

## 기체유동층에서 최소슬러깅속도

류호정 · 최정후<sup>†</sup> · 이창근\* · 선도원\* · 손재익\* · 김상돈\*\*

건국대학교 화학공학과

\*한국에너지기술연구소

\*\*한국과학기술원 화학공학과

(1999년 2월 2일 접수, 1999년 3월 4일 채택)

## Minimum Slugging Velocity in a Gas Fluidized Beds

Ho-Jung Ryu, Jeong-Hoo Choi<sup>†</sup>, Chang-Keun Yi\*, Do-Won Shun\*, Jae-Ek Son\* and Sang-Done Kim\*\*

Department of Chemical Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

\*Korea Institute of Energy Research, Taejeon 305-343, Korea

\*\*Department of Chemical Engineering, KAIST, Taejeon 305-701, Korea

(Received 2 February 1999; accepted 4 March 1999)

### 요 약

기체유동층(직경 0.1 m, 높이 2.5 m)에서 충물질로 모래(평균입경: 0.286 mm, 입자밀도: 2,561 kg/m<sup>3</sup>)를 사용하여 분산판으로부터의 높이(0.36, 0.46, 0.83, 0.93 m)와 최소유동화상태의 층높이(0.85, 0.95, 1.05, 1.15, 1.25 m) 변화에 따른 최소슬러깅속도의 변화를 측정 및 고찰하였다. 최소슬러깅속도는 분산판으로부터의 높이가 증가함에 따라 감소하였으며 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 증가하였다. 기포크기에 관한 기존의 상관식을 이용하여 최소슬러깅속도에 관한 모델을 제시하였다. 본 연구에서 제시된 최소슬러깅속도에 관한 모델은 본 연구 및 문헌의 실험결과들과 만족스러운 일치 결과를 보였으며 장치직경, 입자특성 및 분산판으로부터의 높이변화에 따른 최소슬러깅속도의 변화경향을 예측할 수 있었다.

**Abstract** – Effects of height from the distributor plate and bed height at minimum fluidization on the minimum slugging velocity have been investigated in a gas fluidized bed(0.1 m i.d. and 2.5 m height) using sand(mean diameter: 0.286 mm, apparent density: 2,561 kg/m<sup>3</sup>) as bed material. Minimum slugging velocity decreased with increasing height from the distributor plate, however, increased with increasing bed height at minimum fluidization. A model has been proposed to predict the minimum slugging velocity based on bubble size correlation. The proposed model can predict the present and previous experimental results reasonably well.

Key words : Gas Fluidization, Minimum Slugging Velocity, Model, Flow Regime Map

### 1. 서 론

기체유동층에서 최소유동화속도 이상으로 유속이 증가하면 기포가 생성되어 층의 상부로 상승하면서 합체에 의해 성장한다. 유속이 더욱 증가하면 기포크기가 계속적으로 증가하여 층직경에 가까워지게 되며 이때를 슬러깅(slugging)이라 한다.

슬러깅영역에서는 기포유동층에 비해 층의 혼합효과 및 기체-고체 접촉효율이 저하되며, 슬러그(slug)가 층을 통과하면서 일어나는 압력 요동에 의해 기계적인 충격이 가해지므로 유동층의 적절한 조업과 유지관리를 위해서는 슬러깅영역의 정확한 예측이 필요하게 된다.

슬러그의 형태는 입자특성에 따라 달라지게 된다. 입자크기와 입자 밀도가 작은 입자의 경우에는 대칭형의 axial slug가 형성되며, 입자 크기와 입자밀도가 큰 Geldart 분류 D 입자계의 경우에는 wall slug나 flat slug(square-nosed slug)가 형성된다. 한편 Geldart A 입자계

의 경우에는 기포의 합체와 함께 분쇄가 일어나므로 일반적으로 슬러깅이 일어나지 않는 것으로 보고되어 왔다[1].

Table 1은 최소슬러깅속도에 미치는 여러 가지 인자들에 대한 기존의 연구들을 요약하여 나타내고 있다. 기존의 보고들에 의하면 최소슬러깅속도는 층직경이 증가함에 따라 증가하고[2-7], 분산판으로부터의 높이가 증가함에 따라 감소하는 것으로 보고되었으며[7] 분산판 형태의 영향은 없는 것으로 보고되었다[7].

최소슬러깅속도에 미치는 입자특성의 영향에 대해서 Matheson 등[8], Ho 등[5], Dimattia 등[9]은 입자크기가 증가함에 따라  $(U_{ms}-U_{mf})$  또는  $(U_{ms}/U_{mf})$ 가 감소하는 것으로 보고한 반면 Gerald[10]은 입자크기의 영향이 없는 것으로 보고하였다. 또한 Baeyens와 Geldart[3], Broadhurst와 Becker[4]는 최소슬러깅속도에 미치는 입자 구형도(sphericity)의 영향이 작은 것으로 보고한 반면, DiMattia 등[9]은 입자의 구형도가 증가함에 따라 최소슬러깅속도가 감소하는 것으로 보고하였다.

