

기체유동층에서 슬러그 특성

1. 최소슬러그속도와 슬러그 빈도

류호정 · 최정후^{*†} · 김상돈^{**} · 손재익

한국에너지기술연구원

^{*}건국대학교 화학공학과

^{**}한국과학기술원 화학공학과 및 에너지환경연구센터

(2001년 3월 31일 접수, 2001년 7월 30일 채택)

Slug Characteristics in Gas Fluidized Beds

1. Minimum Slugging Velocity and Slug Frequency

Ho-Jung Ryu, Jeong-Hoo Choi^{*†}, Sang-Don Kim^{**} and Jae-Ek Son

Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

^{*}Department of Chemical Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

^{**}Department of Chemical Engineering and Energy & Environment Research Center, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

(Received 31 March 2001; accepted 30 July 2001)

요 약

기체유동층에서 슬러그 특성에 미치는 유속, 측정높이, 최소유동화상태의 층높이, 층직경, 입자특성의 영향을 고찰하기 위해 2개의 유동층(유동층 A: 내경 0.055 m, 높이 2.0 m, 유동층 B: 내경 0.1 m, 높이 2.5 m)에서 충물질로 모래(평균입경 0.286 mm)와 FCC(A: 평균입경 0.082 mm, B: 0.091 mm)를 사용하여 유속, 측정높이, 최소유동화상태의 층높이, 층직경 및 입자특성의 변화에 따른 슬러그 특성을 측정하였다. 측정된 최소슬러그속도는 측정높이가 증가함에 따라 감소하였으며 최소유동화상태의 층높이와 층직경이 증가함에 따라 증가하였다. 최소슬러그속도에 대한 입자특성의 영향은 층직경에 따라 다르게 나타났다. 층직경이 작은 경우에는 모래입자의 최소슬러그속도가 FCC에 비해 크게 나타났으나 층직경이 큰 경우에는 FCC의 최소슬러그속도가 모래에 비해 크게 나타났다. 슬러그 빈도는 유속이 증가함에 따라 감소하였으나 유속이 증가함에 따라 감소 경향이 둔화되었으며 측정높이와 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 감소하였고 층직경이 증가함에 따라 증가하였다. 슬러그 빈도에 미치는 측정높이의 영향은 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 감소하였다. 주어진 과잉기체유속에서 FCC 입자의 슬러그 빈도가 모래 입자에 비해 크게 나타났다.

Abstract – In order to understand the slugging regime comprehensively, the characteristics of slugging have been studied experimentally in gas fluidized beds. The onset velocity of slugging and the properties of slug were measured in gas fluidized beds (bed A: 0.055 m i.d., 2.0 m height, bed B: 0.1 m i.d. and 2.5 m height) using sand (specific surface mean diameter: 0.286 mm) and FCC (FCC A, specific surface mean diameter: 0.082 mm, FCC B, specific surface mean diameter: 0.091 mm) as bed materials with variations of gas velocity, height from the distributor plate, bed height at minimum fluidization, column diameter and particle properties. The minimum slugging velocity decreased with increasing height from the distributor plate, however, increased with increasing bed height at minimum fluidization and column diameter. However, the effect of particle properties was found to be dependent on the column diameter. The minimum slugging velocity of sand was higher than that of FCC in the column of 0.055 m inside diameter, however, that of FCC higher than that of sand in the column of 0.10 m inside diameter. The slug frequency decreased with increasing gas velocity, height from the distributor plate and bed height at minimum fluidization, however, increased with column diameter. The effect of gas velocity on slug frequency diminished as gas velocity increased. The effect of height from the distributor plate on slug properties decreased as the bed height at minimum fluidization increased. The slug frequency of FCC was higher than that of sand at the same excess gas velocity.

Key words: Gas-Solid Fluidization, Minimum Slugging Velocity, Slug Frequency

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: choijhoo@kkucc.konkuk.ac.kr

1. 서 론

일반적으로 고체층의 높이가 높고, 층직경이 작은 기체유동층의 경우 분산판에서 생성된 기포가 상승하면서 합체되어 기포의 직경이 층직경에 상당할 정도로 커지게 되면 슬러그(slug)가 형성된다. 슬러그의 형태는 입자 종류에 따라 다르게 나타나는데 입자크기와 입자밀도가 작은 입자의 경우에는 대칭형의 axial slug가 형성되며, 입자크기와 입자밀도가 큰 입자의 경우와 유속이 높은 경우에는 wall slug나 flat slug가 형성된다[1]. 슬러그 형태에 대한 다른 구분은 round-nose slug와 square-nose slug로 나눌 수 있으며 round-nose slug는 고운 입자계의 경우로 슬러그 상부의 고체들이 슬러그 주위의 유동층 벽쪽으로 흘러내리며, 슬러그 길이를 측정할 수 있고, 슬러그 상승속도가 유속보다 크게 나타나는 특성이 있다. 한편 square-nose slug는 굵은 입자계의 경우로 슬러그 상부의 고체들이 슬러그 내부를 통해 흘러내리며, 슬러그 길이의 측정이 어렵고, 슬러그 상승속도가 유속보다 작게 나타나는 특성이 있다[2].

슬러깅 영역에서는 기포유동층에 비해 층의 혼합효과 및 기체-고체 접촉효율이 저하되며, 슬러그가 층을 통과하면서 일어나는 압력요동에 의해 기계적인 충격이 가해지므로 유동층의 적절한 조업과 유지관리를 위해서는 슬러그 특성에 대한 이해가 필요하다. 특히 기초실험 단계에서 수행되는 실험실 규모(lab-scale)의 유동층에서는 슬러깅 현상이 일어나는 경우가 많으며, 이와 같은 경우에 슬러깅에 대한 기본적인 이해가 부족한 상태에서 얻어진 실험자료를 상업적 규모의 유동층 장치에 그대로 적용하기에는 무리가 있다.

슬러깅 영역에서 슬러그의 흐름특성은 기체체류시간, 열 및 물질전달, 고체접촉효율 등을 지배하는 중요한 인자로서 지금까지 오랜 기간동안 연구가 진행되어 왔으나 슬러깅영역의 복잡한 흐름특성과 실험방법의

제한 등으로 인해 다른 흐름영역에 비해 실험자료가 적은 실정이며 몇 가지 변수들의 영향에 대해서는 보고자들마다 서로 다른 결과가 제시되거나 그 영향에 대한 충분한 이해와 해석이 부족한 실정이다[3]. 슬러깅 영역에서 슬러그의 흐름특성을 나타낼 수 있는 특성값으로는 최소슬러깅속도(minimum slugging velocity), 슬러그 길이(slug length), 슬러그 빈도(slug frequency), 슬러그 상승속도(slug rising velocity) 등을 들 수 있다.

본 연구에서는 슬러그특성에 미치는 유속, 층정높이, 최소유동화상태의 층높이, 층직경 및 입자특성에 대한 영향을 측정 및 고찰하였으며 본 논문에서는 슬러그 특성 중에서 최소슬러깅속도와 슬러그 빈도에 대해 중점적으로 고려하고자 한다.

최소슬러깅속도와 관련하여 최근에 Ryu 등[4]은 최소슬러깅속도에 대한 최소유동화상태의 층높이와 분산판으로부터의 높이 영향에 대해 측정 및 고찰하였으며, 최소슬러깅속도에 대한 기존 연구들을 정리, 비교하였다. 또한 최소슬러깅속도를 예측하기 위한 기존 상관식들을 정리하여 각 상관식들이 예측할 수 있는 변수의 영향을 비교하고 그들의 실험결과 및 기존의 실험결과를 이용하여 각 상관식이 여러 실험변수들을 예측할 수 있는지의 여부를 검토하였으며 정확성을 비교하였다. Ryu 등[4]은 기존의 상관식들에서 고려되지 않았던 변수들의 영향을 종합적으로 고려하기 위해 Choi 등[5]의 기포크기 상관식을 이용하고, Geldart [6]의 보고를 기반으로 기포크기가 층직경의 0.6배에 해당할 때의 유속을 최소슬러깅속도로 고려하여 최소슬러깅속도 모델을 제시하였다. 본 연구에서는 최소슬러깅속도에 대해 Ryu 등[4]의 보고에서 고려되지 않았던 변수들(층직경, 입자특성)의 영향을 측정 및 고찰하고, Ryu 등[4]의 보고에 나타난 층정높이 및 최소유동화상태의 층높이 영향이 Geldart 분류 A 입자계에도 적용되는지 확인하고자 하였다.

