

기체유동층에서 입자비산속도에 관한 상관식

최정후[†] · 장인용 · 선도원* · 이창근* · 손재익* · 김상돈**

건국대학교 화학공학과

*한국에너지기술연구소

**한국과학기술원 화학공학과

(1997년 10월 29일 접수, 1997년 12월 6일 채택)

A Correlation of Particle Entrainment Rate in Gas Fluidized Beds

Jeong-Hoo Choi[†], In-Yong Chang, Do-Won Shun*, Chang-Keun Yi*,
Jae-Ek Son* and Sang-Done Kim**

Department of Chemical Engineering, Kon-Kuk University, Seoul 143-701, Korea

*Korea Institute of Energy Research, Taejon 305-343, Korea

**Department of Chemical Engineering, KAIST, Taejon 305-701, Korea

(Received 29 October 1997; accepted 6 December 1997)

요 약

기존에 보고된 입자비산속도에 관한 측정값을 기반으로 하여 기포유동층과 순환유동층의 프리보드 기체출구에서 입자비산속도를 예측할 수 있는 일반화된 모델 상관식을 제시하였다. 기체유속, 유동층직경 및 높이, 고체 및 기체의 물성이 변수로 고려되었다. 제시된 상관식에 의한 예측값은 상온 및 고온의 기포유동층과 순환유동층에서 측정된 결과와 넓은 조업조건에서 만족스러운 일치를 보였다.

Abstract—Generalized model correlations which can be used to predict the particle entrainment rate at the freeboard gas exit of bubbling and circulating fluidized beds have been proposed on the basis of previously measured entrainment rates. Gas velocity, column diameter, column height, properties of solid and gas were considered as variables. Particle entrainment rates predicted from proposed correlations agreed satisfactorily with values measured in cold- and hot-model bubbling fluidized beds and with values measured in circulating fluidized beds over the wide range of operating condition.

Key words: Gas Fluidized Bed, Particle Entrainment Rate, Correlation

1. 서 론

유동층에서 입자비산은 주로 층표면에서의 격렬한 기포파괴에 기인하며, 프리보드(freeboard)에서 입자비산속도는 층표면으로부터 상승할수록 지수적으로 감소한다. 이 감소경향은 유체에 의한 고체의 수송속도가 평형에 도달하는 과정을 나타내며, 층표면으로부터 평형에 도달하는 최소높이를 TDH(transport disengaging height)로 나타낸다. 입자계는 유속이 입자의 종말속도보다 큰 고온 입자계와 유속이 입자의 종말속도보다 작은 굵은 입자계로 구분되며, 전자의 경우에는 입자비산속도가 감소하여 기체 중의 고체부하가 일정해지는 높이를 TDH(F)로 정의하고, 굵은 입자계에서는 층표면에서 수직으로 던져 올려진 입자의 속도가 감소되어 0이 되는 최고도달높이를 TDH(C)로 정의한다[1].

입자비산속도에 관한 상관식도 TDH 이상과 이하로 나뉘어 고려되었다[1]. TDH 이상에서 입자비산속도에 관하여는 여러 상관식이

보고되어 있다[1]. TDH 이하에서 입자비산속도의 해석에는 운동방정식에 의한 해석[2]과 감쇄상수(decay constant)에 의한 해석[3]이 시도되어 왔으며, 전자의 경우에는 층표면에서 기포파괴에 의한 입자비산속도와 입자상승속도 및 운동방향의 분포에 관한 상관식이 사용되고, 후자의 경우에는 층표면에서 입자비산속도와 감쇄상수에 관한 상관식이 사용되고 있다.

그러나 입자비산속도에 관한 기존의 상관식을 사용하기 위해서는 몇 가지 난점이 있으며, 이를 요약하면 다음과 같다:

- (1) 층표면의 위치, 즉 프리보드의 시작위치가 정확히 결정되어야 하고,
- (2) 층표면에서 입자비산속도, 입자상승속도, 입자의 운동방향, 프리보드에서 감쇄상수에 관한 상관식들이 정확히 결정되어야 하며,
- (3) TDH 이상에서 입자비산속도에 관한 상관식이 정확하여야 한다.

유동층에서 기체유속이 증가할수록 층표면에서 비산현상은 더 격렬해지며, 층표면의 결정은 매우 부정확해진다. 이 조건에서 층표면

[†]E-mail: choijhoo@kkucc.konkuk.ac.kr

에서 입자비산속도와 입자상승속도를 결정하는 것은 더욱 어렵다. 또 현재까지 보고된 감쇄상수에 관한 상관식도 제한적이며[4], TDH 이상에서 입자비산속도에 관한 상관식의 신뢰도도 만족스럽지 못하다[1]. 결과적으로 입자비산속도의 예측을 위해서는 여러 부정확한 계산단계를 거쳐야 하고 이로 인하여 예측의 정확도의 개선이 더 어려워졌다. 이제 상관식의 개선을 위해서는 정확한 실험과 아울러 해석의 단순화가 적극적으로 고려되어야 할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 넓은 범위의 유동화조건에서 기체유동층에 적용될 수 있는 단순화된 입자비산속도에 관한 상관식을 제시하고자 한다. 유동층의 기준높이를 기체분배기 높이로 함으로써 기준높이를 분명하게 하였다. 입자비산속도는 Hazlett과 Bergougnou[5]의 제안과 유사하게 고려하여 클러스터 플럭스(cluster flux)와 분산된 비클러스터 플럭스(disperse non-cluster flux)로 나누어 고려하였다. 클러스터 플럭스는 기준높이로부터 높이가 증가함에 따라 지수적으로 감소하며 분산된 비클러스터 플럭스는 평형에 도달하여 높이에 관계없이 거의 일정한 것으로 고려하여 입자비산구조를 단순화하였다. 기존에 보고된 입자비산속도에 관한 측정값을 기반으로 하여 기포유동층과 순환유동층의 넓은 범위에서 적용될 수 있는 입자비산속도에 관한 상관식을 제시하였다.

2. 모델 상관식

2-1. 모델 구조

기존의 상관식의 결점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 가정으로 입자비산구조를 단순화하고 새로운 구조의 모델을 고려하였다.

(1) 기준높이는 기체분배기 높이로 한다.

