변화에 따른 영향이 확인되는 것이 바람직하다.

따라서 본 연구에서는 입자비산속도에 대한 정성적인 온도영향을 보다 광범위하게 이해하기 위하여, 입자밀도를 변화시키며 입자비산에 미치는 온도의 영향을 실험적으로 고찰하였다.

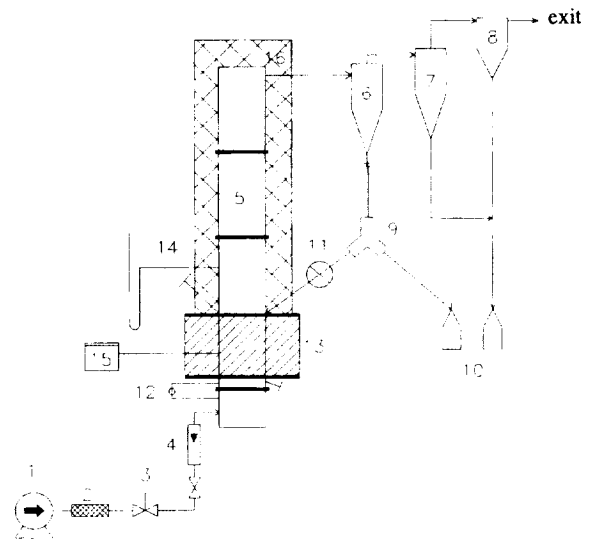


Fig. 1. Schematic diagram of the hot model fluidized bed.

1. Air compressor
2. Filter
3. Pressure regulator
4. Flowmeter
5. Fluidized bed
6. Cyclone 1
7. Cyclone 2
8. Bag filter
9. Diverter
10. Sample pot
11. Rotary valve
12. Micro-monometer
13. Heater
14. Water manometer
15. Data logger
16. Insulation

충물질의 구형도와 최소유동화상태에서 층의 공극률을 측정하기 위해서 상온유동층을 사용하였으며 입자비산속도를 측정하기 위하여 고온유동층을 사용하였다.

상운유동층은 직경 0.1 m 높이 2.4 m 두께 10 mm의 투명한 아크릴관으로 제작되었다. 분배기는 multi-tuyere형으로 직경 20 mm tuyere 4개에 각각 3 mm hole 12개를 배치하였다[19].

Fig. 1은 입자비산속도를 측정하기 위해 사용된 고온유동층을 나타내고 있다. 고온유동층은 직경 0.1 m, 총 높이 2.1 m인 스테인레스관(SUS 316)으로 제작되었다. 층가열장치로는 내경 0.185 m, 높이 0.38 m, 용량 6 KW(max. 800 °C) 규격을 갖는 원통형 매물하더를 사용하여 분배기로부터 0.38 m 높이까지 가열하였다. 분배기는 직경 3 mm의 구멍이 사각피치(rectangular pitch)로 37개 뚫려 있는 다공판(perforated plate)을 사용하였으며 입자의 통과를 방지하기 위해서 분배기위에 체(ASM 200 mesh)를 깔았다.

유동층의 축방향 압력분포를 측정하기 위하여, 분산관으로부터 축방향으로 7개(-0.05, 0.02, 0.2, 0.55, 0.85, 1.26, 1.97 m)의 압력 점을 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 9개의 K-형(chromel-alumel) 열전대(thermocouple)와 data logger(Molytek Model 2702)에 의해서 연속적으로 측정되었다.

기체채취구(내경 0.05 m)는 분산관으로부터 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 배출관은 고체시료의 채취를 위한 diverter에 연결되고, 다음으로 로터리밸브를 거쳐서, 분산관으로부터 높이 0.42 m에 설치된 재순환관을 통하여 유동층과 연결되었다. 로터리밸브는 약 15 rpm의 고정된 속도로 회전하였으며, 백필터로는 상업용으로 사용되는 필터(Nomex filter) 1개를 배출구에 연결하여 사용하였다.

2. 실험

2-1. 실험장치

Table 2. Sieve analysis of bed materials

Bed materials	Sand	Emery	Cast iron
Sieve size(μm)	wt%	wt%	wt%
425+300	6.4	1.0	1.2
300+212	32.9	4.2	10.8
212+150	38.3	42.8	27.6
150+106	16.8	44.8	32.0
106+75	5.2	6.9	19.0
75+0	0.5	0.4	9.4

Table 3. Properties of bed materials

Bed materials	Sand	Emery	Cast iron
Properties			
Apparent density[kg/m ³]	2509	3981	6158
Bulk density[kg/m ³]	1298	1697	1981
Mean particle diameter[mm]	0.178	0.145	0.110
Sphericity of a particle[-]	0.85	0.61	0.50
Void fraction in a bed at minimum fluidizing condition[-]	0.48	0.57	0.68
Geldart classification	B	B	B

2-2. 실험재료

충물질로는 모래, 굼강사(emery), 주철가루(cast iron)를 사용하였다. 각각의 입자는 주로 체구격 0.075-0.425 mm 범위의 것을 사용하였다. Table 2와 3은 충물질의 대표적인 입도분포와 물성을 나타낸다. 최소유동화상태에서 공극률은 상온유동층에서 최소유동화속도와 충물질을 측정하여 결정하였다. 고체의 구형도는 Ergun 식[20]을 최소유동화상태에 적용하여 계산하였으며, 고정층에 적용한 계산값과 비교하여 정확성을 검증하였다.