Table 1. Factors influencing on the slug frequency

Variable increased		Effect on f_s	Source
Bed geometry	Bed diameter(D_b)	Decrease	Baeyens and Geldart[7]
		Increase	Verloop and Heertjes[8] Noordergraaf et al.[2] Luca et al.[9] Lee[10]
Particle properties	Distance above distributor(H)	Initial decrease and independent thereafter	Nakamura et al.[11]
		Negligible below H_{mf}	Noordergraaf et al.[2]
	Mean particle diameter(\bar{d}_p)	Negligible	Baeyens and Geldart[7]
		Increase	Satija and Fan[12]
Operating condition	Sphericity of particles(ϕ_s)	Negligible	Baeyens and Geldart[7]
		Decrease	DiMattia et al.[13]
	Superficial gas velocity(U)	Initial decrease and independent thereafter	Baker and Geldart[14]
		Decrease	Verloop and Heertjes[8] Noordergraaf et al.[2] Luca et al.[9] Lee[10]
		Negligible	Baeyens and Geldart[7] DiMattia et al.[13]
		Initial decrease and independent thereafter	Baeyens and Geldart[7]
	Static bed height(H_s) or bed height at minimum fluidization(H_{mf})	Decrease	Verloop and Heertjes[8] Baker and Geldart[14] Nakamura et al.[11] Thiel and Potter[15] Satija and Fan[12] Noordergraaf et al.[2] Luca et al.[9] DiMattia et al.[13] Lee[10]

슬러그 빈도에 대해 살펴보면 지금까지 적지 않은 연구가 진행되어 왔으나 몇몇 변수들의 영향에 대해서는 연구자들마다 서로 다른 결과가 제시된 바 있으며 각 변수의 영향에 대한 일반화된 해석이 미흡한 실정이다. Table 1은 슬러그 빈도에 영향을 미치는 여러 가지 인자들에 대한 기존의 연구를 요약하여 나타내고 있다. 기존 보고들에 의하면 슬러그 빈도에 대한 증직경의 영향은 보고자들에 따라 서로 다른 경향을 나타내었는데 Baeyens와 Geldart[7]는 증직경이 증가함에 따라 슬러그 빈도가 감소하는 것으로 보고한 반면 Verloop와 Heertjes[8], Noordergraaf 등[2], Luca 등[9], Lee[10]는 증가하는 것으로 보고하였다. Baeyens와 Geldart[7]의 보고에서는 최소슬러그속도 이상에서 슬러그 빈도가 유속의 영향을 받지 않는 것으로 고려하고 최소슬러그속도에서의 슬러그 빈도가 증직경이 증가함에 따라 감소하는 것으로 보고하였다. 하지만 그들의 실험결과는 증직경 증가에 따른 최소슬러그속도의 증가(유속의 증가) 영향을 포함하고 있으므로 동일한 유속에서 실험된 결과가 아니다. 그들의 결과는 증직경의 영향 보다는 유속증가에 따른 슬러그 빈도의 감소경향을 함께 나타내는 것으로 사료되었다. 결과적으로 슬러그 빈도는 증직경이 증가함에 따라 증가하는 것으로 고려하는 것이 타당한 것으로 사료되었다.

슬러그 빈도에 미치는 측정높이(분산판으로부터의 높이)의 영향에 대해서 Nakamura 등[11]은 측정 높이가 증가함에 따라 슬러그 빈도가 감소한 후 일정해지는 것으로 보고하였으며 Noordergraaf 등[2]은 최소유동화상태의 층높이 이하에서는 측정높이 변화에 따른 슬러그 빈도의 변화가 없는 것으로 보고하였다.

슬러그 빈도에 미치는 입자크기의 영향으로 Baeyens와 Geldart[7]는 입자크기의 영향이 없는 것으로 보고한 반면 Satija와 Fan[12]은 입자크기가 증가함에 따라 슬러그 빈도가 증가하는 것으로 보고하였다.

슬러그 빈도에 대한 입자구형도의 영향에 대해 Baeyens와 Geldart[7]는 입자구형도 변화가 슬러그 빈도에 영향을 미치지 않는 것으로 보고한 반면 DiMattia 등[13]은 입자구형도가 증가함에 따라 슬러그 빈도가 감소하는 것으로 보고하였다.

슬러그 빈도에 미치는 유속의 영향에 대해 Baker와 Geldart[14]는 유속이 증가함에 따라 슬러그 빈도가 감소한 후 일정해 지는 것으로 보고하였고 Verloop와 Heertjes[8], Noordergraaf 등[2], Luca 등[9], Lee[10]는 유속이 증가함에 따라 감소하는 것으로 보고한 반면 Baeyens와 Geldart[7], DiMattia 등[13]은 슬러그 빈도에 미치는 유속의 영향이 없는 것으로 보고하였다. 그러나 Baeyens와 Geldart[7], DiMattia 등[13]의 보고에서 고려된 유속범위는 최소슬러그속도 부근이기 때문에(Baeyens and Geldart[7]: $1-1.39 U/U_{ms}$, DiMattia 등[13]: $1-1.05 U/U_{ms}$) 유속변화에 따른 슬러그 빈도의 변화가 적은 것으로 사료되었다. 또한 유속증가에 따라 슬러그 빈도가 감소한 후 일정해 진다는 보고들과 단조 감소한다는 보고들을 비교해 보면 단조 감소한다는 보고들은 비교적 유속변화범위가 작은 경우이며 유속증가에 따라 슬러그 빈도가 감소한 후 일정해 진다는 보고는 비교적 유속변화범위가 큰 경우였다. 결과적으로 슬러그 빈도에 미치는 유속의 영향은 낮은 유속에서는 슬러그 빈도가 감소하고 유속이 증가함에 따라 슬러그 빈도의 감소경향이 둔화되는 것이 일반적인 것으로 사료되었다.

슬러그 빈도에 미치는 고정층높이(또는 최소유동화상태의 층높이)의 영향에 대해 Baeyens와 Geldart[7]는 고정층높이가 증가함에 따라 감소한 후 일정해 지는 것으로 보고하였으며 Verloop와 Heertjes[8], Baker와 Geldart[14], Nakamura 등[11], Thiel과 Potter[15], Satija와 Fan[12], Noordergraaf 등[2], Luca 등[9], Dimattia 등[13], Lee[10]는 감소하는 것으로 보고하였다. 한편 Baeyens와 Geldart[7]의 경우에는 슬러그 빈도를 분산판 바로 윗부분에서 절대압의 압력요동(absolute pressure fluctuation)에 의해 측정하였는데, 이러한 실험방법에 의하면 층의 압력요동이 층표면에서의 기포 또는 슬러그의 파괴에 직접적인 영향을 받게 되며, 그들의

보고에서도 층표면에서 시각적으로 관찰한 슬러그 빈도와 압력요동에 의해 측정된 슬러그 빈도가 같은 것으로 나타났다. 따라서 그들의 보고에서 실험변수로 고려된 최소유동화상태의 층높이 변화는 실제로는 팽창층높이가 변하는 효과를 나타내게 되며 절대압 값은 층표면의 값을 나타내므로 슬러그 빈도에 미치는 최소유동화상태의 층높이 영향으로 고려하기보다는 측정높이의 변화로 고려하는 것이 합리적이다. 이와 같이 Baeyens와 Geldart[7]의 실험결과를 슬러그 빈도에 대한 측정높이의 영향으로 고려하면 Nakamura 등[11]의 보고와 유사한 경향을 나타낸다. 슬러그 빈도에 대한 기존의 연구들을 종합적으로 재고하면 슬러그 빈도에 영향을 미치는 인자들에 대한 기존의 보고들은 증직경의 영향에 대해 서로 다른 결과가 제시되었으며 측정높이(분산판으로부터의 높이), 입자크기, 입자의 구형도, 유속 등의 영향에 대해서는 각 변수들의 변화에 의해 슬러그 빈도가 증가하거나 감소한다는 보고와 함께 각 변수들이 슬러그 빈도에 크게 영향을 미치지 못한다는 결과가 함께 보고되어 있어서 각 변수들의 영향을 일반화하여 고려하기 어려운 실정이며 실험결과도 제한적이어서 추가적인 실험자료의 확보와 함께 각 변수의 영향에 대한 일반화된 해석이 필요한 실정이다.

Table 2는 슬러그 빈도를 예측하기 위해 제시된 기존의 상관식들을 요약하여 나타내고 있다. 슬러그 빈도에 대한 기존의 상관식들은 대부분이 기존의 실험자료를 바탕으로 제시된 실험적인 상관식이며 기존의 상관식들 중에서 Baeyens와 Geldart[7], Verloop와 Heertjes[8]의 상관식은 최소슬러그속도 이상의 유속에서 슬러그 빈도가 일정한 것으로 고려하여 제시된 상관식으로 유속의 영향이 포함되어 있지 않다. 한편 DiMattia 등[13]은 슬러그 빈도에 미치는 입자의 구형도와 고정층 높이의 영향에 대해서만 고려하여 상관식을 제시하였다.

슬러그 빈도에 대한 기존 상관식들을 종합적으로 재고하면 입자특성의 영향은 최소유동화속도의 항으로 고려할 수 있으므로 유속, 최소유동화속도, 증직경, 최소유동화상태의 층높이를 변수로 고려한 Luca 등[9], Lee[10]의 상관식이 비교적 여러 변수들의 영향을 나타낼 수 있는 것으로 사료되었으나 분산판으로부터의 높이영향에 대해서는 예측할 수 없는 단점이 있으며 상관식의 정확성에 대해서는 실험결과와의 비교를 통한 검토가 필요하다.

본 연구에서는 최소슬러그속도에 영향을 미치는 여러 변수 중에서 Ryu 등[4]의 보고에 나타난 최소유동화상태의 층높이와 측정높이의 영향을 Geldart 분류 A 입자계에 대해 다시 확인하고 Ryu 등[4]의 보고에서 고려되지 않은 실험변수인 증직경 및 입자특성을 추가로 고려하여 최소슬러그속도에 미치는 각 변수의 영향을 일반화하고자 하였다. 또한 슬러그 빈도에 대해서는 기존 보고들에서 서로 상반된 결과가 제시되었거나(증직경의 영향) 실험자료가 부족한(분산판으로부터의 높이 영향) 변수들 및 유속, 최소유동화상태의 층높이, 입자특성 등의 영향을 확인하고 기존 상관식과의 비교를 통하여 각 변수 영향의 예측 가능성과 정확성을 비교, 검토하고자 하였다. 이를 위해 2개의 유동층(유동층 A: 내경 0.055 m, 높이 2.0 m, 유동층 B: 내경 0.1 m, 높이 2.5 m)에서 충물질로 모래와 FCC를 사용하여 유속, 측정높이, 최소유동화상태의 층높이, 증직경 및 입자특성의 변화에 따른 최소슬러그속도와 슬러그 빈도의 변화를 측정 및 관찰하였다.