(2) 입자비산속도는 Hazlett과 Bergougnou[5]의 제안과 유사하게 고려하여 클러스터 플럭스와 분산된 비클러스터 플럭스로 나눌 수 있다고 가정한다. 클러스터 플럭스는 기준높이로부터 높이가 증가함에 따라 지수적으로 감소하며 분산된 비클러스터 플럭스는 평형에 도달하여 높이에 관계없이 거의 일정한 것으로 가정한다.

(3) 클러스터 플럭스의 감쇄상수는 스플래시(splash) 영역에서 고체체유량 분포의 감쇄상수와 동일한 것으로 가정한다.

Hazlett과 Bergougnou[5]는 비산입자는 클러스터 플럭스와 분산된 비클러스터 플럭스로 나눌 수 있음을 제안하였으며, 클러스터 플럭스는 층표면으로부터 높이에 따라 지수적으로 감소하며 분산된 비클러스터 플럭스는 평형에 도달하여 높이에 관계없이 거의 일정한 것으로 해석한 바 있다. 한편 본 연구에서는 동일한 비산구조에서 기준높이를 층표면 대신에 기체분배기 높이로 하였다. 기준높이를

층표면 대신에 기체분배기 높이로 함으로써 층표면의 위치에 대한 정의를 생략할 수 있고, 또 층표면에서 비산속도 및 비산입자의 특성에 대한 정보의 필요성을 생략하였다.

결과적으로 입자비산속도(K_t^*)는 클러스터 플럭스와 분산된 비클러스터 플럭스의 합으로 다음과 같이 나타내진다.

$$K_t^* = (\text{cluster flux}) + (\text{disperse non-cluster flux}) = K_{cl}^* + K_{dn}^* \quad (1)$$

클러스터 플럭스의 감쇄상수(a)를 고체체유량 분포의 감쇄상수와 동일하게 고려하는 것은 Kunii와 Levenspiel[6]의 모델과 유사하며, 감쇄상수에 관한 상관식으로는 비교적 넓은 실험범위에서 만들어진 다음의 Choi 등[4]의 상관식을 사용한다.

$$ad_p = \exp \left(-11.2 + 210 \frac{d_p}{D_t - d_p} \right) \left(\frac{d_p \rho_g (U - U_{mf})}{\mu} \right)^{-0.492} \left(\frac{\rho_p g d_p}{\rho_g (U - U_{mf})^2} \right)^{0.725} \left(\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0.731} C_d^{-1.47} \quad (2)$$

2-2. 상관식의 유도

입자비산에 관한 상관식을 얻기 위해서 Choi 등[2]과 Choi 등[7]의 상온유동층에서 측정된 결과와 Choi 등[8], Ryu와 Choi[9]의 고온유동층에서 측정된 결과를 자료로 사용하였으며, 장치규격의 영향을 반영하기 위하여 George와 Grace[10], Gugnoni와 Zenz[11]의 측정자료를 사용하였다. Table 1은 이들의 실험조건 및 장치규격을 요약하여 나타낸다.

분산된 비클러스터 플럭스에 관한 상관식을 얻기 위해서는 기존의 입자비산속도에 관한 실험자료에서 TDH 이상에서 측정된 입자비산속도를 구분하여 사용하여야 한다. 이는 각 실험조건에서 층높이를 결정하고, TDH를 결정하여 프리보드의 높이가 TDH보다 큰 경우에 측정된 입자비산속도만을 구분하여 사용하여야 한다. 본 고려에서는 임시로 2상이론(two-phase theory)에 의해서 팽창층높이를 구하고 식 (2)를 사용하여 프리보드에서 입자비산속도가 감소하여 0.001이 되는 높이를 TDH로 간주하고, Table 1의 측정자료들 중에서 TDH 이상에서 측정된 입자비산속도를 분산된 비클러스터 플럭스 자료로 추출하였다.

한편 큰 기체유속에서 분산된 비클러스터 플럭스 자료의 보완을 위해서 순환유동층에서 측정된 고체순환속도 중에서 층하부 농후상(dense bed)이 관찰되지 않고, 프리보드가 충분히 높은 경우의 고체순환속도 자료[12-28]를 추가로 사용하였으며, Table 2는 이들의 실험조건을 요약하여 나타낸다.

Fig. 1은 추출된 자료들을 항력(drag force, F_d)과 $K_{cl}^*/C_d \rho_g U$ 항을

Table 1. Summary of previous studies in bubbling fluidized beds considered in present model correlations for the elutriation rate constant

Authors	Particle	ρ_p [kg/m ³]	\bar{d}_p [mm]	D_t [m]	H_t [m]	U_{mf} [m/s]	U [m/s]	T_b [°C]
Choi et al.[2]	Sand	2630	0.255	0.38	9.1	0.11	0.38-2.01	30, 45
			0.342			0.086	0.95-2.44	
Choi et al.[7]	Sand	2598	0.247	0.1	2.4	0.09	0.81-2.8	A.C.
Choi et al.[8]	Sand	2509	0.178	0.1	2.1	0.028-0.04	0.65-2.3	20-600
			0.109	0.1	2.1	0.009-0.015	1.0	20-600
			0.276	0.1	2.1	0.054-0.093	1.5	20-600
			0.145	0.1	2.1	0.0319-0.0433	0.8-2.2	12-600
Ryu and Choi[9]	Emery	3918	0.110	0.1	2.1	0.0388-0.0597	0.8-2.2	12-600
	Cast iron	6158	0.110					
George and Grace[10]	Sand	2630	0.08	0.25×0.43	3.0	0.015	0.2-1.2	27, 162, 172
Gugnoni and Zenz[11]	Glass bead	2400	0.073	0.91	8.6	0.003	0.152-0.626	A.C.