2-3. 실험방법

고체입자의 구형도와 최소유동화상태에서 유동층의 공극률을 결정하기 위해서 투명한 아크릴관으로 제작된 상온유동층을 사용하였다. 충물질의 입도분포와 무게를 측정한다. 실험조건의 고정충높이(0.15 m)로 유동층에 채웠다. 재순환관의 diverter를 순환위치로 하고, 로터리밸브를 작동시켰다. 압력조절기의 압력을 약 199 kPa로 유지하고, 유동화속도를 증가시키며 각 유속에서 팽창된 층의 높이와 층의 압력강하를 측정하였다.

입자비산속도는 고온유동층에서 측정하였다. 먼저 입도분포와 무게가 측정된 충물질을 실험조건의 고정충높이(0.15 m)로 유동층에 채웠다. 재순환관의 diverter를 순환위치로 하고, 로터리밸브를 작동시켰다. 압력조절기의 압력을 약 199 kPa로 유지하고, 유량조절밸브와 유량계로 일정 유량의 공기를 공급하면서 증가열장치를 서서히 작동시켰다. 유동층과 1차 사이클론 포집입자의 재순환이 정상적으로 이루어져 유동층의 압력분포가 안정되고, 층내 온도가 일정한 실험조건에 도달되었을 때를 유동층의 정상상태로 간주하였다. 정상상태에서 마이크로 마노미터와 물 마노미터로 유동층내 축방향 압력분포를 측정하였으며, data logger에 축방향 온도분포를 연속적으로 기록하였다. 프리보드 기체출구에서 고체의 비산속도를 측정하기 위해서 재순환관의 diverter를 일정시간 동안 켜서 고체를 포집하였다. Diverter에서 고체의 포집시간은 시행오차에 의해서 층내 입자의 양과 입도분포의 변화를 고려하여 최소화하였다.

채취된 고체의 무게를 측정하여 단위시간당 프리보드 기체출구에서 총괄비산속도를 결정하였고, 체분석으로 입도분포를 측정하여 입도별 비산유출속도를 결정하였다. 채취된 고체를 층내로 재주입

하고, 혼합된 층내 고체의 대표시료를 채취하여 입도분포를 측정하였다. 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 입자밀도(2509, 3981, 6158 kg/m³), 입도(평균입경: 0.363, 0.256, 0.181, 0.128, 0.091 mm), 기체유속(0.8-2.2 m/s), 유동층 온도(12-600 °C)가 고려되었다. 입도별 비산유출속도는 아래의 식(1)로 정의되어 계산되었다.

$$K_i = \frac{\text{entrainment flux of particles of size } i}{\text{weight fraction of bed particles of size } i} \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 최소유동화속도

Fig. 2는 층온도 변화에 따라 측정된 최소유동화속도와 Ergun[20] 및 Wen과 Yu[21]의 상관식에 의해 계산된 값을 비교하여 나타낸다. 측정된 최소유동화속도는 온도가 증가함에 따라 감소하였고, 입자 밀도가 증가함에 따라 증가하였으며, 구형도와 최소유동화상태에서 유동층의 공극률을 적용한 Ergun 식[20]의 결과와 유사한 반면 Wen과 Yu[21]의 상관식에 의해 계산된 최소유동화속도는 측정값보다 작게 예측되었다. 이는 본 실험에 사용된 입자의 K_1 , K_2 ($K_1=18.6$, 15.5, 11.1, $K_2=976.2$, 936.0, 610.6)가 Wen과 Yu[21]의 상관식에서 선정된 값들($K_1=24.5$, $K_2=1651.3$)보다 작기 때문으로 사료되었다.