최소슬러깅속도에 미치는 조업조건의 영향으로, 고정층높이 또는 최소유동화상태의 층높이의 영향은 연구자들마다 서로 다른 결과가 제

<sup>†</sup>E-mail : choijhoo@kkucc.konkuk.ac.kr

Table 1. Factors influencing on the onset of slugging

	Variable increased	Effect on $U_{ms}$	Source
Bed geometry	Bed diameter	increase	Stewart and Davidson[2]
			Baeyens and Geldart[3]
			Broadhurst and Becker[4]
			Ho et al.[5]
Particle properties	Distance above distributor	decrease	Agawal[6]
			Luca et al.[7]
			Luca et al.[7]
			Luca et al.[7]
	Types of distributor	no effect	Matheson et al.[8]
			Ho et al.[5]
			DiMattia et al.[9]
			Gerald[10]
Operating conditions	Mean particle diameter	decrease ( $U_{ms} - U_{mf}$ or $U_{ms}/U_{mf}$ )	Baeyens and Geldart[3]
			Broadhurst and Becker[4]
			DiMattia et al.[9]
			Gerald[10]
	Sphericity of particles	negligible	Baeyens and Geldart[3]
			Broadhurst and Becker[4]
			DiMattia et al.[9]
			Luca et al.[7]
Operating conditions	Static bed height or height of bed at minimum fluidization	decrease	Baeyens and Geldart[3]
			Broadhurst and Becker[4]
			Agawal[6]
			DiMattia et al.[9]
	Gas properties	increase	Leva et al.[11]
			Leva et al.[11] - air, CO <sub>2</sub>
			Lanneau[12]
			Fatah and Flamant[13]
	Pressure	no effect	
	Temperature	decrease	

시되었다. Baeyens와 Geldart[3], Broadhurst와 Becker[4]는 고정층높이 또는 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 최소슬러깅속도가 감소하는 것으로 보고한 반면 Agawal[6], DiMattia 등[9]은 영향이 작은 것으로 보고하였고 Leva 등[11]의 실험결과에서는 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 한편 Baeyens와 Geldart[3]는 최소슬러깅속도를 분산판 바로 윗부분에서 절대압의 압력요동(absolute pressure fluctuation)에 의해 측정하였는데, 이러한 실험방법에 의하면 층의 압력요동이 층표면에서의 기포 또는 슬러지의 파괴에 직접적인 영향을 받게 되며 그들의 보고에서도 층표면에서 시각적으로 관찰한 슬러그빈도와 압력요동에 의해 측정된 슬러그빈도가 같은 것으로 나타났다. 따라서 그들의 보고에서 실험변수로 고려된 최소유동화상태의 층높이 변화는 팽창층높이의 변화를 의미하게 되므로 최소슬러깅속도에 미치는 최소유동화상태의 층높이의 영향보다는 분산판으로부터의 높이 영향으로 고려하는 것이 타당한 것으로 사료되었다. 또한 Broadhurst와 Becker[4]는 주어진 고정층높이에서 유속을 낮추어 가면서 층표면에서 슬러그가 생성되지 않는 유속을 시각적으로 관찰하였으므로 최소슬러깅속도에 미치는 고정층높이의 영향보다는 분산판으로부터의 높이 영향으로 고려하는 것이 타당한 것으로 사료되었다.

최소슬러깅속도에 미치는 기체특성, 온도, 압력의 영향에 대해서 Leva 등[11]은 기체 종류 변화에 따른 영향이 없는 것으로, Lanneau[12]는 압력의 영향이 없는 것으로 보고하였으며 Fatah와 Flamant[13]는 온도가 증가함에 따라 최소슬러깅속도가 감소하는 것으로 보고하였다.

기존의 연구들을 종합적으로 재고하면 기존의 보고들은 주로 최소슬러깅속도에 미치는 층직경, 입자특성 등의 영향에 대해 보고되어 왔으며 측정높이의 영향에 대한 보고는 많지 않으며, 명확한 해석이 부족한 실정이다. 또한 최소슬러깅속도에 미치는 고정층높이 또는 최소유동화상태의 층높이의 영향은 서로 상반된 결과를 제시하고 있는 실정이다. 따라서 최소슬러깅속도에 대한 최소유동화상태의 층높이와 분산판으로부터의 높이 영향을 보다 분명하게 규명하기 위해서는 보다 광범위한 연구를 통한 확인 및 실험자료의 축적이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 기체유동층에서 최소슬러깅속도에 미치는 최소유동화상태의 층높이와 분산판으로부터의 높이 영향을 고찰하기 위하여 층물질로 모래입자를 사용하여 최소유동화상태의 층높이(0.85, 0.95, 1.05, 1.15, 1.25 m)와 분산판으로부터의 높이(0.36, 0.46, 0.83, 0.93 m) 변화에 따른 최소슬러깅속도를 측정 및 고찰하였고 기포크기에 관한 상관식을 기반으로 최소슬러깅속도에 미치는 여러 가지 인자들의 영향을 나타낼 수 있는 모델을 제시하였으며, 제시된 모델과 최소유동화속도 및 난류유동층으로의 전이속도에 대한 기존의 상관식을 바탕으로 고정층, 기포유동층, 슬러깅, 난류유동층 영역을 구분할 수 있는 유동화영역도를 제시하였다.