2. 실험

Fig. 1은 본 실험에 사용된 2개의 유동층 실험장치를 나타내고 있다. 유동층 A는 내경 0.055 m, 높이 2.0 m의 스테인레스 스틸(SUS 304)로 제작되었고 분배기(distributor)는 직경 2 mm의 구멍이 사각피치(rectangular pitch)로 52개 뚫려있는 개구비(open area percent) 6.8%의 다공판(perforated plate)을 사용하였으며 유동화기체는 plenum(SUS 304)에 위치한 수평관(25 mm I.D.)으로 주입되도록 하였다. 원하는 측정높

Table 2. Summary of correlations on the slug frequency

Authors	Experimental technique	Correlations	Considered parameters						
			U_{mf}	U	d_p	ϕ_s	D_t	$H_{mf}(H_s)$	H
Baeyens and Geldart[7]	DPT & visual observation	$f_s = \frac{0.35 g^{0.5}}{k D_t^{0.5}} k = \frac{9.38}{D_t^{0.357}}$ (in CGS unit)					*		
Verloop and Heertjes[8]	DPT	$f_s = \frac{0.35 \sqrt{g D_t}}{H_{mf}}$					*	*	
Nakamura et al.[11]		for $H < 120$ cm $f_s = 27.0(U - U_{mf})^{-0.43} H^{-0.60}$ for $H > 120$ cm $f_s = 1.5(U - U_{mf})^{-0.43}$	*	*					*
Satija and Fan[12]	DPT	for 1.00 mm glass beads, $(U - U_{mf}) < 2$ m/s $f_s = 4.75 \left[\frac{1}{(U - U_{mf})^{0.5} H_{mf}} \right]^{0.5}$ for $d_p > 2.32$ mm $f_s = 100 \left[\frac{d_p}{(U - U_{mf}) H_{mf}} \right]^{0.5}$	*	*	*			*	
Shichun et al.[3]	Optical fiber	$f_s = 0.533(U - U_{mf})^{-0.152}$ (in CGS unit)	*	*					
Noordergraaf et al.[2]	APT	$f_s = 0.32 U^{-0.15} H_s^{-1.0}$	*					*	
Luca et al.[9]	Video camera	$\frac{f_s H_{mf}}{U - U_{mf}} = 0.17 \left[\frac{g D_t}{(U - U_{mf})^2} \right]^{2/3} + 0.1$	*	*			*	*	
DiMattia et al.[13]	DPT	$f_s = \frac{0.515 - \phi_s - 0.517 \phi_s^2 - 0.65 H_t}{0.13}$				*		*	
Lee[10]	DPT	$\frac{f_s H_{mf}}{U - U_{mf}} = 0.80 \left[\frac{g D_t}{(U - U_{mf})^2} \right] + 0.07$	*	*			*	*	

DPT: differential pressure transducer, APT: absolute pressure transducer

이에서 압력요동 신호를 측정하기 위해 분산판으로부터 16개(-0.038, 0.025, 0.125, 0.225, 0.325, 0.425, 0.525, 0.625, 0.725, 0.925, 1.025, 1.125, 1.275, 1.425, 1.625, 1.945 m)의 압력측정점을 두고 압력변환기와 연결하였다. 기체출구(0.05 m I.D.)는 분산판으로부터 1.95 m 높이에 위치하며 사이클론과 백필터(상업용 Nomex filter)를 거쳐서 대기로 배출되도록 하였다. 유동층 B는 내경 0.1 m, 높이 2.5 m의 아크릴판으로 제작되었고 분배기(distributor)는 multi-tuyere 형으로 직경 20 mm tuyere 4개에 각각 3 mm hole 12개를 배치하였으며 유동화기체는 plenum(SUS 304)에 위치한 수평관(32 mm I.D.)으로 주입되도록 하였다. 원하는 측정높이에서 압력요동 신호를 측정하기 위해 분산판으로부터 34개(-0.04, 0.03, 0.075, 0.10, 0.125, 0.15, 0.175, 0.20, 0.225, 0.25, 0.275, 0.30, 0.325, 0.35, 0.375, 0.40, 0.425, 0.45, 0.475, 0.50, 0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 1.00, 1.05, 1.20, 1.30, 1.40, 1.50, 2.05, 2.35 m)의 압력측정점을 두고 압력변환기와 연결하였다. 기체출구(0.05 m I.D.)는 분산판으로부터 2.45 m 높이에 위치하며, 기체는 1, 2차 사이클론(표준비율, 각각의 내경은 0.15, 0.1 m)과 백필터(상업용 Nomex filter)를 거쳐서 대기로 배출되도록 하였다. 두 개의 유동층 모두 유동화 기체로는 공기가 사용되었으며 가스미터로 보정한 유량계 또는 질량유량계(mass flow meter, Brooks Instrument Co., Model 5863, 0-1,000 l/min, 0-5 V output)로 정량되어 유동층에 공급되었다.

충물질로는 FCC(평균입경 0.082, 0.091 mm)와 모래(평균입경 0.286 mm) 입자를 사용하였으며 충물질의 물성과 대표적인 입도분포는 Table 3에 나타나 있다.

최소유동화속도는 고정층에서부터 유속을 증가시키면서 층의 압력강하(bed pressure drop) 및 압력요동(pressure fluctuation)을 측정하였다. 최소유동화속도는 층의 압력강하가 일정해지기 시작하는 유속으로 결정하였으며 층의 압력요동신호에 의해 계산된 평균진폭(mean amplitude), 표준편차(standard deviation) 및 정규화된 표준편차(normalized standard deviation)에 의해 결정된 값과 비교하였다.

최소슬러그속도와 슬러그빈도를 측정하기 위해 먼저 입도분포와 무게가 측정된 충물질을 실험조건의 최소유동화상태의 층높이(0.85, 0.95, 1.05, 1.15, 1.25 m)로 유동층에 채웠으며 유량조절밸브와 유량계 또는 질량유량계로 일정 유량의 공기를 공급하였다. 유동층의 압력분포가 안정되어 주기적인 경향을 나타낼 때를 정상상태로 간주하였으며, 투명한 아크릴로 제작된 직경 0.1 m의 유동층 B에서 층내 수력학적특성을 시각적으로 관찰하였다. 정상상태에서 각 압력점에서의 압력신호는 압력변환기(차압형, validyne, P24D Model)를 사용하여 전압(± 5 V)-시간 신호로 바꾸어 자료수집계(data acquisition system, Real time devices Inc., AD2110 Model)를 거쳐서 PC에 저장하였다. 각 실험조건에서 압력신호는 100 Hz의 주파수로 10,000개를 수집하였다.

실험변수로 슬러그 특성치에 대한 층직경의 영향을 고려하기 위해 서로 다른 층직경(0.055, 0.10 m)을 갖는 2개의 유동층을 사용하였으며 유속의 영향을 고려하기 위해 FCC 입자에 대해서는 0.01-0.45 m/s, 모래 입자에 대해서는 0.108-0.45 m/s로 유속을 변화시켰고 측정지점의 높이(평균높이 0.36-0.93 m)와 최소유동화상태의 층높이(0.85, 0.95, 1.05, 1.15, 1.25 m)의 영향도 고찰하였다. 또한 입자특성 변화에 따른 최소슬

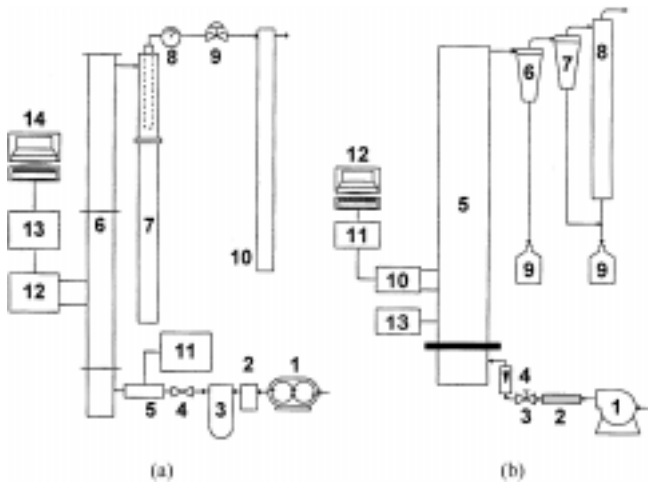


Fig. 1. Schematic diagram of fluidized beds.

(a) Fluidized bed A (0.055 m I.D., 2.0 m height)

1. Air compressor
2. Filter
3. Pressure regulator
4. Valve
5. Mass flowmeter
6. Fluidized bed
7. Cyclone
8. Pressure gauge
9. Let-down valve
10. Bag filter
11. Data logger
12. Differential pressure transducer
13. A/D converter
14. Personal computer

(b) Fluidized bed B (0.10m I.D., 2.5 m height)

1. Air compressor
2. Filter
3. Pressure regulator
4. Flowmeter
5. Fluidized bed
6. Cyclone 1
7. Cyclone 2
8. Bagfilter
9. Sample pot
10. Differential pressure transducer
11. A/D converter
12. Personal computer
13. Data logger

러깅속도와 슬러그 빈도의 변화를 고려하기 위해 서로 다른 입자계에 속하는 FCC(Geldart 분류 A 및 AB)와 모래(Geldart 분류 B) 입자를 사용하였다. 최소슬러깅속도와 슬러그 빈도 측정을 위한 실험조건 및 실험변수를 요약하면 Table 4 및 5와 같다.