Table 2. Summary of previous studies in circulating fluidized beds considered in present model correlations for elutriation rate constant

Authors	Experimental apparatus	Bed material	Particle density (kg/m ³)	Particle diameter (μm)	Gas velocity (m/s)	Solid circulation flux (kg/m ² · s)
Li and Kwauk[12]	0.09 m I.D., 8 m high	iron ore	4510	105	5.5	135
		alumina	3090	81	5.6	73
		FCC	1780	58	2.0	16
		pyrite cinder	3050	56	3.0	129
Arena et al.[13]	0.041 m I.D., 6.4 m high	glass beads	2600	88	5.0	390
					7.0	382
Yerushalmi and Avidan[14]	0.152 m I.D., 8.5 m high	FCC	1070	49	3.9	115
					5.1	120
Hartge et al.[15]	0.4 m I.D., 7.8 m high	quartz sand	2600	56	5.0	65
Kato et al.[16]	0.097 m I.D., 3 m high	FCC	1700	61	4.4	50
Bader et al.[17]	0.305 m I.D., 12.2 m high	US-260 Eq. catalyst	1714	76	9.1	147
Li et al.[18]	0.09 m I.D., 10 m high	FCC	925.5	54	1.52	14.3
					2.10	24.1
Herb et al.[19]	0.15 m I.D., 10 m high	FCC	970	68	3.8	16
Rhodes and Geldart[20]	0.152 m I.D., 6 m high	9G	1800	64	2.5, 3.5	34, 67
					4.5	86, 107
Kato et al.[21]	0.15 m I.D., 3 m high	FCC	1770	74	2.4	16
					4.4	17
Arena et al.[22]	0.4 m I.D., 10.5 m high	Ballotini	2543	90	4.9-5.1	114
Grewal et al.[23]	0.2 m I.D., 5.966 m high	silica sand	2540	330	5.4	21.8
			2667	181	3.5	16.0, 14.4, 13.7
			2690	162	3.9	19.6, 18.1, 17.2
		steel shot	7324	253	7.7	93.6
					7.8	71.6
Bai et al.[24]	0.140 m I.D., 10 m high	FCC	1545	54	5.23	120, 89, 62
					7.04	118, 103, 78
		silica gel-A	706	280	4.33	47
					6.14	45
	0.186 m I.D., 8 m high	silica gel-B	710	165	4.33	47
					6.14	45
		silica gel-A	706	280	4.7	40
Wong et al.[25]	0.05 m I.D., 3.0 m high	-	2500	174	4.0	123
					7.7	126, 75
Adanez et al.[26]	0.1 m I.D., 4 m high	sand	2600±30	60-300	4.0	74.8
				300-500	5.5	69.2
				500-630	5.5	32.0
				630-800	6.5	38.0
		coal	1400±25	300-500	4.9	59.0
Jiang et al.[27]	0.102 m I.D., 6.32 m high	FCC	1153	89	1.7	5.8
		Polyethylene	660	325	2.7	7.4
Namkung et al.[28]	0.1 m I.D., 5.3 m high	FCC	1720	65	3.0	30.0
					2.5	25.0

횡측과 종측으로하여 나타내고 있다. 그림에서 나타내는 것과 같이 $K_{i\infty}/C_d\rho_g U$ 는 항력에 지수적으로 비례하였으며, 이를 근거로 TDH 이상에서 입자비산속도 혹은 분산된 비클러스터 플럭스는 다음의 상관식으로 표현되었다.

$$\frac{K_{i\infty}}{C_d\rho_g U} = \exp\left(1.42 - \frac{11.7}{F_d}\right) \quad (3a)$$

$$F_d = C_d\rho_g U^2/2 \quad (3b)$$

식 (3)은 입자비산속도에 관한 최종상관식에서 분산된 비클러스터 플럭스항의 기본구조로 사용되었다.

TDH 이하에서 입자비산속도, 즉 클러스터 플럭스는 식 (1)로부터 $[K_i - (\text{disperse non-cluster flux})]$ 로 나타낼 수 있으며, 따라서 클러스터 플럭스의 자료는 측정된 입자비산속도와 식 (3)으로 계산된 분산된 비클러스터 플럭스의 차로 다음과 같이 추출하였다.

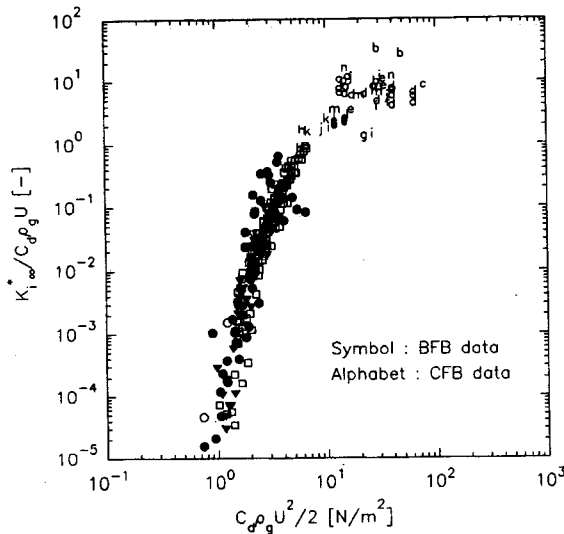


Fig. 1. $K_i^*/C_d \rho_g U$ vs. $C_d \rho_g U^2/2$. BFB(bubbling fluidized bed) data.

(○) Gugnioni-Zenz[11]; (●) Choi et al.[2]; (▽) Choi et al.[7]; (▼) Ryu and Choi[9], emery; (□) Ryu and Choi[9], cast iron CFB(circulating fluidized bed) data:

- | | |
|---------------------------|--------------------------|
| (a) Aanez et al.[26] | (b) Arena et al.[13, 22] |
| (c) Bader et al.[17] | (d) Bai et al.[24] |
| (e) Grewal et al.[23] | (f) Hartge et al.[15] |
| (g) Herb et al.[19] | (h) Jiang et al.[27] |
| (i) Kato et al.[16, 21] | (j) Li-Kwauk[12] |
| (k) Li et al.[18] | (l) Namkung et al.[28] |
| (m) Rhodes-Geldart[20] | (n) Wong et al.[25] |
| (o) Yerushalmi-Avidan[14] | |

(cluster flux)=(measured K_i^*)

– (disperse non-cluster flux calculated by Eq. (3)) (4)

식 (4)로 얻어진 클러스터 플럭스는 다음의 상관식으로 표현되었으며, 이는 입자비산속도에 관한 최종상관식에서 클러스터 플럭스 항의 기본구조로 사용되었다.

