

기체 유동층에서 입자 비산속도 상관식에 의한 수송속도의 예측

원유섭 · 무하메드 샤자드 쿠람* · 정아름 · 최정후[†] · 류호정**

건국대학교 화학공학과
 05029 서울특별시 광진구 능동로 120
 *COMSATS Institute of Information Technology 화학공학과
 54000 Defence Road, Lahore, Pakistan
 **한국에너지기술연구원

34129 대전광역시 유성구 가정로 152
 (2017년 5월 25일 접수, 2017년 6월 30일 수정본 접수, 2017년 7월 14일 채택)

Predicting the Transport Velocity by the Correlation on Particle Entrainment Rate in the Gas Fluidized-bed

Yoo Sube Won, Muhammad Shahzad Khurram*, A Reum Jeong, Jeong-Hoo Choi[†] and Ho-Jung Ryu**

Department of Chemical Engineering, Konkuk University, 120, Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, 05029, Korea
 *Department of Chemical Engineering, COMSATS Institute of Information Technology, Defence Road, Lahore 54000, Pakistan
 **Korea Institute of Energy Research, 152, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34129, Korea
 (Received 25 May 2017; Received in revised form 30 June 2017; accepted 14 July 2017)

요 약

기체 유동층에서 입자비산속도에 관한 상관식을 사용하여 입자의 수송속도를 예측하는 모델을 제안하였다. Choi 등과 Li와 Kato의 상관식을 사용하여 emptying time 방법을 모사하였다. 기체속도의 단위에 의한 영향을 배제하기 위해서, 기체속도를 종말속도로 나눈 무차원 속도를 x-축의 값으로 사용하였다. y-축은 입자비산속도의 역수를 사용하였다. 기체속도를 증가시킬 때, y-값의 감소 기울기가 절대값으로 0.398 [m²/kg]를 나타내는 무차원 속도를 수송속도로 간주하였다. 모델의 예측값은 고온, 고압에서도 측정값과 비교적 잘 일치하였다.

Abstract – A model for predicting the transport velocity was proposed using the correlation of the particle entrainment rate in the gas fluidized bed. The emptying time method was simulated using correlations of Choi et al. and Li and Kato. In order to exclude the influence of the unit of the gas velocity, the dimensionless velocity obtained by dividing the gas velocity by the terminal velocity was used as the value of the x-axis. The inverse of the particle entrainment rate was used as the value of the y-axis. When increasing the gas velocity, the non-dimensional velocity, at which the decreasing slope of the y-value is 0.398 [m²/kg] in absolute value, was considered as the transport velocity. The transport velocity predicted by the model was in good agreement even at high temperature and high pressure.

Key words: Transport velocity, Correlation, Fluidized-bed, Riser, Fast fluidization

1. 서 론

수송속도는 대부분의 입자가 유동층에 머무는 지속 유동층과 모든 입자가 수송되는 고속 유동층의 경계속도로 많이 연구되었으며, 이에 관한 여러 상관식이 제시되었다[1-24]. Table 1은 대표적인 상관식을 요약하여 나타낸다. 수송속도에 관한 상관식은 기체와 입자의

특성, 유동층의 직경과 높이의 함수로 제시되었다. 수송속도는 입도 혹은 입자의 밀도가 증가함에 따라 증가하였다. Chehbouni 등[15]은 유동층의 직경이 증가하면 수송속도가 증가하는 것으로 보고하였지만, Khurram 등[23]은 유동층의 직경이 증가하면 감소하고, 유동층의 높이가 증가하면 증가하는 것으로 보고하였다. 입자수송속도는 온도가 증가함에 따라서 증가하였고[17,19,22], 압력이 증가하면 감소하였다[24]. 한편 입도가 작아지면, 온도의 영향이 감소하는 경향을 보였다[22].

입자 수송속도에 관한 상관식은 모두 경험식으로 실험자료가 얻어진 범위에서 유효하기 때문에 그의 적용범위가 제한되었다. 결과적으로 유동층의 조건에 따라 실험결과와 가장 잘 일치하는 상관식이

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: choijhoo@konkuk.ac.kr

‡이 논문은 부경대학교 이재근 교수의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Table 1. Correlations on transport velocity

Authors	Correlations	Applicable range
Lee and Kim [7]	$Re_{tr} = 2.91Ar^{0.354}$	$1.22 \times 10^2 < Ar < 5.7 \times 10^4$
Perales et al. [8]	$Re_{tr} = 1.41Ar^{0.483}$	$5 \times 10^2 < Ar < 2 \times 10^5$
Bi and Fan [10]	$Re_{tr} = 2.28Ar^{0.419}$	$1.25 \times 10^2 < Ar < 1.45 \times 10^5$
Adanez et al. [13]	$Re_{tr} = 2.08Ar^{0.463}$	$4.5 \times 10^2 < Ar < 6.2 \times 10^4$
Bi and Grace [14]	$Re_{tr} = 1.53Ar^{0.50}$	$2 < Ar < 4 \times 10^6$
Chehbouni et al. [15]	$Re_{tr} = 0.169Ar^{0.545}(D_t/d_p)^{0.3}$	$1.18 < Ar < 1.19 \times 10^7$, $0.05 < D_t [m] < 0.3$
Ryu et al. [19]	$Re_{tr} = 0.0428Ar^{0.587}(D_t/d_p)^{0.521}$	Based on correlation of Chehbouni et al. [15]
Seo et al. [22]	$Re_{tr} = 0.611Ar^{0.586}$	
Khurram et al. [23]	$Re_{tr} = 0.458Ar^{0.482}(H_t/D_t)^{0.357}$	$0.81 < Ar < 1.21 \times 10^5$, $8 < H_t/d_t [-] < 112$

달라짐이 보고되었다[19,23]. 온도의 영향을 조사한 Ryu 등[19]의 연구에서는 Chehbouni 등[15]의 상관식이 가장 잘 일치하였다. 그러나 상온, 상압에서 얻어진 결과를 상관식과 비교한 Khurram 등[23]의 보고에서는 Perales 등[8]의 상관식이 가장 우수하였다.

수송속도를 결정하는 하나의 실험 방법으로 Han 등[5]은 emptying time 방법을 제안하였다. 이 방법은 쉽게 사용할 수 있는 장점이 있다. 일정량의 고체를 유동층에 채우고 정해진 속도에서 고체를 완전히 비산시키는데 걸리는 시간을 측정한다. 일반 눈금의 모눈 종이에서 유속에 따라서 이 시간을 도식하여 시간이 급속히 감소하는 구간과 완만히 감소하는 구간의 접점에서 유속을 수송속도라고 정하였다. 이 방법은 유속에 따라 변화하는 입자비산속도의 안정적인 경향을 이용하였다. 즉 입자의 비산속도로부터 입자의 수송속도를 결정할 수 있음을 의미하였다. 입자 비산속도에 관한 좋은 상관식으로부터 수송속도를 결정할 수 있다면, 이는 기체와 고체의 물리적 특성과 규격이 다른 유동층 반응기에 적용될 수 있는 보다 일반화된 방법으로 사용될 수 있다. 그러나, 이를 조사한 연구는 아직 없었다.