각 실험조건에서 상부와 하부에 위치한 압력점에서 동시에 측정된 차압 압력신호는 기준값(reference value)을 기준으로 조밀상(emulsion phase)과 기포상(bubble phase)으로 나뉘며[4], 프로그램을 사용하여 smoothing을 해 주었다. Smoothing을 거친 신호를 이용하여 상부와 하부 압력점에서 sampling time 동안 기포상에 속하는 신호의 개수를 측정하여 아래의 식 (1)에 의해 기포 또는 슬러그빈도(bubble or slug frequency)를 계산하였으며, 식 (2)와 같이 상부와 하부의 차압형 압력변환기에서 측정된 기포 또는 슬러그빈도($f_{s,u}$, $f_{s,l}$)의 평균값을 계산하여 두 개의 압력점 중 한곳만 통과했을 경우에도 1/2개로 취급되도록 하였다.

$$f_{s,l} \text{ or } f_{s,u} = \frac{\text{No of bubble or slug phase signal}}{\text{sampling time}} \quad (1)$$

$$f_s = \frac{f_{s,u} + f_{s,l}}{2} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 최소유동화속도

최소유동화속도는 유속변화에 따라 층의 압력강하를 도시하여 측정하는 방법과 압력요동신호의 분석(평균 진폭, 표준편차, 정규화된 표준편차)을 통해 결정하는 방법[16]이 있으며 본 연구에서는 두 방법을 모두 사용하였는데, 결과는 동일한 것으로 나타났다. Fig. 2는 모래와 FCC B(0.091 mm) 입자에 대해 최소유동화상태의 층높이 변화에 따라 측정된 최소유동화속도의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 두 입자 모두에 대해 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 최소유동화속도가 증가하였으며 Cranfield와 Geldart[17]의 보고와 유사하였다. 이와 같은 경향은 고정층의 무게가 증가하여 아래쪽으로 작용하는 하강력이 증가하기 때문으로, Ho 등[18]의 보고와 유사하게 해석될 수 있다. 평균입径 0.082 mm의 FCC A 입자의 경우 최소유동화상태의 층높이 0.85 m에서 측정된 최소유동화속도는 0.0052 m/s였다.

3-2. 최소슬러깅속도

3-2-1. 최소슬러깅속도의 결정

본 연구에서 기포유동층에서 슬러깅영역으로 전이되는 유속인 최소슬러깅속도는 Ryu 등[4]의 보고에 나타난 바와 같이 유속변화에 따른

Table 3. Properties and size distribution of bed materials

Properties	Bed materials		
	FCC A(fresh)	FCC B(spent)	Sand
Mean particle diameter[mm]	0.082	0.091	0.286
Apparent density[kg/m ³]	1600	2083	2561
Bulk density[kg/m ³]	847	802	1313
Void fraction in bed at minimum fluidizing condition[-]	0.47	0.62	0.49
Sphericity of particles[-]	0.87	0.57	0.86
Geldart classification	A	AB	B
Size distribution			
Sieve size	Weight fraction[-]		
-600+425	-	-	0.150
-425+300	-	-	0.432
-300+212	0.002	-	0.302
-212+150	0.026	-	0.065
-150+106	0.246	-	0.034
-106+75	0.493	1.000	0.015
-75+53	0.184	-	0.002
-53+0	0.049	-	0.000

Table 4. Fluidized beds specification and operating conditions for the measurement of minimum slugging velocity

Fluidized bed			Particle properties			Operating conditions	
Notation	D_t [m]	H_t [m]	Particle	d_p [mm]	ρ_p [kg/m ³]	H_{mf} [m]	H_{mea} [m]
A	0.055	2.0	FCC A	0.082	1600	0.85	0.38, 0.58
			Sand	0.286	2561	0.85	0.38, 0.58
B	0.10	2.5	FCC A	0.082	1600	0.85	0.43, 0.60
			FCC B	0.091	2083	0.95, 1.05, 1.15, 1.25	0.83

Table 5. Fluidized beds specification and operating conditions for the measurement of slug frequency

Fluidized bed			Particle properties			Operating conditions		
Notation	D_t [m]	H_t [m]	Particle	d_p [mm]	ρ_p [kg/m ³]	U [m/s]	H_{mf} [m]	H_{mea} [m]
A	0.055	2.0	FCC A	0.082	1600	0.01-0.45	0.85	0.38, 0.58
			Sand	0.286	2561	0.108-0.45	0.85	0.38, 0.58
B	0.10	2.5	FCC A	0.082	1600	0.01-0.45	0.85	0.43, 0.60
						0.108-0.45	0.85	0.36, 0.46
							0.95	0.36, 0.46, 0.83
							1.05	0.36, 0.46, 0.83, 0.93
							1.15	0.36, 0.46, 0.83, 0.93
							1.25	0.36, 0.46, 0.83, 0.93

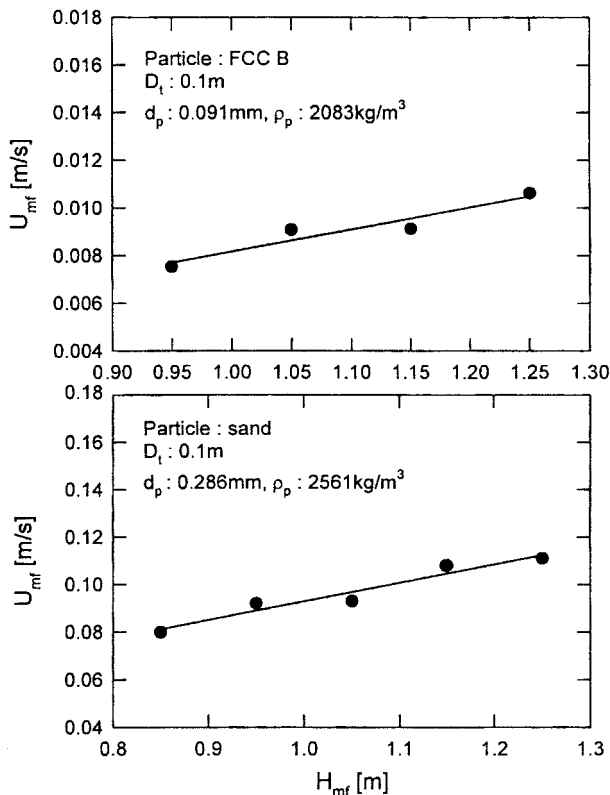


Fig. 2. Minimum fluidization velocity versus bed height at minimum fluidization state.

기포 또는 슬러그빈도의 변화를 이용하여 결정하였다. Ryu 등[4]은 기포유동층 영역에서는 유속이 증가함에 따라(과잉공기량이 증가함에 따라) 기포 빈도가 증가하고, 계속적으로 유속이 증가하면 기포의 합체가 활발히 일어나 슬러그가 형성되며, 슬러그 영역에서는 유속이 증가함에 따라 슬러그의 합체에 의한 크기증가로 인해 슬러그 빈도가 감소하므로 최소슬러그속도에서 기포 또는 슬러그 빈도가 최대값을 나타낸다고 보고한 바 있다. Fig. 3(a)는 본 연구에서 측정된 기포 또는 슬러그 빈도

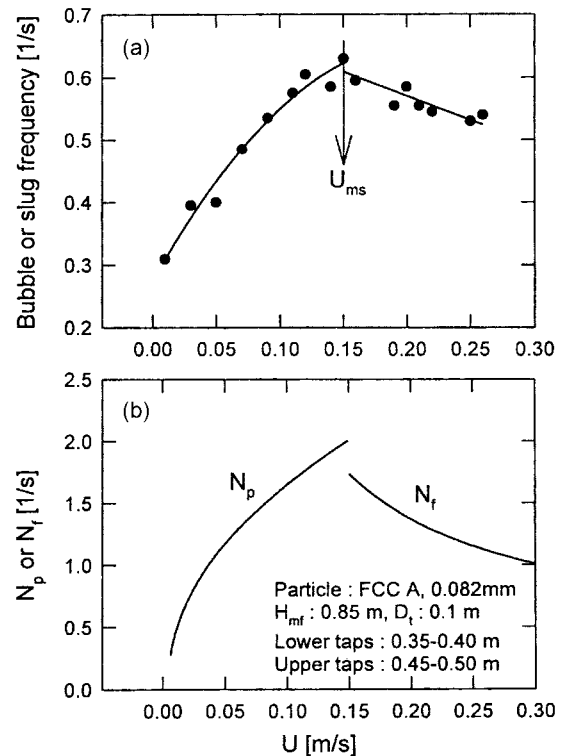


Fig. 3. Measured bubble or slug frequency versus gas velocity and calculated values by Choi et al.[5] equation.