$$k_{io}^* = C_d^{-0.153} \rho_g (U - U_{mf}) \cdot \exp[1.51 + \alpha_1 - 4.00 \times 10^{-2} a h - 1.33/Fr - 1.80/(U - U_{mf})] \quad (5a)$$

$$\alpha_1 = 0.737 a H_s - 0.151 a H_s (U - U_{mf}) + 4.27 \times 10^{-2} a H_s (U - U_{mf})^2 \quad (5b)$$

$$Fr = \frac{C_d \rho_g (U - U_{mf})^2}{\rho_p d_p g} \quad (5c)$$

식 (4)와 (5)를 각각 얻는 과정에는 2차례의 회귀분석오차가 포함되며, 이를 보완하기 위해서 측정된 입자비산속도는 식 (4)와 (5)를 기본구조로 하여 다시 다음 식 (6)과 같이 비선형 회귀분석되었으며,

$$(\text{measured } K_i^*) = a_1 (k_{io}^*)^{n_1} + a_2 (k_{i\infty}^*)^{n_2} \quad (6)$$

입자비산속도에 관한 최종상관식은 다음의 식 (7)과 (8)로 결정되었다(회귀계수, $r^2=0.70$).

$$K_i^* = K_{i\infty}^* + K_{io}^* \quad (7)$$

분산된 비클러스터 플럭스($K_{i\infty}^*$):

$$K_{i\infty}^* = 0.800 \left[C_d \rho_g U \exp \left(1.42 - \frac{11.7}{F_d} \right) \right]^{0.899} \quad (8a)$$

$$F_d = C_d \rho_g U^2/2 \quad (8b)$$

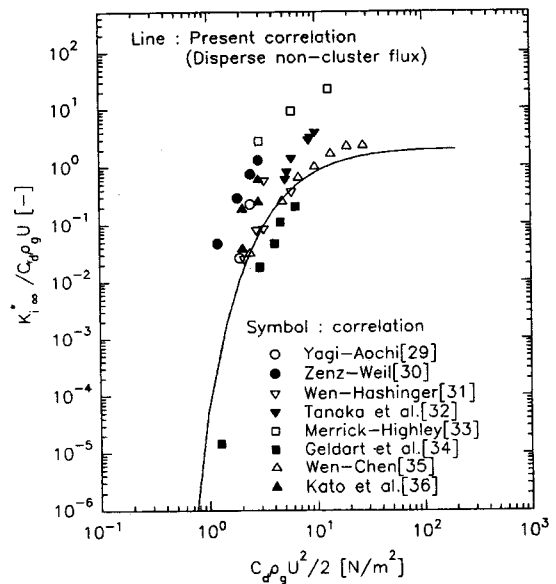


Fig. 2. Comparison between the previous correlations and the present correlation of elutriation rate constant above TDH.

클러스터 플럭스(K_{io}^*):

$$K_{io}^* = 0.589 [C_d^{-0.153} \rho_g (U - U_{mf}) \cdot \exp(1.51 + \alpha_1 - 4.00 \times 10^{-2} a h - 1.33/Fr - 1.80/(U - U_{mf}))]^{1.60} \quad (9a)$$

$$\alpha_1 = 0.737 a H_s - 0.151 a H_s (U - U_{mf}) + 4.27 \times 10^{-2} a H_s (U - U_{mf})^2 \quad (9b)$$

$$Fr = \frac{C_d \rho_g (U - U_{mf})^2}{\rho_p d_p g} \quad (9c)$$

항력계수(C_d):

$$C_d = 24/Re_p \quad \text{for } Re_p \leq 5.8 \quad (10a)$$

$$C_d = 10/Re_p^{1/2} \quad \text{for } 5.8 < Re_p \leq 540 \quad (10b)$$

$$C_d = 0.43 \quad \text{for } 540 < Re_p \quad (10c)$$

$$Re_p = d_p U \rho_g / \mu \quad (10d)$$

3. 측정값과의 비교

Fig. 2는 본 연구의 분산된 비클러스터 플럭스($K_{i\infty}^*$) 상관식 (8)을 기존의 TDH이상에서 입자비산속도에 관한 상관식과 비교하여 나타낸다. 그림에서 기호들은 각 상관식의 적용범위내에서 그들의 상관식으로 계산된 값을 나타낸다. 본 상관식은 Geldart 등[34], Wen과 Chen[35]의 상관식과는 비교적 유사한 일치를 보였다. 본 상관식은 다른 상관식들에 비해서 작은 값을 나타내는 것으로 나타났다.

Fig. 3과 4는 문헌에 보고된 총괄비산속도 및 입도별 비산유출속도의 측정결과와 본 상관식에 의한 계산값을 비교하여 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 총괄비산속도의 측정값과 예측값은 비교적 유사한 경향을 보였으며, 입도별 비산유출속도도 일부 자료에서는 다소 분산되는 경향을 보이나 대부분의 자료와는 비교적 잘 일치함을 보이고 있다.

Fig. 5는 유속변화에 따라 측정된 입자비산속도와 본 상관식에 의한 계산값을 비교하여 나타낸다. 유속이 증가함에 따라 입자비산속도는 지수적으로 증가하며 본 상관식도 이와 같은 경향을 만족스럽게 예측하는 것으로 나타났다. 특히 고온유동층에서 입자밀도가 다른 경우에 측정된 Ryu와 Choi[9]의 결과와도 비교적 잘 일치하였다.