본 연구에서는 입자비산속도에 관한 상관식을 사용하여 수송속도를 결정하는 일반화 된 방법을 구축하는 것을 목적으로 수행되었다.

2. 모 델

본 연구의 목적에 부합하기 위해서는 가능한 한 넓은 범위에서 적용될 수 있는 입자비산속도에 관한 상관식이 사용되어야 한다. 이를 위해서 온도와 압력의 영향을 포함하고, 비교적 넓은 입자 조건과 유동층 규격에서 얻어진 실험자료를 바탕으로 제시된 다음의 Choi 등[25]의 상관식을 사용하였다.

$$K_i^* = K_{ih}^* + K_{iso}^* \quad (1a)$$

where

$$K_{ih}^* d_p / \mu = C_d Re_p \exp(-9.12 - 0.0153a (H_t - H_b)) \quad (1b)$$

$$K_{iso}^* d_p / \mu = Ar^{0.5} \exp(6.92 - 2.39F_g^{0.303} - 13.1/F_d^{0.902}) \quad (1c)$$

with

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

$$\left(\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g}\right)^{0.731} C_d^{-1.47} \quad (2)$$

$$Ar = g d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) / \mu^2 \quad (3)$$

$$F_g = 2g d_p (\rho_p - \rho_g) / 3 \text{ (SI units throughout)} \quad (4a)$$

$$F_d = C_d \rho_g U^2 / 2 \text{ (SI units throughout)} \quad (4b)$$

$$C_d = 24/Re_p \text{ for } Re_p \leq 5.8 \quad (5a)$$

$$C_d = 10/Re_p^{0.5} \text{ for } 5.8 < Re_p \leq 540 \quad (5b)$$

$$C_d = 0.43 \text{ for } 540 < Re_p \quad (5c)$$

$$Re_p = d_p U \rho_g / \mu \quad (6)$$

Choi 등 [25]의 상관식은 다음의 범위에서 유효하였다: 입도 21~710 μm , 입자 밀도(apparent particle density) 2400~6158 kg/m^3 , 기체 유속 0.15~2.8 m/s , 온도 12~600 $^\circ\text{C}$, 압력 101~3200 kPa , 유동층 직경 0.1~0.91 m , 유동층 높이 1.97~9.1 m . 최소유동화속도(U_{mf})는 Wen과 Yu [26]의 상관식을 사용하여 결정하였다.

Emptying time 방법의 조건에 해당하는 고체 층 높이 H_b 는 영으로 고려하였다. Choi 등[25]의 상관식은 입자간의 힘을 고려하지 않았기 때문에 입도가 작은 경우에는 적용이 제한된다. 입자의 크기가 작은 경우에는 입자간의 부착력으로 인하여 이를 고려하는 보정이 필요하다. Ma와 Kato [27]에 의하면, 입도가 임계입경(d_{crit})보다 작으면 입자비산속도가 일정해지는 경향이 발견되었다. 본 연구에서는 이를 고려하여 임경을 다음과 같이 고려하였다.

$$d_p = d_p \text{ for } d_p > d_{crit} \quad (7a)$$

$$d_p = d_{crit} \text{ for } d_p < d_{crit} \quad (7b)$$

$$d_{crit} = 0.101 / (g \rho_p^{0.731}) \quad (8)$$

Li와 Kato [28]의 연구에서는 또 층 입자의 입도(d_{pm})가 비산되는 입자(d_p)보다 큰 경우에는 비산되는 입자가 층 입자에 부착되어 비산속도가 감소되는 것을 발견하였다. 이를 근거로 그들은 다음과 같은 보정계수(C_{ps})를 제안하였다.

$$C_{ps} = 1 \text{ for } d_{pm} \leq 60 \mu\text{m} \quad (9a)$$

$$C_{ps} = ((200 - d_{pm})/150)^\alpha + ((d_{pm} - 60)/150)^\alpha (d_p/d_{crit})^{1.4} \text{ for } 60 \mu\text{m} < d_{pm} \leq 200 \mu\text{m} \quad (9b)$$

$$C_{ps} = (d_p/d_{crit})^{1.4} \text{ for } 200 \mu\text{m} < d_{pm} \quad (9c)$$

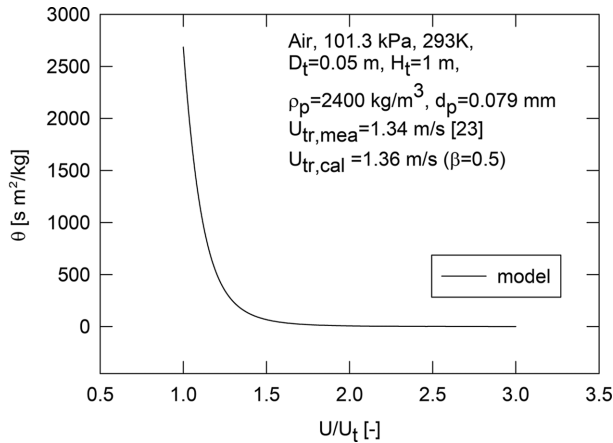
$$\alpha = (d_{crit}/d_p)^{0.3} \quad (10)$$

본 연구에서는 Choi 등 [25]의 상관식에 이를 도입하여 입자비산속도를 다음과 같이 수정하여 나타내었다.

$$K_i^* = C_{ps} (K_{ih}^* + K_{iso}^*) \quad (11)$$

Emptying time 방법에서 y-축은 유동층의 입자가 비워지는 시간으로 입자비산속도의 역수와 정성적으로 일치한다. 입자비산속도의 역수(θ)는 이론적으로 단위 단면적의 유동층에서 1 kg 의 고체가 비산되는데 걸리는 시간이다.

$$\theta = 1/K_i^* \quad (12)$$

Fig. 1. U/U_t versus θ .

x-축은 유속이며, 유속의 단위에 따라서 비워지는 시간의 기울기가 달라진다. 이를 보완하기 위해서는 보편적인 기준이 정해져야 한다. Emptying time 방법을 사용한 이전의 연구에서는 모두 무차원 속도를 사용하지 않았다. 이를 위해서 본 연구에서는 속도를 입자의 종말속도로 나누어준 무차원 속도(U^+)를 x-축으로 표시하였다.

$$U^+ = U/U_t \quad (13)$$

$$U_t = \left\{ \frac{4gd_p(\rho_p - \rho_g)}{3\rho_g C_d} \right\}^{1/2} \quad (14)$$