(a) Determination of minimum slugging velocity, and (b) Variation of point bubble frequency and/or number-based bubble frequency with gas velocity

중 대표적으로 평균입경 0.082 mm의 FCC A 입자를 충물질로 사용하여 층직경 0.1 m, 최소유동화상태의 층높이 0.85 m, 측정높이 0.43 m(평균높이)에서 측정된 기포 또는 슬러그빈도를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 낮은 유속에서는 유속이 증가함에 따라 기포 또는 슬러그 빈도가 증가하였으나 유속이 계속적으로 증가하면 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 Ryu 등[4]의 보고와 마찬가지로 기

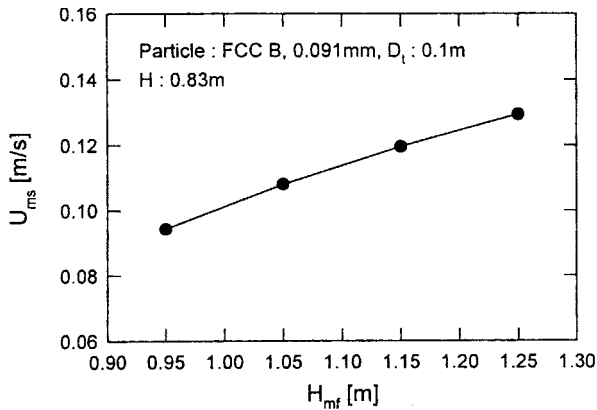


Fig. 4. Minimum slugging velocity versus bed height at minimum fluidization.

포 또는 슬러그 빈도가 최대값을 나타내는 유속을 최소슬러깅속도로 결정하였다. Fig. 3(b)는 유속변화에 따라 Choi 등[5]의 식으로 계산된 기포와 슬러그 빈도의 변화를 나타내고 있다. Choi 등[5]은 기포크기 상관식에 대한 보고에서 한 점을 통과하는 기포빈도(point bubble frequency, N_p)와 단위면적을 통과하는 기포빈도(number-based bubble frequency, N_b)에 대해 고려하였다. 최소슬러깅 상태를 기포유동층 영역의 연장으로 고려하면, 기포유동층 영역에서 각 측정점에서의 기포빈도는 N_p 로 표현 가능하며 슬러깅 영역에서는 유동층의 단면을 한 개의 슬러그가 통과하므로 슬러그 빈도는 N_b 로 고려할 수 있으며 N_p 와 N_b 가 같아지게 된다. Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 기포유동층 영역에서 N_p 는 유속이 증가함에 따라 증가하는 반면 슬러깅 영역에서 N_b 는 유속이 증가함에 따라 감소하였으며 본 연구에서 측정된 기포 또는 슬러그 빈도의 변화 경향과 유사하였다.

3-2-2. 최소슬러깅속도: 최소유동화상태의 층높이 영향

Fig. 4는 FCC B(평균입경 0.091 mm)입자에 대해 최소유동화상태의 층높이 변화에 따라 측정된 최소슬러깅속도의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 측정된 최소슬러깅속도는 Leva 등[19], Ryu 등[4]의 보고와 마찬가지로 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 증가하였는데, 이와 같은 경향은 Ryu 등[4]이 해석한 바와 같이 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 최소유동화속도가 증가하므로 슬러그를 형성하기 위해 필요한 과잉공기유속이 증가하며, 슬러그 상부의 고체무게가 증가하고 측정높이 상부에 존재하는 고체가 증벽과 접촉하는 면적이 증가하여 전단력이 증가하기 때문에 하강력(고체의 중력과 전단력의 합)에 해당하는 상승력을 얻어서 슬러그가 형성되기 위해서는 더 높은 유속이 필요하기 때문으로 사료되었다.

3-2-3. 최소슬러깅속도: 측정높이, 층직경 및 입자특성의 영향

Fig. 5는 최소유동화상태의 층높이 0.85 m에서 모래와 FCC A(평균입경 0.082 mm)입자에 대해 측정높이(분산판으로부터의 높이)와 층직경의 변화에 따라 측정된 최소슬러깅속도의 변화와 Ryu 등[4]의 실험결과를 함께 나타내고 있다. 측정된 최소슬러깅속도는 Luca 등[9], Ryu 등[4]의 보고와 마찬가지로 분산판으로부터의 높이가 증가함에 따라 감소하였다. 이와 같은 경향은 측정높이가 증가함에 따라 기포크기가 증가하여 층직경에 가까워지므로 더 낮은 유속에서 슬러그가 형성될 수 있기 때문으로 사료되었다. 한편 모래 입자와 FCC A 입자 모두에 대해 층직경이 증가함에 따라 최소슬러깅속도가 증가하는 경향을 나타내었으며 Stewart와 Davidson[20], Baeyens와 Geldart[7], Broadhurst와 Becker[21], Ho 등[18], Agawal[22], Luca 등[9]의 보고와 유사하였다. 이와 같은 경향은 최소슬러깅속도가 기포크기가 층직경에 상당할 정도로 성장한 유속을 의미하며, 층직경이 증가할 경우 층직경에 가까워질 정도로

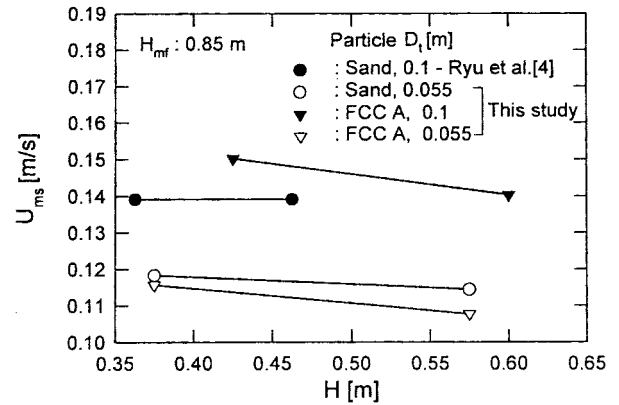


Fig. 5. Minimum slugging velocity versus height from the distributor plate with variation of column diameter and particle properties.

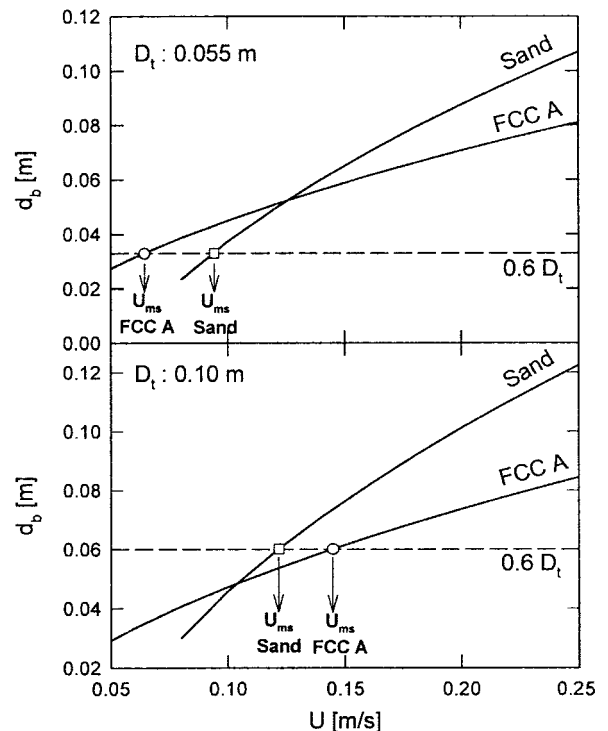


Fig. 6. Bubble size versus gas velocity according to the particle properties($H_{mea}=0.3$ m).

기포크기가 성장하기 위해서는 더 높은 유속이 필요하기 때문으로 사료되었다.

최소슬러깅속도에 대한 입자특성의 영향은 층직경에 따라 다르게 나타났다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 층직경 0.055 m의 경우에는 모래입자의 최소슬러깅속도가 FCC보다 크게 나타났으나 층직경 1.0 m의 경우에는 FCC의 최소슬러깅속도가 모래보다 크게 나타났는데 이와 같은 경향은 Geldart A 입자계에 속하는 FCC와 B 입자계에 속하는 모래입자의 기포특성이 다르기 때문으로 사료된다. Fig. 6은 대표적으로 측정높이가 분산판으로부터 0.3 m일 때 유속변화에 따른 기포크기의 변화를 나타내고 있다. 기포크기의 계산은 기포의 합체와 분쇄효과를 모두 고려한 Choi 등[5]의 상관식을 사용하였다. 일반적으로 고운 입자와 굵은 입자를 비교하면 고운 입자의 최소유동화속도가 작으므로 주어진 기체유속에서 과잉기체속도($U-U_{mf}$)는 고운 입자의 경우가 크게 나타나며 입자특성을 고려하지 않는다면 고운 입자의 기포크기가 굵은 입자의 기

포크기보다 클 것으로 예측될 수 있다. 하지만 Fig. 6에 나타난 바와 같이 고운 입자의 경우 기포의 분쇄효과에 의해 FCC가 모래입자에 비해 유속증가에 따른 기포크기의 증가 기울기가 작게 나타나며 낮은 유속에서는 FCC의 기포크기가 크지만 높은 유속에서는 모래입자의 기포크기가 더 크게 된다. 그림에서는 Ryu 등[4]의 보고와 마찬가지로 기포크기가 충적경의 0.6배에 도달할 때의 유속을 최소슬러깅속도로 고려하여 비교하였다. 그림에 나타난 바와 같이 충적경이 0.055 m일 경우에는 모래입자의 최소슬러깅속도가 크게 나타났으나 충적경이 0.1 m인 경우에는 FCC의 최소슬러깅속도가 크게 나타나며 본 연구의 실험결과와 동일한 경향을 나타내었다. 이와 같은 경향은 충적경이 증가하면 기포크기가 충적경에 가까워질 정도로 성장하기 위해 필요한 유속이 증가하고, 유속이 증가함에 따라 기포의 분쇄효과가 증가하며, 이러한 기포분쇄효과는 Geldart 분류 A 입자계의 경우가 더 큰 영향을 받게 되어 결과적으로 높은 유속에서 FCC의 기포크기가 모래입자에 비해 작기 때문에 최소슬러깅속도가 크게 나타나는 것으로 사료되었다.