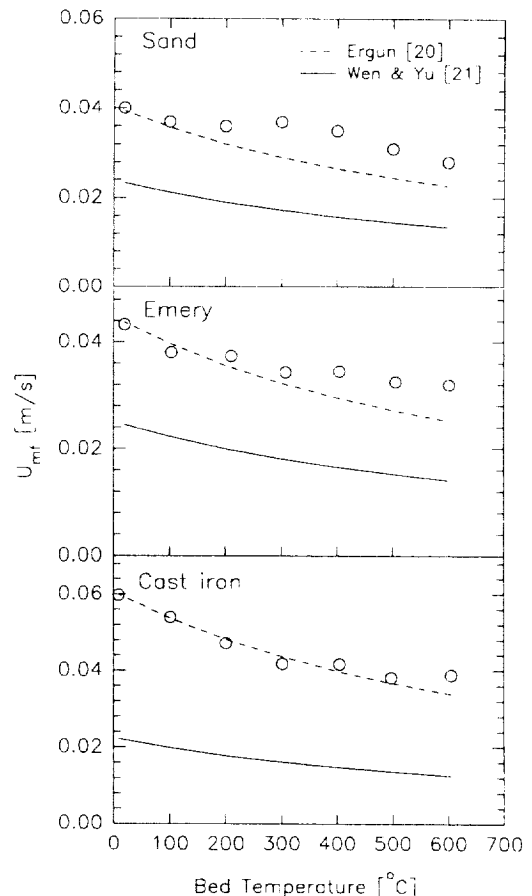


Fig. 2. Effect of bed temperature on minimum fluidization velocity for various particles.

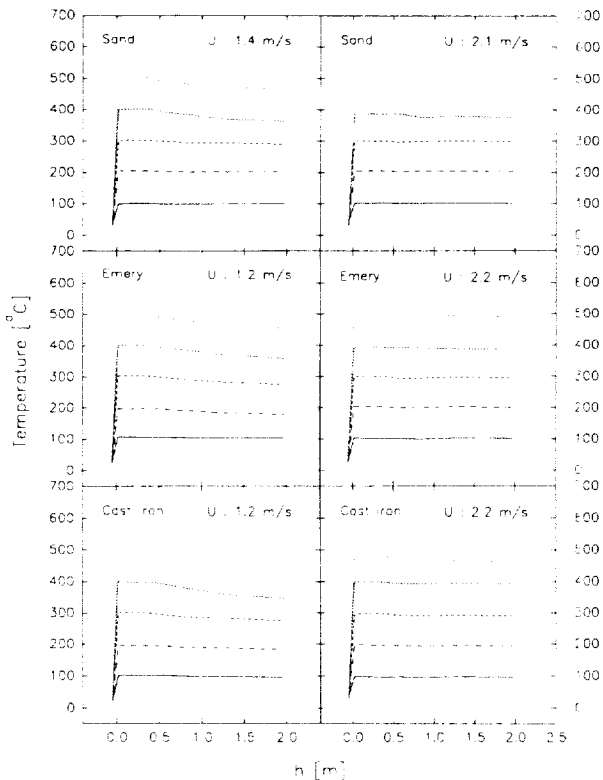


Fig. 3. Axial temperature profiles in the fluidized bed at various bed materials and fluidizing velocities.

3.2. 축방향 온도분포 및 압력분포

Fig. 3은 각 온도조건에서의 축방향 온도분포를 나타내고 있다. 축방향 온도분포는 거의 균일하였으나 유속이 작고 층온도가 높을수록 프리보드에서 열손실의 영향으로 기체출구의 온도가 층온도보다 낮아지는 현상을 보였다. 따라서 프리보드에서의 유속이 층유속의 5% 이내의 차이를 보이는 실험자료만을 고려하였다.

고정층 높이 0.15 m에서, 유동화속도와 층온도의 변화에 따라 측정된 유동층의 축방향 압력강하(압력구배)는 분배기로부터 높이가 증가함에 따라 지속적으로 급격히 감소하였다. 유속이 증가하면 층영역에서의 압력구배가 다소 감소하지만 유사한 경향을 보였으며 층온도의 영향은 두드러지게 나타나지 않았다.

3.3. Transport Disengaging Height(TDH)

입자비산속도의 고찰에 앞서 본 실험의 실험범위를 규정하기 위해서 본 실험의 유속범위(0.8-2.2 m/s)에서 Zenz와 Weil[14], Seroko 등[22], Yoon[23]의 상관식을 이용하여 TDH를 재고하였다. Seroko 등[22]의 상관식에 의해 계산된 TDH(모래: 6.01-28.8 m, 금강사: 5.18-24.8 m, 주철가루: 5.17-24.8 m)는 과도하게 큰 값을 보였는데, 이는 본 실험조건에서 입자의 Reynolds 수(모래: 3.3-9.0, 금강사: 2.7-7.3, 주철가루: 2.0-5.6)와 Archimedes 수(모래: 122.1, 금강사: 104.7, 주철가루: 71.0)가 그들이 제시한 상관식의 적용범위($15 < Re < 300$, $19.5 \times 10^3 < Ar < 650 \times 10^3$)에서 벗어나기 때문으로 사료되었다.