무차원 속도 1.0에서 시작하여 속도를 증가시키면 θ 는 급격히 감소한 후 완만하게 감소하는 경향을 나타낸다(Fig. 1). y-값이 급격히 감소하는 영역과 완만하게 감소하는 영역의 경계점에서 무차원 속도를 구하고, 이어서 속도를 구하여 수송속도로 정의할 수 있다. 그러나 최적의 경계를 정의하기 위해서 기존의 보고된 수송속도를 가장 잘 만족하는 절대값 감소 기울기(β)를 조사하여야 한다. 그림에서 나타내는 것과 같이 유속이 증가함에 따라서 β 는 감소한다.

$$\beta = \left| \frac{d\theta}{dU^+} \right| \quad (15)$$

3. 결과 및 고찰

먼저 Fig. 1의 경향에서 임의의 절대값 감소 기울기(β)를 보이는 속도를 수송속도라고 간주하고, 문헌의 측정값과 비교하였다. 문헌의 측정값은 Khurram 등[24]의 보고에서 사용된 상온, 상압의 자료와 고압과 고온에서 측정값을 보고한 Bae 등[17], Ryu 등[19], Seo 등[22], Kim 등[24]의 자료(Table 2)를 사용하였다. Fig. 2는 β 를 변화시키며 얻어진 본 모델의 예측값과 Table 2의 측정값 사이의 평균상대오차의 변화를 나타낸다. 평균상대오차(average relative deviation, ARD)는 다음과 같이 정의되었다.

$$ARD = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{|U_{tr,mea} - U_{tr,cal}|}{U_{tr,mea}} \right)_i}{N} \quad (16)$$

β 가 증가함에 따라서 평균상대오차는 감소하여 $\beta=0.398$ 에서 최소값($ARD=0.2538$)을 보인 후 다시 증가하는 경향을 나타내었다.

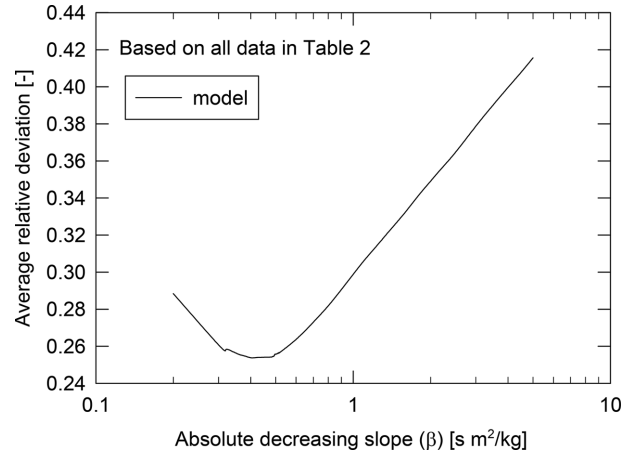
Fig. 2. β versus ARD.

Table 2와 Fig. 3은 수송속도에 관한 문헌의 측정값을 본 모델에 의한 예측값($\beta=0.398$), 문헌에 보고된 대표적인 상관식(Table 1)에 의한 예측값과 비교하고 있다. 본 모델은 Fig. 2에서 최저 평균편차를 보이는 $\beta=0.398$ 에서 유속을 수송속도로 간주하였다. 표에서 나타내는 것과 같이 본 모델, Chehbouni 등[15]과 Seo 등[22]의 상관식에 의해서 예측되는 수송속도가 측정값과 비교적 잘 일치하는 경향을 나타내었다. Fig. 3은 각 상관식으로 얻어진 예측값과 측정값의 비교를 시각적으로 나타내고 있다. Chehbouni 등[15]의 상관식은 큰 수송속도에서 측정값과 큰 편차를 보였고, Seo 등[22]의 상관식은 작은 수송속도에서 측정값과 큰 편차를 나타내었다.

Fig. 4는 Seo 등[22]에 의해서 측정된 수송속도를 본 모델의 예측값과 비교하고 있다. 측정된 수송속도는 모든 입도에서 온도가 증가하면 증가하였다. 그러나 입도가 감소하면 온도의 영향이 감소하여 입도 0.135 mm의 경우에는 온도의 영향이 매우 완만하게 나타났다.

본 모델에 의한 예측값은 입도에 따라 다양하게 나타났다. 입도 0.270 mm와 0.385 mm의 경우에는 온도가 증가함에 따라서 증가하였다. 그러나 입도 0.135 mm와 0.210 mm의 경우에는 온도가 증가함에 따라서 증가하여 최대값을 보인 후 감소하는 경향을 나타내었다. 입도가 클수록 최대값을 보이는 온도가 증가하였다. 식 4(b), (5), (6)을 사용하여 Choi 등[25]이 고찰한 것과 같이 온도가 증가하면 기체의 밀도가 감소하지만 점도가 증가하여 입자에 가해지는 항력은 감소하여 최소값을 보인 후 증가하는 경향을 나타내며, 입자비산속도도 동일한 경향을 나타내었다. 이로 인하여 수송속도는 증가하여 최대값을 보인 후 감소하는 경향을 나타내게 된다. 입도가 증가하면 최소 입자비산속도를 보이는 온도가 증가하며[25], 이 결과 최대 수송속도를 보이는 온도가 증가하게 된다. 입도 0.385 mm의 경우에 고온에서 본 모델의 예측값은 측정값과 차이가 컸다.

Fig. 5는 온도와 압력을 변화시키며 수송속도를 측정된 Bae 등[17], Ryu 등[19], Kim 등[24]의 측정값을 상관식과 비교하였다. 본 모델은 Bae 등[17]의 측정값과 잘 일치하였으나, Chehbouni 등[15]의 상관식은 측정값보다 더 작게 예측하였고, Seo 등의 상관식은 측정값보다 더 크게 예측하였다. 온도가 증가하면서 Bae 등[17]의 측정값($d_p=0.256$ mm, $\rho_p=2617$ kg/m³, $U_{tr}=2.72\sim3.25$ m/s)은 유사한 조건의 Seo 등[22]의 측정값($d_p=0.270$ mm, $\rho_p=2500$ kg/m³, $U_{tr}=2.55\sim4.47$ m/s)보다 훨씬 작았다. 이 것이 큰 입도의 경우에 Seo 등[22]의 측정값보다