3-3. 슬러그 형태 및 슬러깅 영역

본 연구에서 관찰된 슬러그의 형태는 분산관으로부터의 높이와 유속에 따라 다소 다른 형태를 나타내었는데 분산관으로부터의 높이와 유속이 낮은 경우에는 주로 axial slug가 관찰되었으며 분산관으로부터의 높이와 유속이 증가함에 따라 wall slug가 관찰되기도 하였다. 본 연구에서 분산관에서부터 기체출구까지 유동층 전체에 대해 관찰된 분산관으로부터의 높이에 따른 슬러그의 흐름특성 변화는 Baeyens와 Geldart [7]의 보고와 유사하게 층의 아래쪽에는 자유로운 기포유동층 영역(freely bubbling region, zone I)이 존재하였으며 그 위에는 슬러그의 제한적인 합체가 일어나는 영역(zone II), 상부에는 더 이상 슬러그의 합체가 일어나지 않는 영역이 존재하였다. 그들이 제시한 상관식에 의하면 zone I과 zone II의 경계(H_b)는 충적경 0.1 m의 경우에는 0.16 m, 충적경 0.055 m의 경우에는 0.07 m, zone II와 zone III의 경계(H_L)는 충적경 0.1 m의 경우에는 0.90 m, 충적경 0.055 m의 경우에는 0.81 m로 본 연구에서 고려된 측정높이(충적경 0.1 m의 경우: 0.36-0.93 m, 충적경 0.055 m의 경우: 0.38-0.58 m)는 대부분 슬러그의 제한적인 합체가 일어나는 영역으로 사료되었다. 따라서 본 연구의 측정높이 범위에서는 슬러그의 합체에 의해 분산관으로부터의 높이변화에 따라 슬러그특성이 변화하므로 높이변화에 따른 슬러그 특성의 변화를 고찰하기에 적합한 측정높이로 사료되었다.

3-4. 슬러그 빈도

3-4-1. 슬러그 빈도: 유속과 최소유동화상태의 층높이 영향

Fig. 7은 충적경 0.1 m에서 모래 입자에 대하여 평균높이 0.83, 0.93 m에서 유속과 최소유동화상태의 층높이 변화에 따라 측정된 슬러그 빈도의 변화를 나타내고 있다. 측정된 슬러그 빈도는 Verloop와 Heertjes [8], Noordergraaf 등[2], Luca 등[9], Lee[10]의 보고와 마찬가지로 유속이 증가함에 따라 감소하였으며 유속이 더욱 증가하면 감소경향이 둔화되어 Baker와 Geldart[14]의 보고와도 유사한 경향을 나타내었다. 이와 같은 경향은 본 실험의 측정높이가 슬러그의 합체가 일어나는 영역에 속하기 때문에 과잉기체속도($U-U_{mf}$)의 증가가 슬러그의 개수(빈도) 증가보다는 기포 또는 슬러그의 합체에 의한 슬러그 길이 증가에 더 큰 영향을 미치기 때문으로 사료되었다. 즉 유속증가에 따라 슬러그 길이가 증가하므로 상대적으로 슬러그 빈도는 감소하는 것으로 사료되었다. 슬러그 빈도에 미치는 최소유동화상태의 층높이 영향은 Verloop와 Heertjes [8], Baker와 Geldart[14], Nakamura 등[11], Thiel과 Potter[15], Satija와 Fan[12], Noordergraaf 등[2], Luca 등[9], DiMattia 등[13], Lee[10]의 보고와 마찬가지로 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 감소하였다. 이와 같은 경향은 슬러그 길이와 슬러그 빈도와와의 관계를 이용하여 해

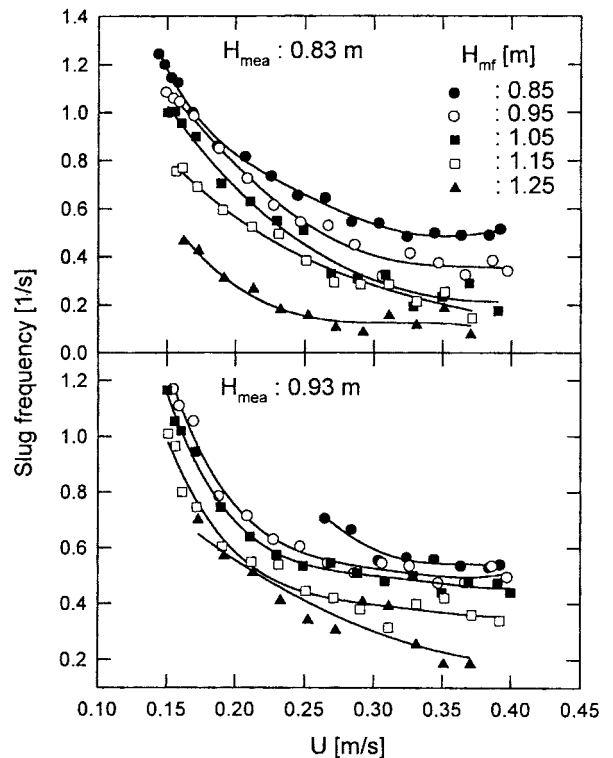


Fig. 7. Slug frequency versus gas velocity and bed height at minimum fluidization state(D_t : 0.1 m, sand).

석할 수 있다. 주어진 과잉기체속도($U-U_{mf}$)에서 최소유동화상태의 층높이가 증가하면 슬러그의 합체가 일어날 수 있는 고체층의 높이가 증가하므로 슬러그 길이가 증가하여 상대적으로 슬러그의 개수(빈도)는 감소하는 것으로 사료되었다.

3-4-2. 슬러그 빈도: 분산관으로부터의 높이 영향

Fig. 8(a)는 최소유동화상태의 층높이가 각각 0.85, 0.95, 1.15 m인 경우에 유속과 측정높이(평균높이 0.36, 0.46 m)의 변화에 따라 측정된 슬러그 빈도의 변화를 나타내고 있다. 측정지점의 높이가 높은 경우에 슬러그의 합체와 크기 증가에 의해 측정높이가 낮은 경우에 비해 슬러그 빈도가 작게 나타났으며 이와 같은 경향은 Nakamura 등[11]의 결과와 유사하였다. 그림에서 최소유동화상태의 층높이가 높은 경우에는 측정높이가 변화해도 슬러그 빈도의 차이가 적게 나타났는데, 이와 같은 경향은 최소유동화상태의 층높이가 높아짐에 따라 슬러그 길이가 증가하고, 슬러그의 합체가 감소하여 높이변화에 따른 슬러그 크기 변화가 둔화되어 결과적으로 슬러그 빈도의 변화가 둔화되는 것으로 사료되었다.

Fig. 8(b)는 충적경 0.1, 0.055 m에서 FCC A와 모래 입자를 충출질로 사용한 경우에 유속과 분산관으로부터의 높이변화에 따라 측정된 슬러그 빈도의 변화를 나타내고 있다. Fig. 8(a)의 결과와 마찬가지로 충적경과 입자특성이 변화할 때에도 분산관으로부터의 높이가 증가함에 따라 슬러그 빈도가 감소하는 경향을 나타내었다.

3-4-3. 슬러그 빈도: 충적경과 입자특성의 영향

Fig. 9(a)는 유속과 충적경 변화에 따라 측정된 슬러그 빈도의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 슬러그 빈도는 모래와 FCC 입자 모두에 대해 같은 유속에서 충적경이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며 Verloop와 Heertjes[8], Noordergraaf 등[2], Luca 등[9], Lee[10]의 결과와 유사하였다. 이와 같은 경향은 주어진 유속에서 충적경이 증가하면 슬러그 길이가 감소하므로 슬러그 빈도는 증가하는 것으로 사료되었다.

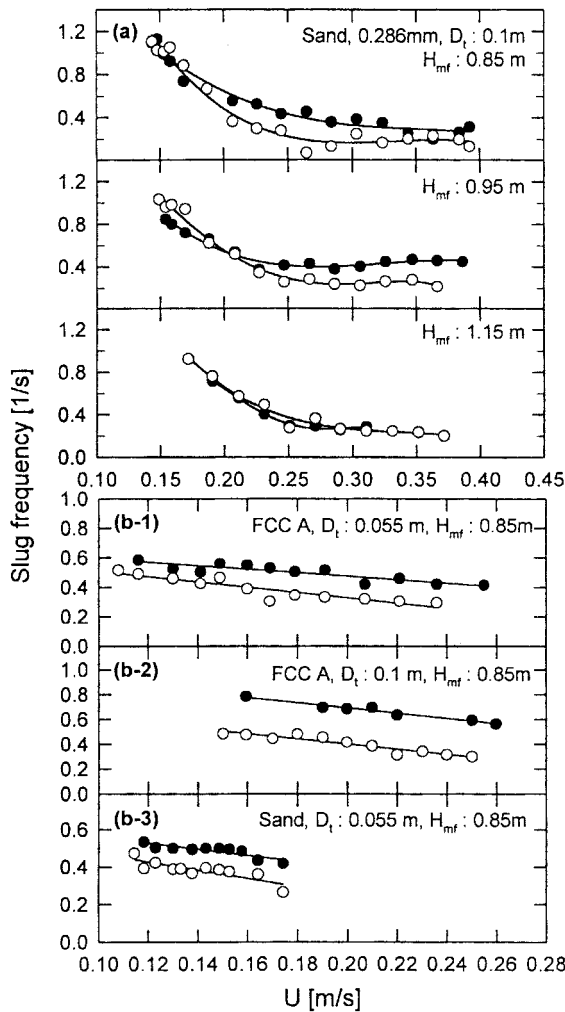


Fig. 8. Slug frequency versus gas velocity for the height from the distributor.