Zenz와 Weil[14]의 도표에 나타난 TDH(모든 입자에 대해 1.34-5.90 m)와 Yoon[23]의 상관식에 의해 계산된 TDH(모래: 1.62-3.46 m, 금강사: 1.51-3.23 m, 주철가루: 1.53-3.27 m). 본 실험에 사용된 고온유동층의 분배기로부터 기체출구까지 높이(1.9 m), 유동층의 팽창을 고려하면 유속이 작은 영역에서는(1.0 m/s 이하) 프리보드 높이가 TDH보다 높으며, 유속이 큰 영역(1.2 m/s 이상)에서는 TDH보다 낮은 것

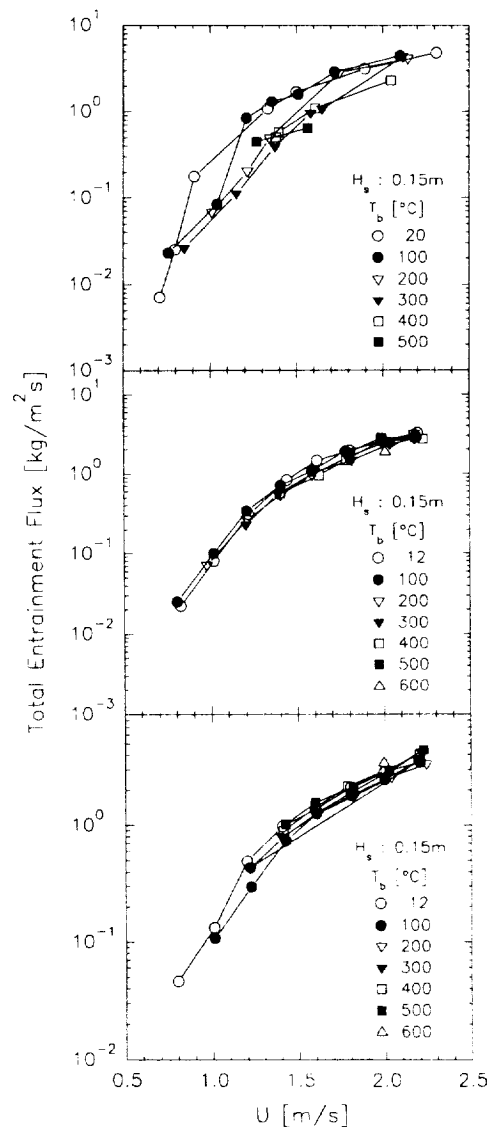


Fig. 4. Effect of fluidizing velocity on total entrainment rate at various bed temperatures.

으로 사료되었다. 한편 실험에 사용된 입자가 혼합입도이므로 입도에 따라 TDH가 다르게 정의될 수 있으며 이를 고려하면 더욱 복잡한 검토가 필요할 것이다. 계산된 TDH는 층온도에 거의 무관하였다.

3.4. 총괄비산속도

Fig. 4는 주어진 층온도에서 유속변화에 따른 총괄비산속도의 변화를 나타내고 있다. 총괄비산속도는 유속이 증가함에 따라 지속적으로 증가하였으며, 모래는 유속의 3.89승, 금강사는 3.35승, 주철가루는 3.32승에 비례하였다. 본 실험에서 나타난 유속에 대한 지수승은 Geldart[24]와 Geldart 등[25]이 보고한 유속의 4.8승, 11.8승을 고려할 때 작은 영역에 속하였다. 이는 본 실험의 유동화속도가 입자의 종말속도보다 큰 경우가 많으므로 총괄비산속도에 미치는 유속의 영향이 감소하기 때문으로 사료되었다[24].

Fig. 5는 주어진 유동화속도에서 층온도 변화에 따른 총괄비산속도의 변화를 나타낸다. 모래의 경우 유속 1.4 m/s에서는 온도증가에 따라 총괄비산속도가 감소하였다가 최소점을 보인 후 다시 증가하는 경향을 나타냈으며, 유속 1.6, 2.1 m/s에서는 온도가 증가함에 따