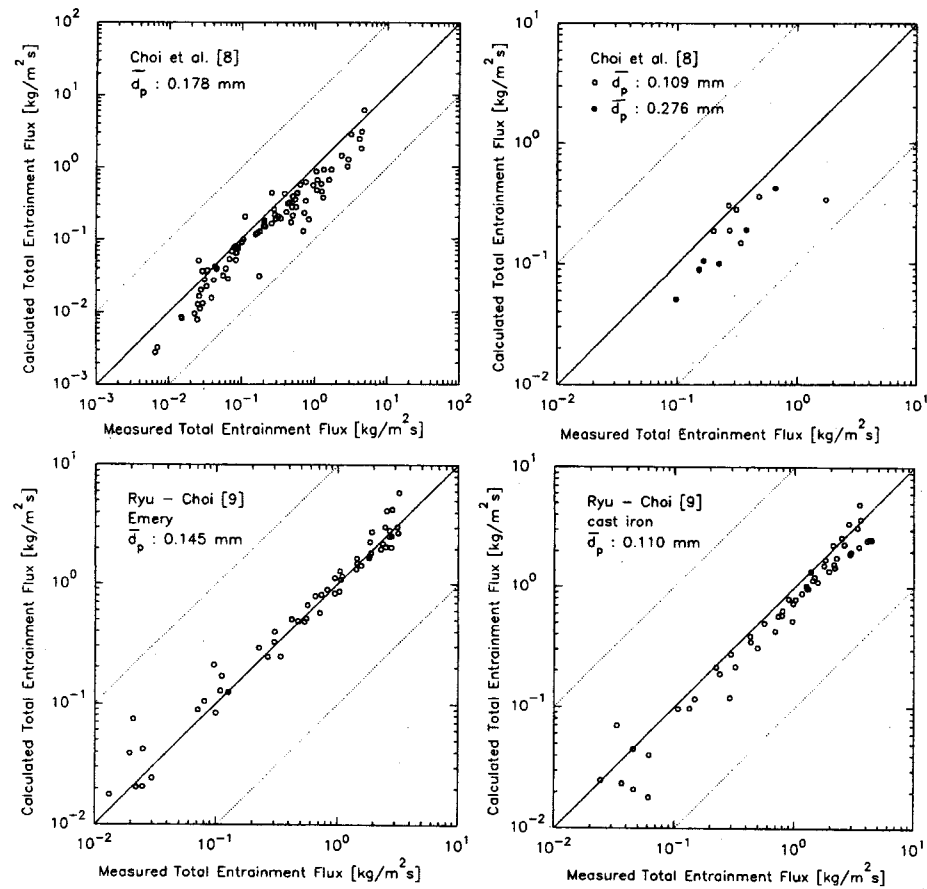


Fig. 3. Comparison of measured total entrainment fluxes with values calculated from present correlations.

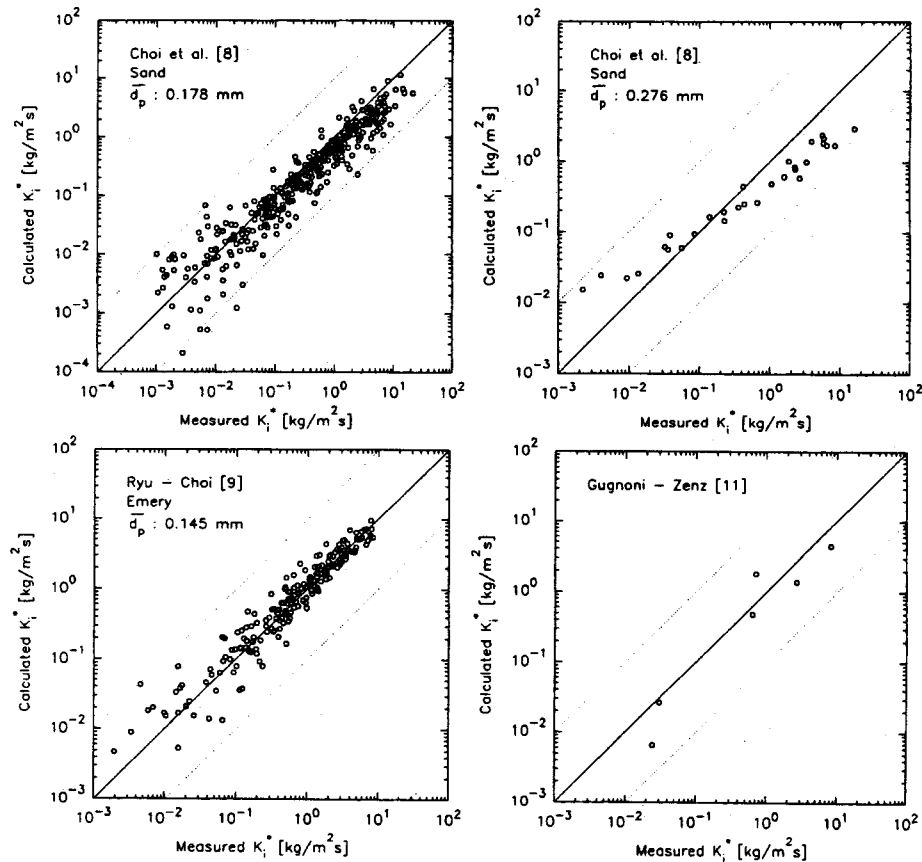


Fig. 4. Comparison of entrainment rate data with the values calculated by the present correlation.

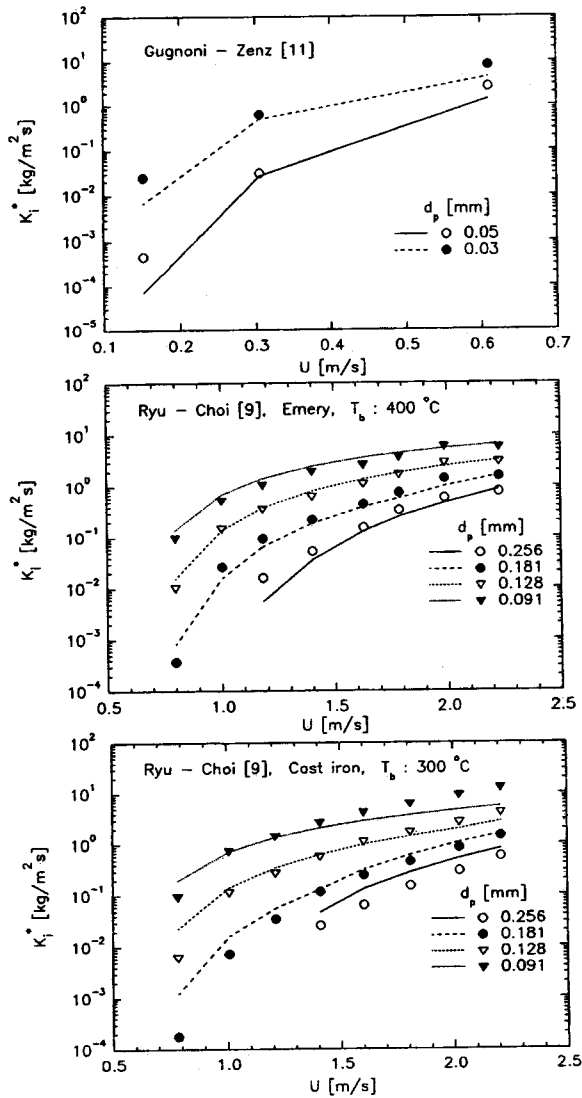


Fig. 5. Comparison of measured elutriation rate constants with values calculated from present correlations with a variation of gas velocity.