(a) ●, $H_{mea}=0.36$ m; ○, $H_{mea}=0.46$ m. (b-1), (b-2) ●, $H_{mea}=0.43$ m; ○, $H_{mea}=0.60$ m, (b-3). ●, $H_{mea}=0.38$ m; ○, $H_{mea}=0.58$ m.

Fig. 9(b)는 충직경 0.055 m에서 측정높이(분산판으로부터의 높이) 0.38, 0.58m일 때 입자특성 변화에 따라 측정된 슬러그 빈도의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 횡축은 과잉기체속도($U-U_{mf}$)로 표시하였다. 그림에 나타난 과잉기체속도 증가에 따른 슬러그 빈도의 감소 추이를 고려하면 동일한 과잉기체속도에서 FCC 입자의 슬러그 빈도가 모래 입자에 비해 크게 나타났다. 이와 같은 경향은 Geldart 분류 A 입자계가 Geldart 분류 B 입자계에 비해 기포흐름분율(bubble flow fraction)이 크고 기포의 분쇄효과도 크기 때문에 상대적으로 슬러그 빈도는 Geldart 분류 A 입자계가 더 크게 나타나는 것으로 사료되었다.

3-5. 기존 상관식의 비교

지금까지 여러 연구자들에 의해 슬러그 특성값들을 예측하기 위한 상관식들이 제시되어져 왔다. 하지만 이러한 상관식들의 대부분은 기존의 실험자료를 기반으로 제시된 실험적인 상관식이기 때문에 다른 실험조건에서의 적용가능 여부가 불분명하고 상관식에 고려되지 않은 변수들에 대해서는 그 변화경향을 예측할 수 없는 단점이 있다. 또한 일부 상관식의 경우에는 슬러그 특성치들에 대한 잘못된 상관식에서 출발하여 실제 변화경향과 반대로 예측되는 경우도 있다. 결과적으로 슬러그 특성값들의 정확한 예측을 위해서는 각 상관식의 비교를 통해 여러 변수

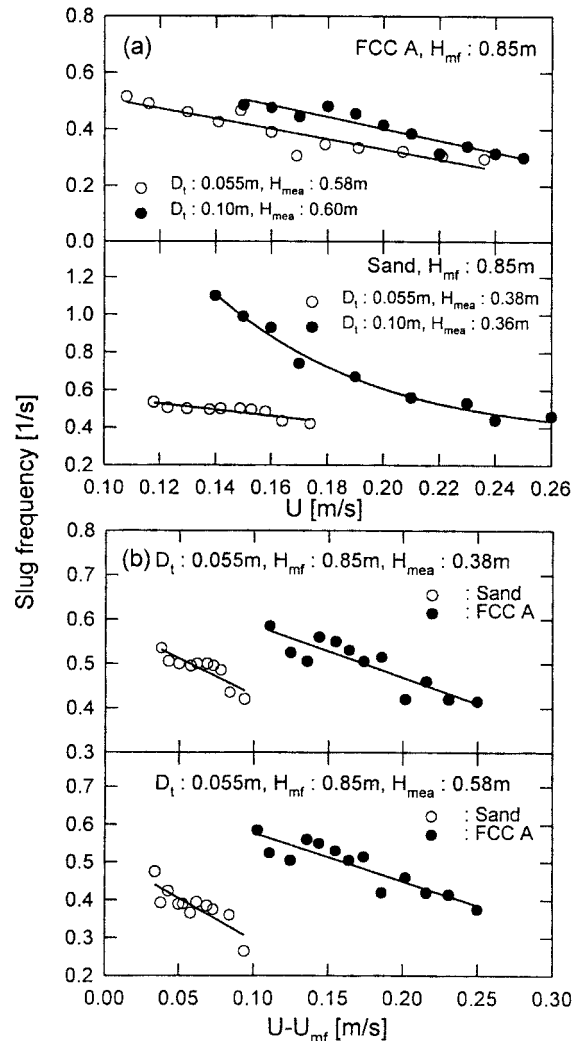


Fig. 9. Slug frequency versus excess gas velocity for the column diameter and the particle properties.

들의 영향에 대한 예측 가능성과 상관식의 정확성에 대해 검토할 필요가 있다.

최소슬러그속도의 경우 기존 상관식들 중 Ryu 등[4]의 모델이 여러 변수들(충직경, 측정높이, 입자크기)의 영향을 고려할 수 있었으며 최소유동화상태의 충높이 영향에 대해서는 본 연구에서 측정된 최소유동화상태의 충높이 변화에 따른 최소유동화속도의 변화를 고려하면 예측이 가능하였다. 또한 Fig. 6에 나타난 바와 같이 충직경이 작은 경우에는 모래의 최소슬러그속도가 크게 나타나지만 충직경이 큰 경우에는 FCC의 최소슬러그속도가 크게 나타나는 경향도 예측할 수 있었다. Stewart와 Davidson[20], Baeyens와 Geldart[7], Broadhurst와 Becker[21], Ho 등[17], Lee와 Kim[23], Fatah와 Flamant[24], Luca 등[9], DiMattia 등[13]의 상관식들은 몇 가지 변수들에 대해 최소슬러그속도에 미치는 영향을 예측할 수 없는 경우가 있었으며[4], Ryu 등[4]의 모델을 제외하면 Fig. 6의 결과를 예측할 수 있는 상관식이 없었다. 결과적으로 기존의 상관식들 중에서 Ryu 등[4]의 모델이 최소슬러그속도에 미치는 여러 변수들의 영향을 나타낼 수 있었으며 기존 실험결과와의 비교에서도 가장 유사한 결과를 나타내었다.

Fig. 10은 본 연구에서 측정된 슬러그 빈도와 기존 상관식들에 의해 계산된 값을 비교하여 나타내고 있다. Fig. 10(a)에 나타난 바와 같이 Baeyens와 Geldart[7], Verloop와 Heertjes[8]의 상관식은 최소유동화상

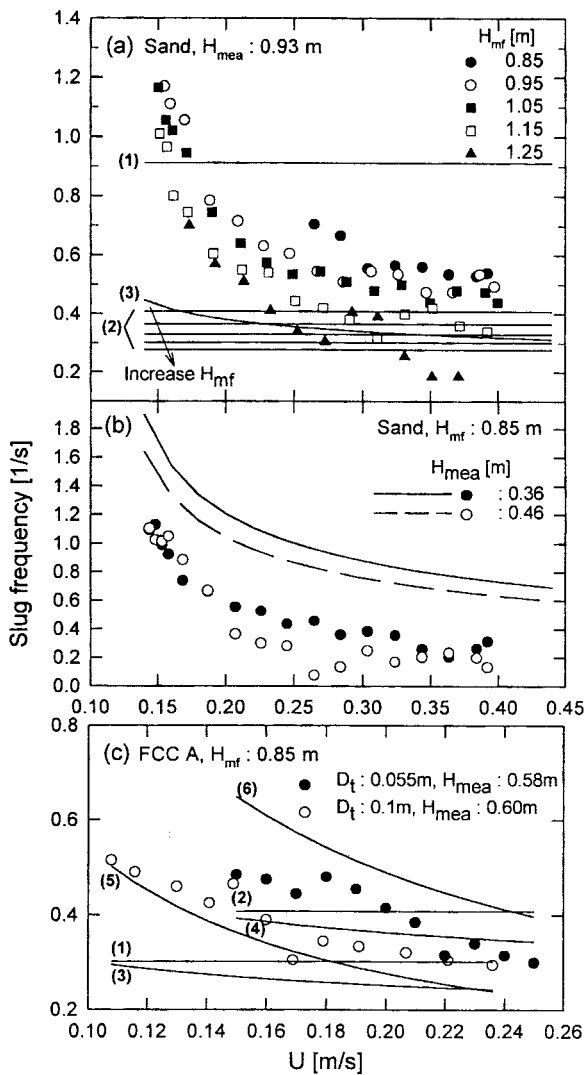


Fig. 10. Comparison between measured slug frequency and calculated values by previous correlations.

Symbols : measure values, lines : calculated values. (a) (1) Baeyens and Geldart[7], (2) Verloop and Heertjes[8], (3) Shichun et al. [3]. (b) Nakamura et al.[11]. (c) Verloop and Heertjes[8], (1): $D_t = 0.055$ m, (2): $D_t = 0.1$ m, Luca et al.[9], (3): $D_t = 0.055$ m, (4): $D_t = 0.1$ m, Lee[10], (5): $D_t = 0.055$ m, (6): $D_t = 0.1$ m.