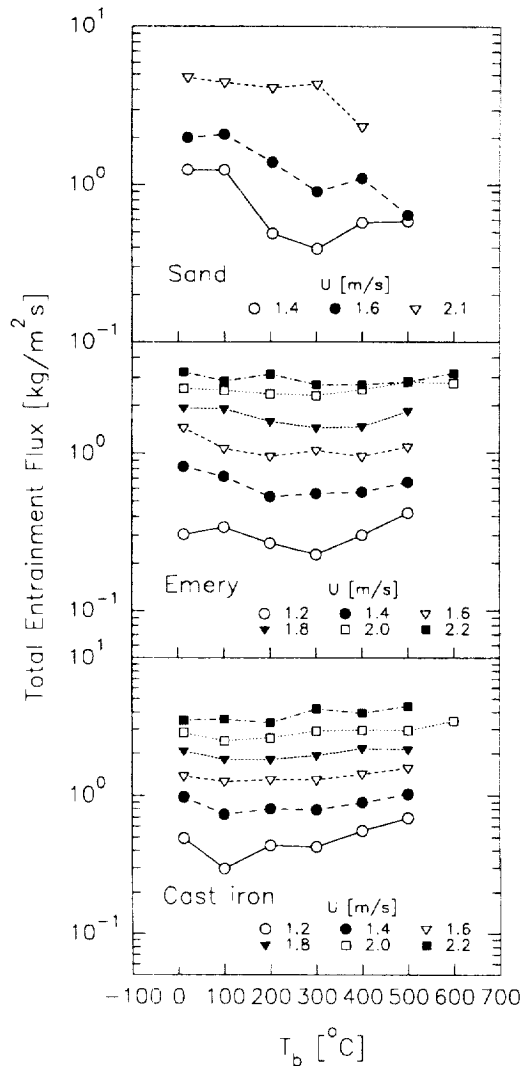


Fig. 5. Effect of bed temperature on total entrainment rate at various fluidizing velocities.

라 총괄비산속도가 다소 감소하는 것으로 나타났다. 금강사와 주철가루의 경우 낮은 유속에서는 모래와 마찬가지로 층온도가 증가함에 따라 감소하여 최소점을 보인 후 다시 증가하는 경향을 나타냈으며 유속과 입자밀도가 증가함에 따라 총괄비산속도에 미치는 층온도의 영향이 둔화되는 경향을 보였다.

Choi 등[18]의 보고를 이용하면 입자비산속도의 온도에 따른 변화 경향은 유동화속도가 종말속도인 입경의 변화경향으로 나타낼 수 있다. 이는 d_m 의 증가가 곧 기체의 고체수송능력의 증가를 의미하기 때문이다. Fig. 6은 1.2-2.2 m/s의 유속범위에서 밀도가 다른 세 가지 입자에 대해 온도변화에 따라 계산된 d_m 변화를 나타낸다. 여기서 입자의 구형도(sphericity)는 1로 간주되었다.

그림에 나타나는 것과 같이 d_m 는 전반적인 유속범위에서 온도가 증가함에 따라 감소하였다가 최소점을 보인 후 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 경향은 Fig. 5가 나타내는 온도의 변화에 따른 총괄비산속도의 변화경향과 매우 유사함을 알 수 있다.

Fig. 6에서 입자밀도가 증가함에 따라 온도변화에 따른 d_m 의 변화가 둔화되었는데 이 또한 Fig. 5가 나타내는 입자밀도 변화에 따른 총괄비산속도의 변화경향과 매우 유사함을 알 수 있다. 결과적으로 밀도가 다른 모든 입자에 대해서 온도변화에 따른 입자비산속도의 변화경향은 비산가능한 입경(d_m)의 변화경향으로 설명될 수 있었다.

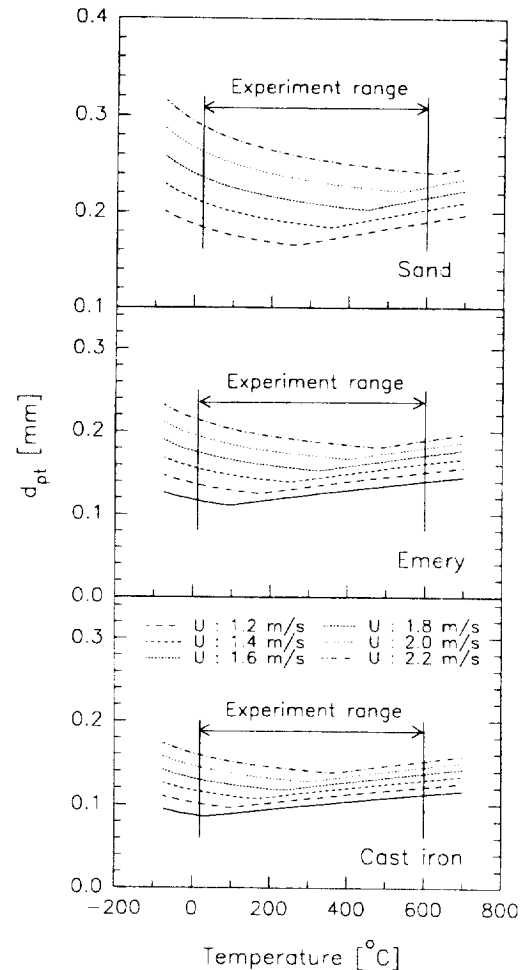


Fig. 6. Effect of temperature and particle density on particle diameter whose terminal velocity is equal to the fluidizing velocity.

3-5. 비산입자의 입도분포

Fig. 7은 각 실험조건의 유속에서 층온도 변화에 따른 비산입자의 평균입경 변화를 나타낸다. 평균입경의 계산에서는 입자의 마모에 의해 생성된 미분의 영향을 배제하기 위해서 0.075 mm 이하의 입자는 제외시켰다. 비산입자의 평균입경은 유속이 증가함에 따라 증가하였다. 이는 유속이 증가함에 따라 고체에 작용하는 항력(drag force)이 증가하여 더 굵은 입자들이 비산되기 때문이다.