Table 2. Comparison of U_p between measured and calculated by correlations

Sources	Experimental data							U _p calculated by correlations										
	P [atm]	T [°C]	ρ _p [kg/m ³]	d _p [μm]	D _p [m]	H _p [m]	U _{trapped} [m/s]	Lee & Kim [7]	Perales [8]	Adanez et al. [13]	Smolders & Baeyens [18]	Bi & Fan [10]	Bi & Grace [14]	Chehbouni et al. [15]	Ryu et al. [19]	Seo et al. [22]	Khurram et al. [23]	This study [m/s]
Khurram et al. [23]																		
GB-21	1	25	2364	21	0.050	1.0	0.80	1.90	0.90	1.33	1.11	1.47	0.97	1.09	1.53	0.38	0.85	0.46
GB-40	1	25	2440	40	0.050	1.0	1.00	2.00	1.21	1.73	1.47	1.75	1.36	1.38	1.82	0.63	1.15	0.64
Plastic	1	25	1272	50	0.050	1.0	0.80	1.61	0.98	1.39	1.18	1.41	1.10	1.04	1.31	0.51	0.93	0.80
Iron ore	1	25	4503	75	0.050	1.0	2.78	2.58	2.16	2.93	2.52	2.67	2.53	2.38	3.03	1.45	2.04	1.55
Sand	1	25	2591	79	0.050	1.0	1.40	2.13	1.70	2.32	1.99	2.14	1.97	1.79	2.22	1.09	1.60	1.43
FCC	1	25	1470	93	0.050	1.0	1.16	1.76	1.39	1.90	1.63	1.76	1.61	1.39	1.65	0.89	1.31	1.43
GB-167	1	25	2374	167	0.050	1.0	2.00	2.16	2.28	2.98	2.58	2.50	2.74	2.19	2.52	1.83	2.14	2.12
GB-295	1	25	2416	295	0.050	1.0	2.60	2.25	2.96	3.74	3.27	2.92	3.67	2.68	2.92	2.85	2.78	2.90
GB-646	1	25	2418	646	0.050	1.0	4.45	2.37	4.21	5.08	4.50	3.57	5.43	3.48	3.52	5.16	3.95	4.73
GB-730	1	25	2418	730	0.024	1.0	5.53	2.38	4.45	5.33	4.72	3.69	5.77	2.91	2.47	5.67	5.42	5.15
GB-925	1	25	2523	925	0.050	1.0	5.80	2.46	5.05	5.96	5.30	3.99	6.64	4.02	3.94	6.95	4.73	6.22
GB-1090	1	25	2523	1090	0.024	1.0	7.92	2.48	5.44	6.35	5.67	4.16	7.20	3.41	2.79	7.87	6.61	7.00
Yerushalmi and Cankurt [1]	1	25	2460	103	0.076	8.5	3.85	2.12	1.86	2.51	2.16	2.25	2.19	2.15	2.85	1.30	3.25	1.67
Li and Kwauk [2]	1	25	3160	54	0.090	8.0	2.45	2.23	1.57	2.19	1.87	2.11	1.79	2.09	3.09	0.92	2.53	0.97
Avidan and Yerushalmi [3]	1	25	1070	49	0.152	8.5	1.40	1.51	0.89	1.28	1.08	1.31	0.99	1.31	2.10	0.45	1.22	0.86
	1	25	1450	49	0.152	8.5	1.95	1.68	1.03	1.47	1.25	1.49	1.16	1.55	2.51	0.54	1.41	0.75
Shin et al. [4]	1	25	1670	33	0.152	8.5	1.10	1.73	0.93	1.35	1.14	1.42	1.02	1.47	2.48	0.44	1.27	0.62
	1	25	1720	205	0.078	2.5	1.58	1.95	2.14	2.78	2.41	2.31	2.58	2.25	2.76	1.77	2.38	2.22
Han et al. [5]	1	25	1720	395	0.078	2.5	2.28	2.03	2.87	3.58	3.14	2.73	3.58	2.80	3.23	2.91	3.18	3.16
	1	25	1400	1030	0.078	2.6	2.09	2.01	3.99	4.73	4.20	3.20	5.22	3.45	3.60	5.34	4.48	5.38
Horio et al. [12]	1	25	1400	730	0.078	2.6	1.78	1.97	3.42	4.14	3.66	2.93	4.39	3.08	3.32	4.11	3.85	4.31
	1	25	1000	60	0.050	2.4	0.92	1.49	0.95	1.34	1.14	1.34	1.06	0.97	1.19	0.51	1.22	0.95
Chesonis et al. [6]	1	25	2600	106	0.050	2.4	4.50	2.17	1.94	2.60	2.24	2.31	2.28	1.98	2.38	1.37	2.49	1.71
	1	25	3460	120	0.100	6.2	2.80	2.42	2.35	3.12	2.69	2.69	2.80	2.97	4.16	1.78	3.32	1.92
Lee and Kim [7]	1	25	2500	24	0.078	6.0	1.80	1.95	0.98	1.43	1.21	1.55	1.06	1.34	2.05	0.43	1.50	0.47
Perales et al. [8]	1	25	1715	80	0.092	2.9	1.60	1.84	1.40	1.92	1.65	1.81	1.61	1.72	2.40	0.87	1.55	1.34
Ishii and Horio [9]	1	25	2650	212	0.092	2.9	1.98	2.28	2.67	3.44	2.99	2.79	3.26	3.03	3.91	2.34	2.95	2.46
	1	25	1780	61	0.200	1.6	1.10	1.83	1.26	1.76	1.50	1.71	1.43	2.03	3.44	0.72	0.86	0.99
Hirama et al. [11]	1	25	750	54	0.100	5.5	1.50	1.34	0.79	1.13	0.95	1.16	0.87	0.99	1.40	0.40	1.07	1.09
Adanez et al. [13]	1	25	1400	315	0.100	3.9	3.00	1.87	2.34	2.98	2.60	2.36	2.88	2.50	3.09	2.17	2.80	2.68
	1	25	1400	561	0.100	3.9	3.60	1.93	3.04	3.73	3.29	2.74	3.85	3.03	3.54	3.37	3.62	3.68
Namkung et al. [16]	1	25	1400	710	0.100	3.9	4.00	1.96	3.38	4.09	3.62	2.91	4.33	3.28	3.75	4.03	4.02	4.24
	1	25	1400	894	0.100	3.9	4.50	1.99	3.74	4.48	3.97	3.09	4.86	3.55	3.96	4.79	4.45	4.90
	1	25	2600	170	0.100	3.9	3.15	2.24	2.40	3.13	2.71	2.61	2.89	2.85	3.83	1.96	2.86	2.18
	1	25	2600	344	0.100	3.9	4.30	2.34	3.29	4.11	3.61	3.13	4.11	3.61	4.53	3.34	3.92	3.24
	1	25	2600	387	0.100	3.9	4.40	2.35	3.47	4.31	3.78	3.23	4.36	3.76	4.66	3.65	4.13	3.47
	1	25	2600	561	0.100	3.9	5.05	2.41	4.10	4.97	4.39	3.55	5.25	4.25	5.10	4.84	4.87	4.41
	1	25	2600	710	0.100	3.9	5.60	2.44	4.55	5.45	4.83	3.77	5.90	4.60	5.40	5.79	5.41	5.19
	1	25	2600	894	0.100	3.9	6.15	2.48	5.05	5.96	5.30	4.00	6.62	4.97	5.70	6.89	6.00	6.14
	1	25	1720	65	0.100	5.3	1.40	1.82	1.28	1.78	1.52	1.72	1.45	1.65	2.38	0.74	1.70	1.06
	1	25	3055	125	0.100	5.3	2.40	2.32	2.26	2.99	2.58	2.58	2.68	2.81	3.91	1.71	3.01	1.91