Fig. 6은 층온도 변화에 따라 측정된 입자비산속도와 본 상관식의 예측값과의 비교를 나타낸다. 온도변화에 따른 입자비산속도의 변화경향은 각 조건에서 유속이 종말속도인 입경의 변화경향과 같은 것으로 해석되어 온도가 증가함에 따라 입자비산속도는 감소하여 최소값을 보인 후 다시 증가하는 경향을 나타내는 것으로 보고된 바 있다[8, 9]. 그림에 나타나듯이 상관식에 의한 계산값도 측정값의 변화경향을 비교적 잘 예측하였다.

Fig. 7은 순환유동층에서 측정된 고체순환속도를 본 상관식으로 계산한 결과와 비교하여 나타낸다. 모든 조건에서 측정값과 예측값은 비교적 좋은 일치를 보였으며, 특히 2차공기가 주입되는 순환유동층에서 측정값과도 만족스러운 일치를 보였다.

결과적으로 본 상관식에 의해서 예측된 입자비산속도는 상온 및 고온의 기포유동층과 1차공기만 혹은 2차공기가 주입되는 순환유동층에서 측정된 결과와 넓은 실험조건에서 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 본 상관식의 적용범위는 입도 49-715 μm , 입자밀도 660-6,158 kg/m^3 , 기체유속 0.2-8.0 m/s , 2차공기분율 0-0.5, 고체순환속도 2.6×10^{-4} -390 $\text{kg/m}^2\text{s}$, 층온도 12-600 $^{\circ}\text{C}$, 원통형 유동층의 층직경 0.05-0.91 m, 유동층높이 2.1-12.2 m이다.

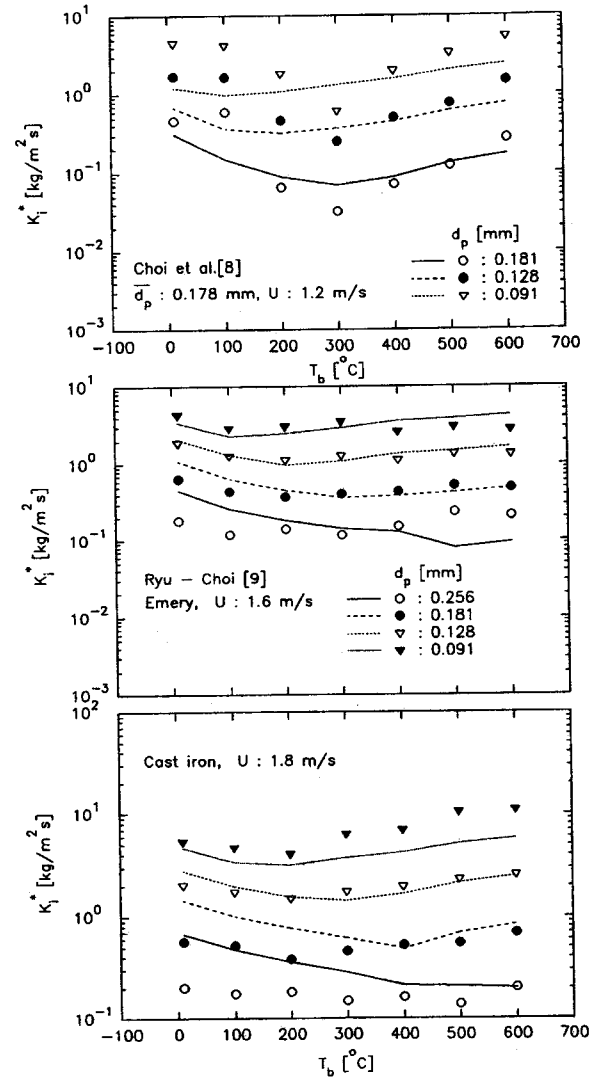


Fig. 6. Comparison of measured elutriation rate constants with values calculated from present correlations with a variation of temperature.

4. 결 론

기존에 보고된 입자비산속도에 관한 해석과 측정값을 기반으로 하여 광범위한 실험조건의 기포유동층과 순환유동층의 프리보드 기체 출구에서 입자비산속도의 예측에 적용될 수 있는 다음과 같은 일반화된 모델 상관식을 제시하였으며, 상관식에 의한 예측값은 측정값과 넓은 범위에서 만족스러운 일치를 보였다. 본 상관식의 적용범위는 입도 49-715 μm , 입자밀도 660-6,158 kg/m^3 , 기체유속 0.2-8.0 m/s , 2차공기분율 0-0.5, 고체순환속도 2.6×10^{-4} -390 $\text{kg/m}^2\text{s}$, 층온도 12-600 $^{\circ}\text{C}$, 원통형 유동층의 층직경 0.05-0.91 m, 유동층높이 2.1-12.2 m이다.