모든 입자에 대해 낮은 유속에서 비산입자의 평균입경은 층온도가 증가함에 따라 감소하여 최소값을 보인 후 다시 증가하는 경향을 보였다. 입자밀도가 작은 모래의 경우 유속 1.6 m/s에서부터 층온도 증가에 따라 비산입자의 평균입경이 감소하는 반면 입자밀도가 큰 금강사와 주철가루의 경우에 유속 2.2 m/s에서도 최소값을 나타냈다. 이러한 경향은 Fig. 6에서 나타내는 온도와 입자밀도 변화에 따른 d_m 의 변화경향과 매우 흡사하다.

3-6. 입도별 비산유출속도

층온도가 일정할 때 입도별 비산유출속도는 유동화속도가 증가함에 따라 지수적으로 증가하며, 입자의 평균입경이 감소함에 따라 증가하는 일반적인 경향을 보였다.

Fig. 8과 9는 각 유속에서 평균입경 0.091, 0.128, 0.181, 0.256 mm 입자에 대해 층온도와 입자밀도 변화에 따른 입도별 비산유출속도의 변화를 나타낸다. 총괄비산속도의 경우와 마찬가지로, 모든 입자에 대해 낮은 유속에서는 층온도가 증가함에 따라 입도별 비산유출

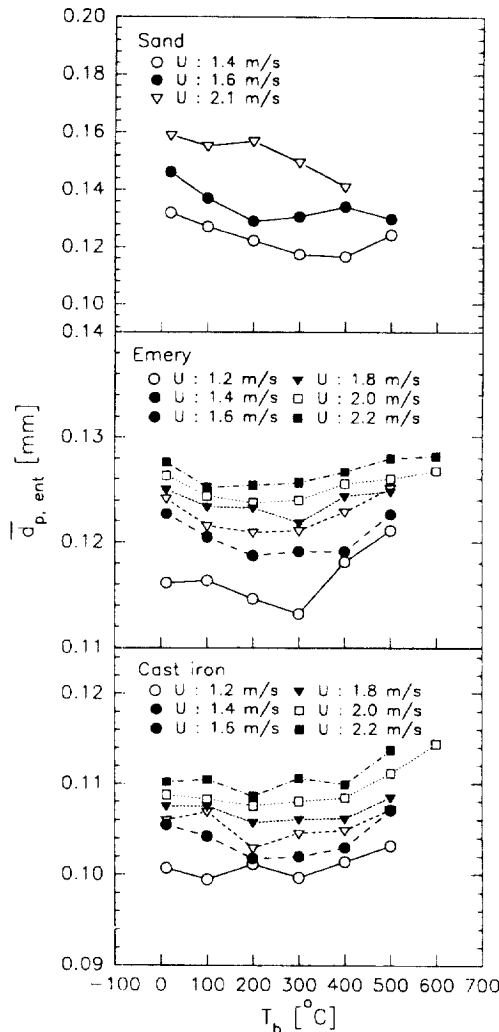


Fig. 7. Effect of temperature on mean particle diameter of entrained particles.

속도가 감소하여 최소점을 보인 후 다시 증가하는 경향을 나타냈다. 모래의 경우에는 유속 1.6 m/s에서부터 층온도 증가에 따라 입도별 비산유출속도가 감소하는 반면 입자밀도가 큰 금강사와 주철가루의 경우에는 높은 유속에서 온도변화에 따른 입도별 비산유출속도의 변화가 둔화되었다.

결과적으로 층온도와 입자밀도 변화에 따른 입도별 비산유출속도의 변화경향도 Fig. 6에서 나타내는 온도변화에 따른 d_w 의 변화경향과 유사하였다.

그림에서 입경이 작은 경우에(0.091, 0.128 mm) 밀도가 큰 주철가루의 입도별 비산유출속도가 밀도가 작은 다른 입자보다 커지는 경향이 나타나는데, 이와 유사한 경향이 Colakyan과 Levenspiel[26]의 보고에서도 나타나고 있다. 즉 입도가 작은 경우(0.1 mm 이하)에 같은 입도, 같은 유속에서 밀도가 큰 입자의 입도별 비산유출속도가 밀도가 작은 입자에 비해 크게 나타났다. 이들은 입경이 작은 경우에 단위시간당, 단위면적당 비산유출되는 입자수(elutriation rate constant of number flux of solids[number of particles/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}$])가 고체의 밀도나 유속에 관계없이 일정해지는 것으로 보고하였고, 따라서 밀도가 클수록 입도별 비산유출속도[mass flux($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)]가 증가하는 것으로 해석하였다[27]. 본 결과도 이와 유사하게 해석될 수 있는 것으로 사료되었다.