Table 2. Continued

Sources	Experimental data						U_{f} calculated by correlations										This study	
	P [atm]	T [°C]	ρ_p [kg/m ³]	d_p [μm]	D_p [m]	H_f [m]	$U_{\text{f,ref}}$ [m/s]	Lee & Kim [7]	Perales et al. [8]	Adanez et al. [13]	Smolders & Baeyens [18]	Bi & Grace [10]	Bi & Grace [14]	Chelbouni et al. [15]	Ryu et al. [19]	Seo et al. [22]	Khurram et al. [23]	
Smolders and Baeyens [18]	1	25	2700	70	0.100	8.0	2.20	2.14	1.64	2.25	1.93	2.11	1.89	2.16	3.16	1.02	2.54	1.34
	1	25	2600	90	0.100	8.0	3.25	2.15	1.80	2.44	2.10	2.22	2.10	2.30	3.29	1.21	2.79	1.55
Balasubramanian et al. [20]	1	25	2650	412	0.052	1.2	3.47	2.38	3.60	4.45	3.91	3.31	4.54	3.19	3.41	3.87	3.55	3.63
	1	25	2650	177	0.052	1.2	2.56	2.26	2.46	3.20	2.78	2.66	2.98	2.40	2.78	2.04	2.44	2.23
	1	25	1480	530	0.052	1.2	3.19	1.96	3.04	3.75	3.30	2.76	3.85	2.52	2.57	3.33	3.00	3.61
	1	25	1480	385	0.052	1.2	2.47	1.93	2.64	3.31	2.90	2.55	3.28	2.27	2.38	2.62	2.60	3.02
	1	25	676	385	0.052	1.2	1.86	1.46	1.80	2.30	2.01	1.83	2.21	1.48	1.50	1.65	1.78	2.61
	1	25	900	81	0.052	1.2	1.35	1.47	1.03	1.43	1.22	1.38	1.17	1.03	1.22	0.60	1.02	1.23
Ryu et al. [19]	1	25	4080	181	0.020	2.0	2.05	2.67	3.09	3.99	3.47	3.25	3.77	2.31	2.20	2.69	5.17	2.49
	1	250	4080	181	0.020	2.0	2.46	4.33	4.20	5.56	4.81	4.81	4.99	2.88	2.58	3.16	7.02	2.77
	1	400	4080	181	0.020	2.0	2.67	5.36	4.81	6.45	5.56	5.73	5.66	3.18	2.78	3.41	8.05	2.91
	1	600	4080	181	0.020	2.0	2.84	6.66	5.53	7.51	6.45	6.85	6.45	3.52	3.01	3.69	9.26	2.68
Kim et al. [24]	1	25	3753	91	0.013	6.8	2.08	2.44	2.17	2.91	2.51	2.59	2.55	1.53	1.41	1.52	6.58	1.71
	4.9	25	3753	91	0.013	6.8	1.65	0.86	0.94	1.23	1.06	1.02	1.14	0.74	0.72	0.78	2.86	0.89
	9.9	25	3753	91	0.013	6.8	1.45	0.55	0.66	0.84	0.73	0.68	0.80	0.54	0.54	0.59	1.99	0.67
	14.8	25	3753	91	0.013	6.8	1.32	0.42	0.53	0.68	0.59	0.54	0.66	0.44	0.46	0.49	1.61	0.57
Bae et al. [17]	1	15	2617	256	0.020	2.0	2.72	2.26	2.86	3.64	3.18	2.88	3.53	2.01	1.82	2.67	4.78	2.72
	1	200	2617	256	0.020	2.0	2.80	3.47	3.75	4.88	4.24	4.07	4.52	2.44	2.10	3.08	6.26	2.97
	1	400	2617	256	0.020	2.0	3.07	4.68	4.53	6.01	5.19	5.20	5.39	2.80	2.33	3.42	7.58	3.19
	1	600	2617	256	0.020	2.0	3.25	5.82	5.22	6.99	6.03	6.22	6.14	3.11	2.52	3.70	8.73	3.37
Seo et al. [22]	1	25	2500	135	0.078	8.5	1.42	2.21	2.14	2.84	2.45	2.45	2.55	2.41	3.12	1.62	3.69	1.93
	1	200	2500	135	0.078	8.5	1.56	3.29	2.75	3.73	3.20	3.39	3.21	2.89	3.56	1.84	4.75	2.04
	1	400	2500	135	0.078	8.5	1.69	4.43	3.33	4.59	3.92	4.33	3.83	3.32	3.95	2.05	5.75	1.74
	1	600	2500	135	0.078	8.5	1.75	5.50	3.83	5.34	4.56	5.17	4.36	3.68	4.28	2.22	6.62	1.51
	1	800	2500	135	0.078	8.5	1.95	6.53	4.28	6.02	5.13	5.96	4.83	3.99	4.55	2.36	7.40	1.36
	1	25	2500	210	0.078	8.5	2.15	2.27	2.61	3.37	2.93	2.75	3.17	2.80	3.47	2.26	4.49	2.43
	1	200	2500	210	0.078	8.5	2.68	3.38	3.35	4.43	3.83	3.80	4.00	3.35	3.96	2.58	5.78	2.63
	1	400	2500	210	0.078	8.5	3.11	4.55	4.06	5.45	4.69	4.85	4.77	3.85	4.40	2.86	7.00	2.82
	1	600	2500	210	0.078	8.5	3.60	5.65	4.67	6.34	5.45	5.79	5.43	4.27	4.75	3.10	8.06	2.89
	1	800	2500	210	0.078	8.5	4.05	6.71	5.22	7.15	6.13	6.67	6.03	4.63	5.06	3.30	9.01	2.45
	1	25	2500	270	0.078	8.5	2.55	2.30	2.92	3.71	3.24	2.93	3.60	3.04	3.69	2.73	5.03	2.79
	1	200	2500	270	0.078	8.5	3.10	3.43	3.75	4.88	4.24	4.05	4.54	3.64	4.21	3.12	6.47	3.03
	1	400	2500	270	0.078	8.5	3.85	4.62	4.54	6.00	5.19	5.17	5.41	4.19	4.67	3.46	7.83	3.25
	1	600	2500	270	0.078	8.5	4.47	5.74	5.23	6.99	6.03	6.18	6.16	4.64	5.05	3.75	9.02	3.44
	1	800	2500	270	0.078	8.5	5.10	6.81	5.84	7.89	6.78	7.12	6.83	5.04	5.37	3.99	10.08	3.54
	1	25	2500	380	0.078	8.5	3.23	2.35	3.41	4.24	3.72	3.20	4.27	3.41	4.01	3.54	5.86	3.41
	1	200	2500	380	0.078	8.5	3.90	3.50	4.38	5.57	4.87	4.42	5.38	4.09	4.57	4.04	7.53	3.71
	1	400	2500	380	0.078	8.5	4.92	4.72	5.30	6.86	5.96	5.65	6.42	4.69	5.07	4.49	9.12	3.99
	1	600	2500	380	0.078	8.5	5.90	5.86	6.09	7.99	6.92	6.75	7.31	5.20	5.48	4.85	10.50	4.23
	1	800	2500	380	0.078	8.5	6.85	6.96	6.81	9.01	7.79	7.77	8.10	5.65	5.83	5.17	11.74	4.43
ARD by Eq. (16) for all data																		0.254