$$K_i^* = K_{i,\infty}^* + K_{i,0}^* \quad (7)$$

분산된 비클러스터 플럭스($K_{i,\infty}^*$):

$$K_{i,\infty}^* = 0.800 \left[C_d \rho_g U \exp \left(1.42 - \frac{11.7}{F_d} \right) \right]^{0.899}$$

$$F_d = C_d \rho_g U^2 / 2$$

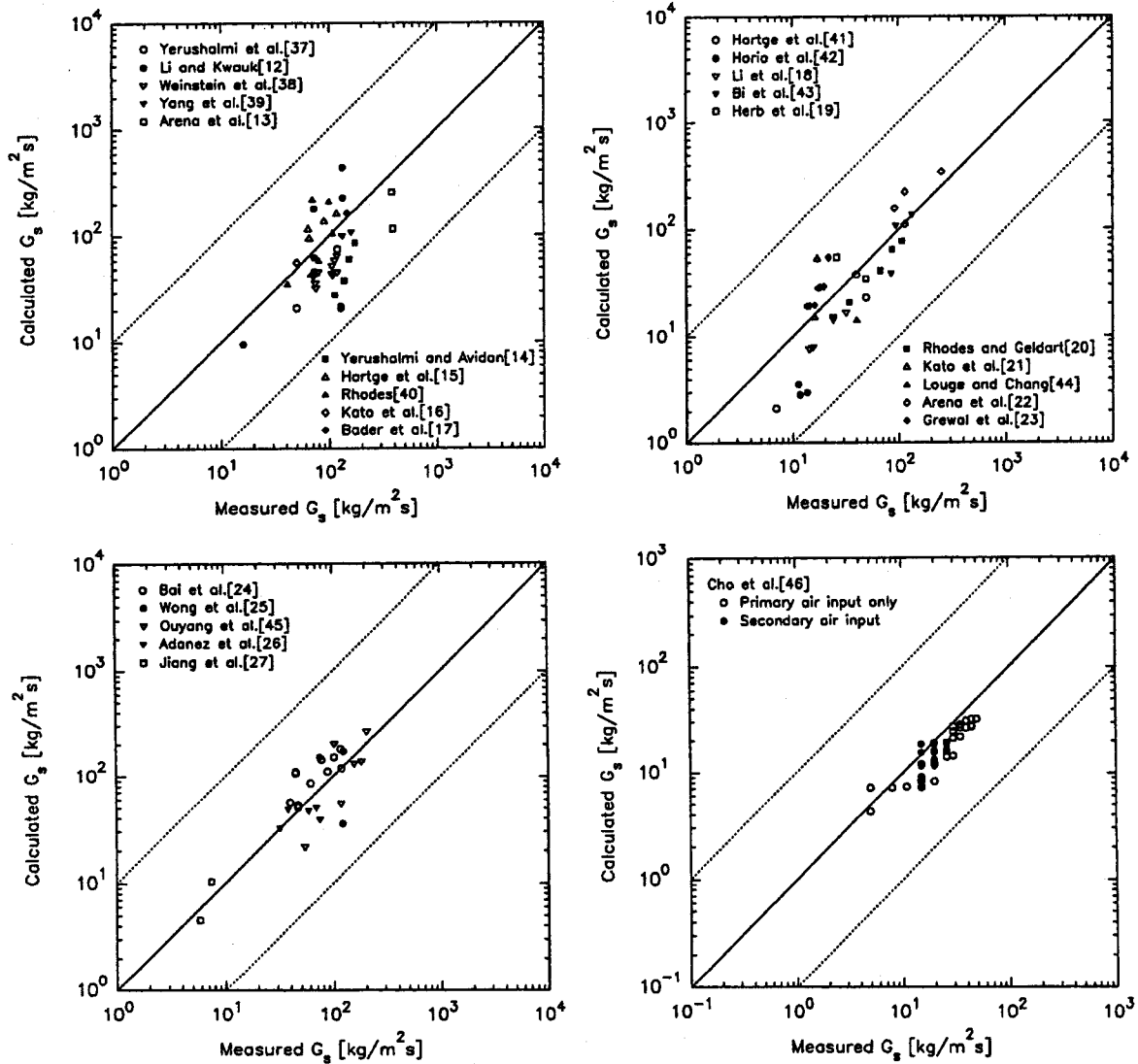


Fig. 7. Comparison between measured external solid circulation fluxes and values calculated from present correlations.

클러스터 플럭스(K_{io}^*):

$$K_{io}^* = 0.589 [C_d^{-0.153} \rho_g (U - U_{mf}) \cdot \exp(1.51 + \alpha_1 - 4.00 \times 10^{-2} ah - 1.33/Fr - 1.80/(U - U_{mf}))]^{1.60}$$

$$\alpha_1 = 0.737 a H_s - 0.151 a H_s (U - U_{mf}) + 4.27 \times 10^{-2} a H_s (U - U_{mf})^2$$

$$Fr = \frac{C_d \rho_g (U - U_{mf})^2}{\rho_p d_p g}$$

감 사

본 연구는 한국과학재단이 지원하는 핵심전문연구과제로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

사용기호

a : decay constant [1/m]
 a_1, a_2 : coefficients [-]
 C_d : drag coefficient on the particle based on the superficial gas

velocity [-]

d_p : particle diameter [m]
 \bar{d}_p : mean particle diameter [m]
 D_c : column diameter [m]
 F_d : drag force, $C_d \rho_g U^2/2$ [N/m²]
 Fr : Froude number, $C_d \rho_g (U - U_{mf})^2 / \rho_p d_p g$ [-]
 g : gravitational acceleration [m/s²]
 G_s : external solid circulation flux [kg/m²s]
 h : height above the distributor plate [m]
 H_s : static bed height [m]
 H_c : column height [m]
 K_i^* : particle elutriation rate constant at a height above the distributor [kg/m²s]
 K_{io}^*, k_{io}^* : particle elutriation rate constant below TDH or cluster flux [kg/m²s]
 K_{io}^*, k_{io}^* : particle elutriation rate constant above TDH or disperse non-cluster flux [kg/m²s]
 n_1, n_2 : exponents [-]
 Re_p : particle Reynolds number, $d_p U \rho_g / \mu$ [-]

- r^2 : regression coefficient [-]
 T_b : bed temperature [°C]
 U : superficial gas velocity [m/s]
 U_{mf} : minimum fluidizing velocity [m/s]

그리스 문자

- α_1 : parameter defined as Eq. (5b) [-]
 μ : gas viscosity [Pa s]
 ρ_g : gas density [kg/m³]
 ρ_p : apparent particle density [kg/m³]