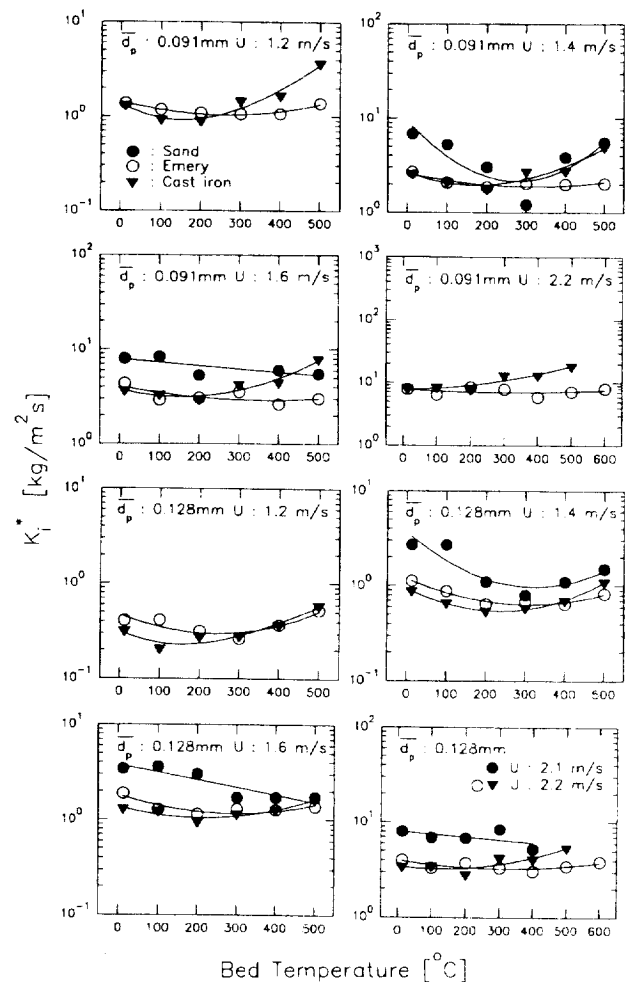


Fig. 8. Effects of bed temperature and particle density on elutriation rate constant($d_p=0.091, 0.128 \text{ mm}$).

4. 결 론

본 연구범위에서 나타난 입자비산속도에 대한 층온도의 영향은 유속과 입자밀도에 따라 다른 경향을 나타내었다. 작은 유속에서는 온도가 증가함에 따라 입자비산속도가 감소하여 최소값을 보인 후 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 유속과 입자밀도가 증가함에 따라 온도의 영향이 둔화되었다. 결과적으로 온도 및 입자밀도의 변화에 따른 입자비산속도의 변화경향은 유동화속도가 종말속도인 입경(d_w)의 변화와 매우 유사하였다.

사용기호

- Ar : Archimedes number, $\rho_p(\rho_p - \rho_f)gd_p^3/\mu^2$ [-]
- d_p : particle diameter [mm]
- \bar{d}_p : mean particle diameter [mm]
- $\bar{d}_{p,ent}$: mean particle diameter of entrained particles [mm]
- d_{pt} : particle diameter having a terminal velocity that is equal to the superficial velocity [mm]
- D_c : column diameter [m]
- E_r : total entrainment rate [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]
- H_s : static bed height [m]
- H_c : column height [m]

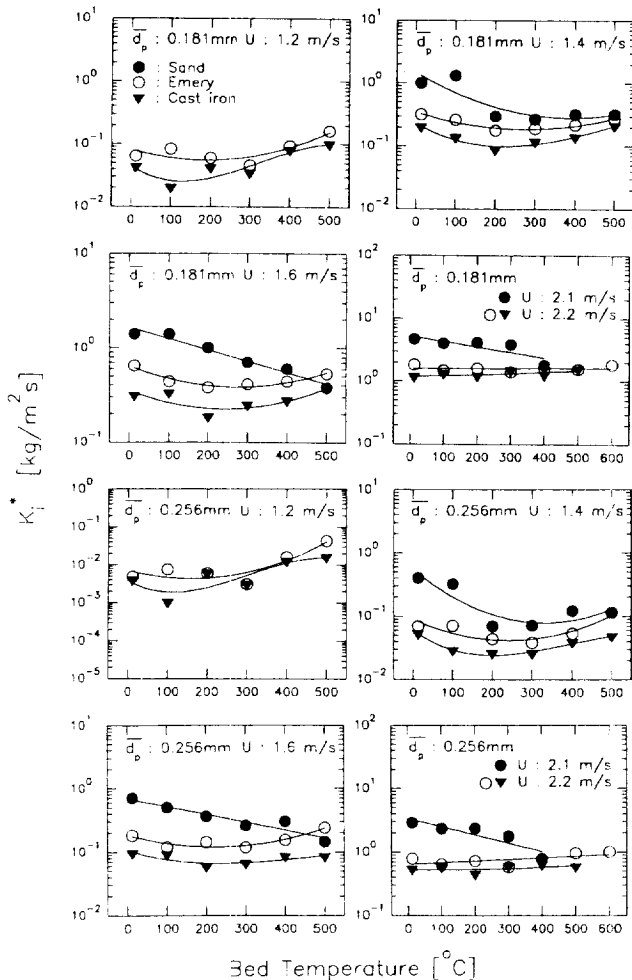


Fig. 9. Effects of bed temperature and particle density on elutriation rate constant ($d_p=0.181, 0.256$ mm).