GB: glass bead

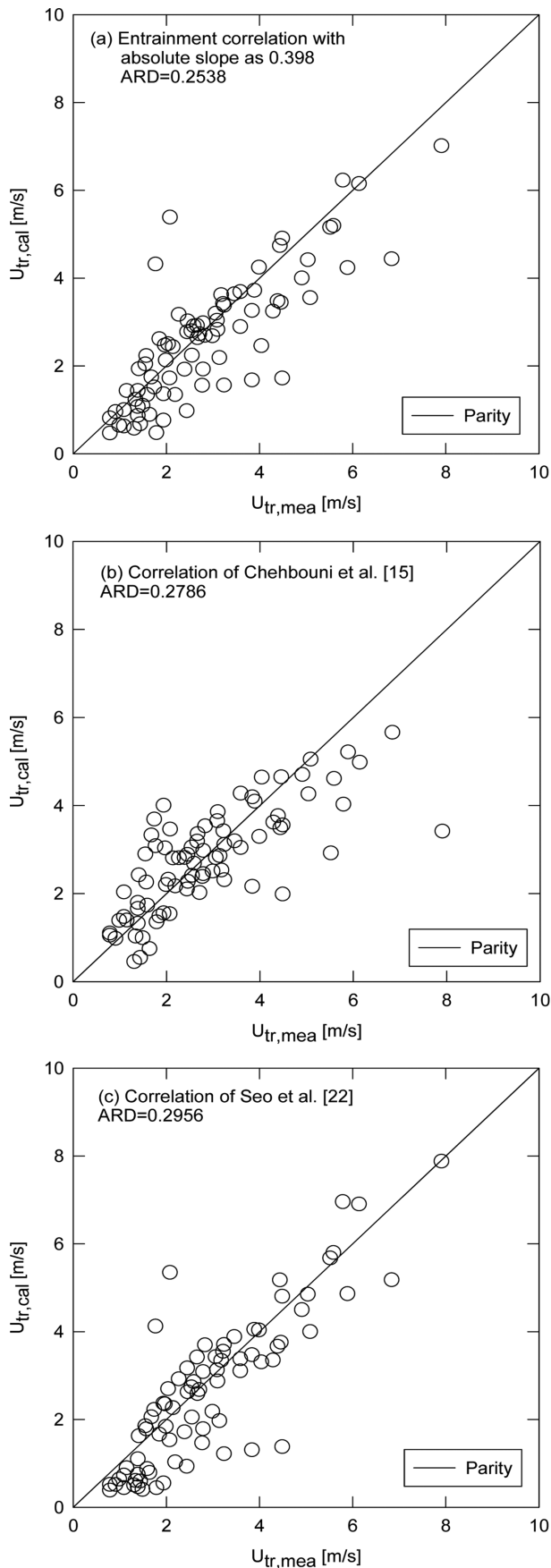


Fig. 3. Comparison between measured and calculated U_{tr} : (a) present model, (b) Chehbouni et al. [15], (c) Seo et al. [22].

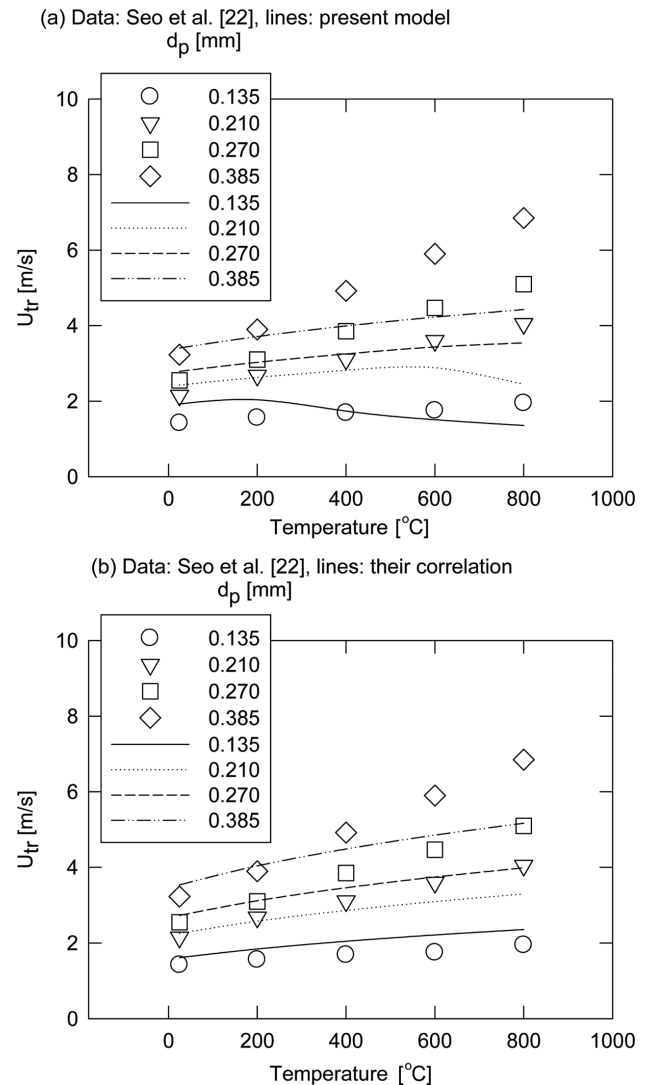


Fig. 4. Comparison between measured (Seo et al. [22]) and calculated U_{tr} : (a) present model, (b) correlation of Seo et al. [22].