참고문헌

- Geldart, D.: in Fluidization, 2nd ed., edited by Davidson, J. F., Clift, R. and Harrison, D., Academic Press, New York, 383(1985).
- Choi, J. H., Son, J. E. and Kim, S. D.: *J. Chem. Eng. Japan*, **22** (6), 597(1989).
- Wen, C. Y. and Chen, L. H.: *AIChE J.*, **28**, 117(1982).
- Choi, J. H., Ma, S. C., Shun, D. W., Son, J. E. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **35**, 300(1997).
- Hazlett, J. D. and Bergounou, M. A.: *Powder Technol.*, **70**, 99 (1992).
- Kunii, D. and Levenspiel, O.: "Fluidization Engineering", Chapters 7-8, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Boston, 165(1991).
- Choi, J. H., Kim, K. J. and Kim, P.: *HWAHAK KONGHAK*, **32**(3), 489(1994).
- Choi, J. H., Choi, K. B., Kim, P., Shun D. W. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **33**, 580(1995).
- Ryu, H. J. and Choi, J. H.: *HWAHAK KONGHAK*, **35**, 173(1997).
- George, S. E. and Grace, J. R.: *Can. J. Chem. Eng.*, **59**, 279(1981).
- Gugnoni, R. J. and Zenz, F. A.: in Fluidization, edited by Grace, J. R. and Matsen, J. N., Plenum Press, New York, 501(1980).
- Li, Y. and Kwauk, M.: in Fluidization, edited by Grace, J. R. and Matsen, J. M., Plenum Press, New York, 537(1980).
- Arena, U., Cammarota, A. and Pistone, L.: in Circulating Fluidized Bed Technology, edited by Basu, P., Pergamon Press, Oxford, U. K., 119(1985).
- Yerushalmi, J. and Avidan, A.: in Fluidization, 2nd ed., edited by Davidson, J. F., Clift, R. and Harrison, D., Academic Press, New York, 225(1985).
- Hartge, E. U., Li, Y. and Werther, J.: in Circulating Fluidized Bed Technology, edited by Basu, P., Pergamon Press, Toronto, Ont., 153(1986).
- Kato, K., Shibasaki, H., Tamura, K., Wang, C. and Takarada, T.: in Fluidization '87: Korea and Japan Proc. 1st Korea-Japan Symp. on Fluidization, PangHan Pub. Co., Seoul, 229(1987).
- Bader, R., Findley, J. and Knowlton, T. M.: in Circulating Fluidized Bed Technology II, edited by Basu, P. and Large, J. F., Pergamon Press, Oxford, U.K., 123(1988).
- Li, J., Tung, Y. and Kwauk, M.: in Circulating Fluidized Bed Technology II, edited by Basu, P. and Large, J. F., Pergamon Press, Oxford, U.K., 193(1988).
- Herb, B., Tuzla, K. and Chen, J. C.: in Fluidization VI, edited by Grace, J. R., Shemilt, L. W. and Bergounou, M. A., Engineering Foundation, New York, 65(1989).
- Rhodes, M. J. and Geldart, D.: *Chem. Eng. Res. Des.*, **67**, 20(1989).
- Kato, K., Takarada, T., Tamura, T. and Nishino, K.: in Circulating Fluidized Bed Technology III, edited by Basu, P., Horio, M. and Hasatani, M., Pergamon Press, Oxford, 145(1990).
- Arena, U., Malandrino, A., Marzocchella, A. and Massimilla, L.: in Circulating Fluidized Bed Technology III, edited by Basu, P., Horio, M. and Hasatani, M., Pergamon Press, Oxford, U.K., 137 (1991).
- Grewal, N. S., Maurer, R. D. and Fox, W.: in Proc. of Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, edited by Anthony, E. J. and Canmet, ASME, New York, 317(1991).
- Bai, D. R., Jin, Y., Yu, Z. Q. and Zhu, J. X.: *Powder Technol.*, **71**, 51(1992).
- Wong, R., Pugsley, T. and Berruti, F.: *Chem. Eng. Sci.*, **47**, 2301 (1992).
- Adánez, J., Gayán, P., García, L. F. and Diego, L. F.: *Powder Technol.*, **81**, 259(1994).
- Jiang, P., Bi, H., Liang, S. C. and Fan, L. S.: *AIChE J.*, **2**, 193 (1994).
- Namkung, W., Cho, Y. J. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **32**, 241(1994).
- Yagi, S. and Aochi, T.: Paper presented at Soc. Chem. Engrs. (Japan) Spring Meeting(1955).
- Zenz, F. A. and Weil, N. A.: *AIChE J.*, **4**, 472(1958).
- 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**(137), 366(1974).
- Geldart, D., Cullinan, J., Georgiades, S., Gilvray, D. and Pope, D. J.: *Trans. IChemE*, **57**, 269(1979).
- Wen, C. Y. and Chen, L. H.: *AIChE J.*, **28**, 117(1982).
- Kato, K., Tajima, T., Maa, M. and Iwamoto, H.: in Fluidization '85, Science and Technology, 136(1985).
- Yerushalmi, J., Turner, D. H. and Squires, A. M.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **15**, 47(1976).
- Weinstein, H., Graff, R. A., Meller, M. and Shao, M. J.: in Fluidization, Kunii, D. and Toei, R., Eds., Engineering Foundation, New York, 299(1984).
- Yang, G. L., Huang, Z. and Zhao, L. Z.: in Fluidization, Kunii, D. and Toei, R., Eds., Engineering Foundation, New York, 145 (1984).
- Rhodes, M. J.: Ph.D. Thesis, University of Bradford(1986).
- Hartge, E. U., Rensber, D. and Werther, J.: in Circulating Fluidized Bed Technology II, Basu, P. and Large, J. F., Eds, Pergamon, Oxford, U.K., 165(1988).
- Horio, M., Morishita, K., Tachibana, O. and Murata, M.: in Circulating Fluidized Bed Technology II, Basu, P. and Large, J. F., Eds, Pergamon, Oxford, 147(1988).
- Bi, H. T., Jin, Y., Yu, Z. Q. and Bai, D. R.: in Fluidization VI, Grace, J. R., Shemilt, L. W. and Bergounou, M. A., Eds, Engineering Foundation, New York, 701(1989).
- Louge, M. and Chang, H.: *Powder Technology*, **60**, 197(1990).
- Ouyang, S., Lin, J. and Potter, O. E.: *Powder Technology*, **74**, 73 (1993).
- Cho, Y. J., Namkung, W., Park, S. W. and Kim, S. D.: *J. Chem. Eng. Japan*, **27**, 158(1994).