- K_1 : values of constant in Ergun equation, $1.75/(\epsilon_m^3 \phi_i)$ [-]
 K_2 : values of constant in Ergun equation, $150(1 - \epsilon_m)/(\epsilon_m^3 \phi_i^2)$ [-]
 K_i^* : elutriation rate constant of a particle of i size [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]
 P : pressure [kPa]
 Re : Reynolds number, $d_p U_{\rho} / \mu$ [-]
 T_b : bed temperature [$^{\circ}\text{C}$]
 U : superficial gas velocity [m/s]
 U_{mf} : minimum fluidizing velocity [m/s]
 $V_{p,max}$: maximum rising velocity of an entrained particle at the bed surface [m/s]

그리스 문자

- ϵ_m : void fraction in a bed at minimum fluidizing condition [-]
 μ : gas viscosity [$\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$]
 ρ_g : gas density [kg/m^3]
 ρ_p : apparent particle density [kg/m^3]
 ϕ_i : sphericity of particle [-]

참고문헌

- Choi, J.H., Son, J.E. and Kim, S.D.: *J. Chem. Eng. Japan*, **22**, 597(1989).
- Son, J.E., 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).
- Merrick, D. and Highley, J.: *AIChE Symp. Ser.*, **70**, 366(1974).
- Lee, J.K., Hu, C.G., Shin, Y.S. and Chun, H.S.: *Can. J. Chem. Eng.*, **68**, 824(1990).
- Park, S.S., Choi, Y.T., Lee, G.S. and Kim, S.D.: "Circulating Fluidized Bed Technology III", edited by Basu, P., Horio, M. and Hasatani, M., Pergamon Press, Oxford, 497(1990).
- Lee, W.J., Cho, Y.J., Kim, J.R. and Kim, S.D.: Proc. 3rd Asian Conf. on Fluidized-Bed and Three-Phase Reactors, 126 (1992).
- Wen, C.Y. and Chen, L.H.: Proc. 6th Int. Conf. on FBC, **III**, 1115(1980).
- Demmich, J. and Bohnet, M.: *Verfahrenstechnik*, **12**, 430(1978).
- Zhang, X., Cao, Y., Ren, Y., Chen, J. and Hong, Y.: Proc. 8th Int. Conf. on FBC, **I**, 75(1985).
- Romanova, T.T. et al.: Deposited Doc., Viniti 5129-80(1980).
- Milne, B.J., Berruti, F., Behie, L.A. and Theo, J.W.: Proc. 4th Int. Conf. on CFB, 29(1993).
- George, S.E. and Grace, J.R.: *Can. J. Chem. Eng.*, **59**, 279(1981).
- May, W.G. and Russel, F.R.: paper presented at the North Jersey section of the A.C.S. (Jan. 25, 1954).
- Zenz, F.A. and Weil, N.A.: *AIChE J.*, **4**, 472(1958).
- Chan, I.H. and Knowlton, T.M.: "Fluidization IV," edited by Kunii, D. and Toei, R., Engineering Foundation, 283(1984).
- Knowlton, T.M.: "Fluidization VII", edited by Potter, O.E. and Nicklin, D.J., 27(1992).
- Knowlton, T.M., Findlay, J. and Sishtla, C.: Final Report, DOE/MC/22061-2883, DE90 009699(1990).
- Choi, J.H., Choi, K.B., Kim, P., Shun, D.W. and Kim, S.D.: *HWAHAK KONGHAK*, **33**, 580(1995).
- Choi, J.H., Kim, K.J. and Kim, P.: *HWAHAK KONGHAK*, **32**, 489(1994).
- Ergun, S.: *Chem. Eng. Prog.*, **48**, 89(1952).
- Wen, C.Y. and Yu, Y.H.: *AIChE J.*, **12**, 610(1966).
- 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(1981).
- Geldart, D.: "Fluidization", edited by Davidson, J.F., Clift, R. and Harrison, D., Academic Press, London, 383(1985).
- Geldart, D., Cullinan, J., Georgiades, S., Gilvray, D. and Pope, D.J.: *Trans. IChemE*, **57**, 269(1979).
- Colakyan, M. and Levenspiel, O.: *Powder Technology*, **38**, 223 (1984).
- Colakyan, M. and Levenspiel, O.: *Powder Technology*, **43**, 73 (1985).