본 모델의 예측값이 작았던 이유인 것으로 사료되었다(Fig. 4). Ryu 등[19]의 측정값과도 본 상관식은 비교적 잘 일치하는 경향을 나타내었다. 온도가 증가하며 온도의 영향이 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 본 모델은 온도 400 °C에서 수송속도가 최대값을 보인 후 600 °C에서 감소하는 경향을 나타내는 것이 측정값과 다르게 나타났다. 이는 위 Fig. 4(a)에서 보여주는 경향과 같이 설명될 수 있었다. Kim 등[24]의 측정값에서 나타내는 것과 같이 압력이 증가하면 기체 밀도의 증가로 인하여 수송속도는 감소하였다(Fig. 5(c)). 본 모델은 측정값의 경향을 비교적 잘 표현하였으나 작게 예측하였다. 본 모델을 비롯하여 상관식의 예측값이 작은 이유는 현재로서는 알 수가 없었으며, 추후 규명되어야 할 것으로 생각되었다.

결과적으로 Choi 등[25], Ma와 Kato [27], Li와 Kato [28]의 입자 비산속도 상관식을 근거로 하여 수송속도를 예측하는 본 모델은 다음의 범위에서 유효하였다: $21 < d_p [\mu\text{m}] < 1090$, $676 < \rho_p [\text{kg/m}^3] < 4503$, $0.332 < \rho_g [\text{kg/m}^3] < 18.1$, $1.72 \times 10^{-5} < \mu [\text{Pa}\cdot\text{s}] < 4.39 \times 10^{-5}$, $0.0127 < D_i [\text{m}] < 0.2$, $1 < H_i [\text{m}] < 8.5$. 그러나 온도가 증가하며 수송속도가 최대값을 보인 후 감소하는 경향은 실험적으로 더 규명되어야 한다.

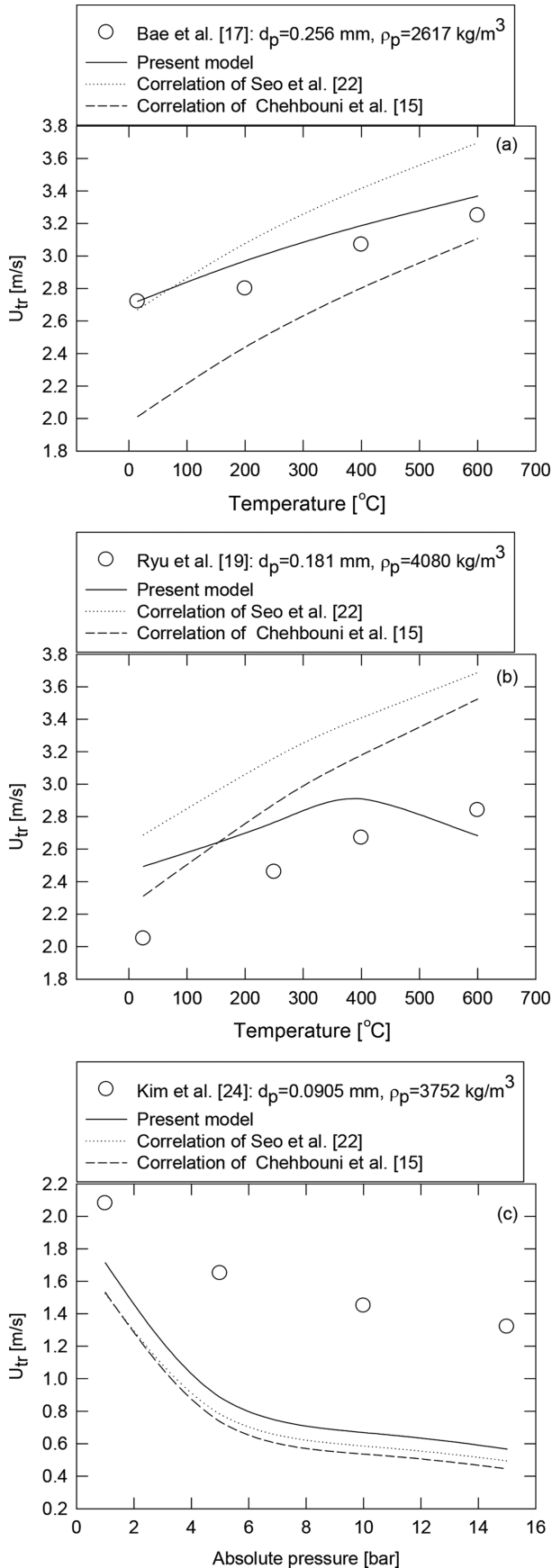


Fig. 5. Comparison between calculated (Chehbouni et al. [15]; Seo et al. [22]; present model) and measured U_{tr} : (a) Bae et al. [17], (b) Ryu et al. [19], (c) Kim et al. [24].

이를 위해서는 현재보다 더 좁은 온도간격에서 실험이 수행되어야 한다.

4. 결 론

입자비산속도 상관식으로부터 입자의 수송속도를 예측하는 모델을 제안하였다. Choi 등[25], Ma와 Kato [27], Li와 Kato [28]의 입자비산속도에 관한 상관식을 사용하여 고온과 고압의 기체 유동층에서 입자의 수송속도를 성공적으로 예측할 수 있었다. 그러나 모델에 의하여 예측되는, 온도가 증가함에 따라서 수송속도가 최대값을 보인 후 감소하는 경향은 장차 검토되고 개선되어야 할 것이다.

감 사

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(20152010201840).

Nomenclatures

- a : decay constant [1/m]
- Ar : Archimedes number, $\rho_g d_p^3 (\rho_p - \rho_g) g / \mu^2$ [-]
- C_d : drag coefficient on the particle surface based on the superficial gas velocity, [-]
- C_{ps} : particle size coefficient [-]
- d_{crit} : critical particle diameter, i.e. the maximum particle diameter at which the sum of interparticle adhesion forces influence dominantly in particle entrainment [m]
- d_{pm} : mean diameter of bed particles [μ m]
- d_p : particle diameter [m]
- D_t : column diameter [m]
- F_d : drag force on the particle per projection area [Pa]
- F_g : gravity force minus buoyancy force per projection area of particle [Pa]
- g : gravitational acceleration, 9.8 [m/s²]
- H_b : bed height [m]
- H_t : column height [m]
- K_i^* : entrainment rate of particles in size i [kg/(m² s)]
- K_{ih}^* : cluster flux of entrained particles in size i [kg/(m² s)]
- $K_{i\infty}^*$: dispersed noncluster flux of entrained particles in size i or elutriation rate constant of particles in size i above transport disengaging height [kg/(m² s)]
- N : number of data [-]
- n : exponent [-]
- P : absolute pressure [kPa]
- Re_p : particle Reynolds number, $d_p U_p \rho_g / \mu$ [-]
- Re_{tr} : Reynolds number at U_{tr} , $d_p U_{tr} \rho_g / \mu$ [-]
- T : temperature [°C]
- U : superficial gas velocity [m/s]
- U^+ : U/U_t [-]
- U_{mf} : minimum fluidizing velocity of bed particle [m/s]
- U_t : terminal velocity of particle [m/s]