대의 층높이 증가에 따른 슬러그 빈도의 감소경향을 나타낼 수 있었으나, 슬러그 빈도에 미치는 유속의 영향을 고려하지 않았으므로 유속 변화에 따라 슬러그 빈도가 일정하게 나타났으며 Shichun 등[3]의 상관식에 의해 계산된 슬러그 빈도는 유속이 증가함에 따라 다소 감소하는 것으로 나타났으나 낮은 유속범위에서는 측정값과 차이가 컸다. 또한 Baeyens와 Geldart[7], Shichun 등[3]의 상관식은 측정높이 및 최소유동화상태의 층높이의 영향을 나타낼 수 없었으며 Verloop와 Heertjes[8]의 상관식은 측정높이 및 유속의 영향을 나타낼 수 없었다. Fig. 10(b)에 나타난 바와 같이 유속과 측정높이의 영향을 고려한 Nakamura 등[11]의 상관식은 유속변화에 따른 슬러그 빈도의 변화 기울기가 본 연구의 측정값과 유사하였고 측정높이의 증가에 따른 슬러그 빈도의 감소경향을 나타낼 수 있었으나 최소유동화상태의 층높이 영향을 나타낼 수 없었다. 기존 상관식들 중 Satija와 Fan[12], Noordergraaf 등[2], Luca 등[9]과 Lee[10]의 상관식은 슬러그빈도에 미치는 최소유동화상태의 층높이

(또는 고정층 높이)의 영향을 고려하였으며 이들의 상관식들 중에서 Luca 등[9]과 Lee[10]의 상관식에 의해 예측된 값들이 본 연구에서 측정된 슬러그 빈도의 변화경향과 유사하였다. 하지만 그들의 상관식은 슬러그 빈도에 미치는 측정높이의 영향을 나타낼 수 없었다. Table 2에 나타난 상관식들 중 DiMattia 등[13]의 상관식은 입자의 구형도 및 고정층 높이의 영향을 고려하였으나 본 연구의 실험범위 내에서 슬러그 빈도가 음(-)의 값을 나타내었으며 그림에서 제외하였다. Fig. 10(c)는 층직경 변화에 따라 측정된 슬러그 빈도와 기존 상관식과의 비교를 나타내고 있다. Baeyens와 Geldart[7]의 상관식은 측정값에 비해 과도하게 (층직경 0.055 m: 0.994/s, 층직경 0.10 m: 0.912/s) 예측되었으며 본 실험 결과와는 반대로 층직경이 증가함에 따라 슬러그 빈도가 감소하는 것으로 예측되어 그림에서 제외하였다. 그림에 나타난 바와 같이 Verloop와 Heertjes[8], Luca 등[9], Lee[10]의 상관식이 본 실험결과와 마찬가지로 층직경이 증가함에 따라 슬러그 빈도가 증가하는 것으로 예측되었으나 Verloop와 Heertjes[8]의 상관식은 유속의 향을 고려하지 않아서 유속이 증가함에 따라 슬러그 빈도가 일정한 것으로 예측되었다. 한편 슬러그 빈도에 미치는 입자특성의 영향의 경우 대부분의 상관식들이 $(U-U_{mf})$ 만을 고려하여 동일한 과잉기체유속에서 입자특성 변화에 따른 슬러그 빈도의 변화를 예측할 수 없었다.

슬러그 빈도에 대한 기존의 상관식을 재고하면 대부분의 상관식들이 슬러그 빈도에 미치는 유속, 측정높이, 최소유동화상태의 층높이, 층직경 및 입자특성의 영향을 종합적으로 고려하기에는 미흡하였다. 따라서 슬러그 빈도에 미치는 여러 변수들의 영향에 대한 추가적인 실험 및 관찰과 함께 여러 가지 변수들의 영향을 종합적으로 고려할 수 있는 새로운 모델 또는 상관식의 제시가 필요한 것으로 사료되었다.

4. 결 론

본 연구의 실험범위에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 최소슬러그속도는 측정높이가 증가함에 따라 감소하였으며 최소유동화상태의 층높이와 층직경이 증가함에 따라 증가하였다. 최소슬러그속도에 대한 입자특성의 영향은 층직경에 따라 다르게 나타났다. 층직경이 작은 경우에는 모래입자의 최소슬러그속도가 FCC에 비해 크게 나타났으나 층직경이 큰 경우에는 FCC의 최소슬러그속도가 모래에 비해 크게 나타났다.

(2) 슬러그 빈도는 유속이 증가함에 따라 감소하였으나 유속이 증가함에 따라 감소 경향이 둔화되었으며 측정높이와 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 감소하였고 층직경이 증가함에 따라 증가하였다. 슬러그 빈도에 미치는 측정높이의 영향은 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 감소하였다. 주어진 과잉기체유속에서 FCC 입자의 슬러그 빈도가 모래 입자에 비해 크게 나타났다.

(3) 최소슬러그속도에 관한 기존의 상관식 중에서 Ryu 등[4]의 모델은 측정높이, 최소유동화상태의 층높이, 층직경 및 입자특성의 정성적인 영향을 종합적으로 예측할 수 있었으며 본 연구 및 기존 보고의 실험결과에 대해 기존 상관식들 보다 유사한 결과를 예측하였다.

(4) 문헌에 보고된 슬러그 빈도에 관한 상관식들은 유속, 분산판으로부터의 높이, 최소유동화상태 층높이, 층직경 및 입자특성의 영향을 종합적으로 해석하기에는 미흡하였으며, 새로운 모델 또는 상관식의 제시가 필요한 것으로 사료되었다.

감 사

본 연구는 1999년도 건국대학교 학술연구비지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

사용기호

d_b	: equivalent spherical bubble diameter having same volume as that of bubble [m]
d_p	: particle diameter [mm]
\bar{d}_p	: mean particle diameter [mm]
D_t	: column diameter [m]
f_s	: average slug frequency measured simultaneously at lower and upper pressure taps [1/s]
$f_{s,l}$: slug frequency measured at lower pressure taps [1/s]
$f_{s,u}$: slug frequency measure at upper pressure taps [1/s]
g	: gravitational acceleration, 9.8 [m/s ²]
H	: height above distributor [m]
H_{fb}	: height of the freely-bubbling zone in a fluidized bed [m]
H_L	: height of the slug coalescence is complete and a stable slugging zone [m]
H_{mea}	: pressure signal measuring height(average value of lower and upper pressure taps height for differential pressure fluctuation measurement) [m]
H_{mf}	: bed height at minimum fluidization [m]
H_s	: static bed height [m]
H_t	: column height [m]
N_f	: number based bubble flow rate [1/s]
N_p	: point bubble frequency [1/s]
U	: superficial gas velocity [m/s]
U_{mf}	: minimum fluidizing velocity [m/s]
U_{ms}	: minimum slugging velocity [m/s]

그리스 문자

ϕ_s	: sphericity of particle [-]
ρ_p	: apparent particle density [kg/m ³]

참고문헌

- Kunii, D. and Levenspiel, O.: "Fluidization Engineering," 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Boston(1991).
- Noordergraaf, I. W., Van Dijk, A. and Van Den Bleek, C. M.: *Powder Technology*, **52**, 59(1987).
- Shichun, C., Heling, Z. and Feichen, J.: in "Fluidization," Kwauk, M. and Kunii, D., eds., Elsevier, Amsterdam, 75(1985).
- Ryu, H. J., Choi, J. H., Yi, C. K., Shun, D. W., Son, J. E. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **37**, 472(1999).
- Choi, J. H., Son, J. E. and Kim, S. D.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **37**, 2559 (1998).
- Geldart, D.: "Gas Fluidization Technology," John Wiley and Sons, Chichester(1986).
- Baeyens, J. and Geldart, D.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 255(1974).
- Verloop, J. and Heertjes, P. M.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 1035(1974).
- Luca, L. De, Felice, R. Di. and Foscolo, P. U.: *Powder Technology*, **69**, 171(1992).
- Lee, S. H.: Master Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejeon, Korea(1997).
- Nakamura, K., Masaaki, G. H. H. and Katsuhiko H.: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **2**(6), 577(1976).
- Satija, S. and Fan, L. S.: *AIChE J.*, **31**, 1554(1985).
- DiMattia, D. G., Amyotte, P. R. and Hamdullahph, F.: *Can. J. of Chem. Eng.*, **75**, 452(1997).
- Baker, C. G. J. and Geldart, D.: *Powder Technology*, **19**, 177(1978).
- Thiel, W. J. and Potter, O. E.: *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **16**, 242(1977).
- Ryu, H. J., Choi, J. H., Kim, S. D., Son, J. E., Shun, D. W. and Yi, C. K.: *HWAHAK KONGHAK*, **37**, 178(1999).
- Cranfield, R. R. and Geldart, D.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 935(1974).
- Ho, T. H., Yutani, N., Fan, L. T. and Walawender, W. P.: *Powder Technol.*, **35**, 249(1983).
- Leva, M., Weintraub, M., Grummer, M., Pollchik, M. and Storch, H. H.: *U.S. Bureau of Mines Bulletin*, 504(1951).
- Stewart, P. S. B. and Davidson, J. F.: *Powder Technology*, **1**, 61(1967).
- Broadhurst, T. E. and Becker, H. A.: *AIChE J.*, **21**(2), 238(1975).
- Agarwal, P. K.: 2nd Int. Symp. on Gas-Solid Flows, Atlanta, May 12-16, 1(1986).
- Lee, G. S. and Kim, S. D.: *Korean J. Chem. Eng.*, **6**, 15(1989).
- Fatah, N. and Flamant, G.: "Fluidization and Fluid Particle Systems," Casal, J. and Arnaldos, J., eds., Universitat Politecnica de Catalunya, Spain, 103(1990).