U_{tr} : transport velocity for the vertical fluidized-bed [m/s]

Greeks

- α : exponent defined by Eq. (10) [-]
 β : absolute slope defined by Eq. (15) [m²s/kg]
 μ : gas viscosity [Pa s]
 ρ_g : gas density [kg/m³]
 ρ_p : particle density [kg/m³]
 θ : inverse of K_i^* [s m²/kg]

Subscripts

- cal : calculated
 mea : measured

References

- Yerushalmi, J. and Cankurt, N. T., "Further Studies of the Regimes of Fluidization," *Powder Technol.*, **24**(2), 187-205(1979).
- Li, Y. and Kwauk M., in J. R. Grace and J. M. Matsen (Ed.), *Fluidization*, Plenum Press, New York, 537-544(1980).
- Avidan, A. A. and Yerushalmi, J., "Bed Expansion in High Velocity Fluidization," *Powder Technol.*, **32**(2), 223-232(1982).
- Shin, B. C., Koh, Y. B. and Kim, S. D., "Hydrodynamics and Coal Combustion Characteristics of Circulating Fluidized Beds," *Hwahak Konghak*, **22**(5), 253-258(1984).
- Han, G. Y., Lee, G. S. and Kim, S. D., "Hydrodynamic Characteristics of a Circulating Fluidized Bed," *Korean J. Chem. Eng.*, **2**(2), 141-147(1985).
- Chesonis, D. C., Klinzing, G. E., Shaah, Y. T. and Dassori, C. G., "Hydrodynamics and Mixing of Solids in a Recirculating Fluidized Bed," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **29**(9), 1785-1792(1990).
- Lee, G. S. and Kim, S. D., "The Vertical Pneumatic Transport of Cement Raw Meal," *Korean Chem. Eng. Res.*, **20**(3), 207-216(1982).
- Perales, J. F., Coll, T., Llop, M. F., Puigjaner, L., Arnaldos, J. and Casal, J., in P. Basu, M. Horio and M. Hasatani (Ed.), *Circulating Fluidized Bed Technology III*, Pergamon Press, New York, 73-78(1991).
- Ishii, H. and Horio, M., "The Flow Structures of a Circulating Fluidized Bed," *Adv. Powder Technol.*, **2**(1), 25-36(1991).
- Bi, H. T. and Fan, L. S., "Existence of Turbulent Regime in Gas-Solid Fluidization," *AIChE J.*, **38**(2), 297-301(1992).
- Hirama, T., Takeuchi, H. and Chiba, T., "Regime Classification of Macroscopic Gas-Solid Flow in a Circulating Fluidized Bed Riser," *Powder Technol.*, **70**(3), 215-222(1992).
- Horio, M., Ishii, H. and Nishimuro, M., "On the Nature of Turbulent and Fast Fluidized Beds," *Powder Technol.*, **70**(3), 229-236(1992).
- Adanez, J., Diego, L. F. de and Gayan, P., "Transport Velocities of Coal and Sand Particles," *Powder Technol.*, **77**(1), 61-68(1993).
- Bi, H. T. and Grace, J. R., "Flow Regime Diagrams for Gas-Solid Fluidization and Upward Transport," *Int. J. Multiphase Flow*, **21**(6), 1229-1236(1995).
- Chehbouni, A., Chaouki, J., Guy, C. and Klvana, D., "Effets de Differents Parametres sur les Vitesses de Transition de la Fluidisation en Regime Turbulent," *The Canadian J. Chem. Eng.*, **73**(1), 41-50(1995).
- Namkung, W., Kim, S. W. and Kim, S. D., "Flow Regimes and Axial Pressure Profiles in a Circulating Fluidized Bed," *Chem. Eng. J.*, **72**(3), 245-252(1999).
- Bae, D.-H., Ryu, H.-J., Shun, D., Jin, G.-T., Lee, D.-K., "Effect of Temperature on Transition Velocity from Turbulent Fluidization to Fast Fluidization in a Gas Fluidized Bed," *Korean Chem. Eng. Res.*, **39**(4), 456-464(2001).
- Smolders, K. and Baeyens, J., "Gas Fluidized Beds Operating at High Velocities: a Critical Review of Occurring Regimes," *Powder Technol.*, **119**(2-3), 269-291(2001).
- Ryu, H.-J., Lim, N.-Y., Bae, D.-H. and Jin, G.-T., "Minimum Fluidization Velocity and Transition Velocity to Fast Fluidization of Oxygen Carrier Particle for Chemical-Looping Combustor," *Korean Chem. Eng. Res.*, **41**(5), 624-631(2003).
- Balasubramanian, N., Srinivasakannan, C. and Basha, C. A., "Transition Velocities in the Riser of a Circulating Fluidized Bed," *Adv. Powder Technol.*, **16**(3), 247-260(2005).
- Du, B., Warsito, W. and Fan, L. S., "Imaging the Choking Transition in Gas-Solid Risers Using Electrical Capacitance Tomography," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**(15), 5384-5395(2006).
- Seo, M. W., Goo, J. H., Kim, S. D., Lee, J. G., Guahk, Y. T., Rho, N. S., Koo, G. H., Lee, D. Y., Cho, W. C. and Song, B. H., "The Transition Velocities in a Dual Circulating Fluidized Bed Reactor with Variation of Temperatures," *Powder Technol.*, **264**, 583-591(2014).
- Khurram, M. S., Choi, J.-H., Won, Y. S., Jeong, A.-R., Park, Y. C., Ryu, H.-J. and Yi, C.-K., "Effects of Angle on the Transport Velocity in an Inclined Fluidized-Bed," *Korean J. Chem. Eng.*, **32**(12), 2542-2549(2015).
- Kim, J., Bae, D.-H., Baek, J.-I., Park, Y.-S. and Ryu, H.-J., "Effect of Pressure on Minimum Fluidization Velocity and Transition Velocity to Fast Fluidization of Oxygen Carrier for Chemical Looping Combustor," *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, **28**(1), 85-91(2017).
- Choi, J. H., Chang, I. Y., Shun, D. W., Yi, C. K., Son, J. E. and Kim, S. D., "Correlation on the Particle Entrainment Rate in Gas Fluidized Beds," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **38**(6), 2491-2496(1999).
- Wen, C. Y. and Yu, Y. H., "A Generalized Method for Predicting the Minimum Fluidization Velocity," *AIChE J.*, **12**(3), 610-612(1966).
- Ma, X. X. and Kato, K., "Effect of Interparticle Adhesion Forces on Elutriation of Fine Powders from a Fluidized Bed of a Binary Particle Mixture," *Powder Technol.*, **95**(2), 93-101(1998).
- Li, J. and Kato, K., "A Correlation of Elutriation Rate Constant for Adhesion Particles (Group C Particles)," *Powder Technol.*, **118**(3), 209-218(2001).