## 2. 실험

Fig. 1은 본 실험에 사용된 유동층 실험장치를 나타내고 있다. 유동층은 직경 0.1 m, 높이 2.5 m이며 내부흐름의 관찰이 가능하도록 아크릴 관으로 제작되었다. 유동화기체로는 공기가 사용되었으며, plenum에 위치한 수평관으로 주입되도록 하였다. 분배기는 multi-tuyere 형으로 직경 20 mm의 tuyere 4개에 각각 직경 3 mm의 구멍 12개를 배치하였으며 입자의 통과를 방지하기 위해서 분배기 위에 체(ASM 200 mesh)를 깔았다.

각각의 측정높이에서 유동층 내부의 압력요동을 측정하기 위하여 분산판으로부터 측방향으로 16개의 압력점을 설치하였다.

층물질로는 모래를 사용하였으며 입자의 대표적인 입도분포는 Table 2에 나타나 있다. 입자의 평균입경은 0.286 mm, 입자밀도는 2,561 kg/m<sup>3</sup>이며, 측정된 최소유동화속도는 0.108 m/s였다.

최소슬러깅속도를 측정하기 위해 먼저 입도분포와 무게가 측정된 층물질을 실험조건의 최소유동화상태의 층높이로 유동층에 채웠으며 유량조절밸브와 유량계로 일정 유량의 공기를 공급하였다. 유동층의 압력분포가 안정되었을 때를 정상상태로 간주하였으며, 정상상태에서 각 압력점에서의 압력신호는 압력변환기(차압형, validyne, P24D Model)를 사용하여 전압(±5 V)-시간 신호로 바꾸어 자료수집계(data ac-

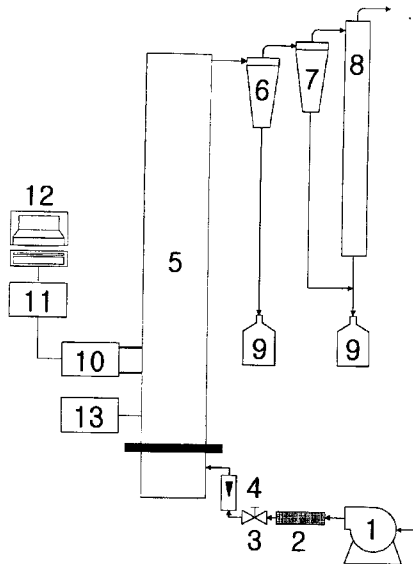


Fig. 1. Schematic diagram of fluidized bed.

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

Table 2. Sieve analysis of sand

Sieve size(μm)	-600	-425	-300	-212	-15	-106	-75
Weight fraction[-]	0.150	0.432	0.302	0.065	0.034	0.015	0.002

quisition system, real time devices Inc., AD2110 Model)를 거쳐서 PC에 저장하였다. 각 실험조건에서 압력신호는 100 Hz의 주파수로 10,000개를 수집하였다.

실험변수로는 측정지점의 높이(평균높이: 0.36, 0.46, 0.83, 0.93 m)와 최소유동화상태의 층높이(0.85, 0.95, 1.05, 1.15, 1.25 m)를 변화시켰으며, 측정된 압력신호를 이용하여 최소슬러깅속도를 결정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 압력신호의 해석 및 최소슬러깅속도의 결정

각 실험조건에서 상부와 하부에 위치한 압력점에서 동시에 측정된 차압 압력신호는 기준값(reference value)을 기준으로 조밀상(emulsion phase)과 기포상(bubble phase)으로 나뉘며, 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 압력점에서 측정된 기포 또는 슬러그빈도의 평균값을 계산하여 두 개의 압력점중 한점만 통과했을 경우에도 1/2개로 취급되도록 하였다.

$$f_s = \frac{\text{No. of bubble or slug phase signal}}{\text{sampling time}} \quad (1)$$

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

Fig. 2는  $H_{mf}$  0.85 m, 분산판으로부터의 높이 0.425-0.45, 0.475-0.50

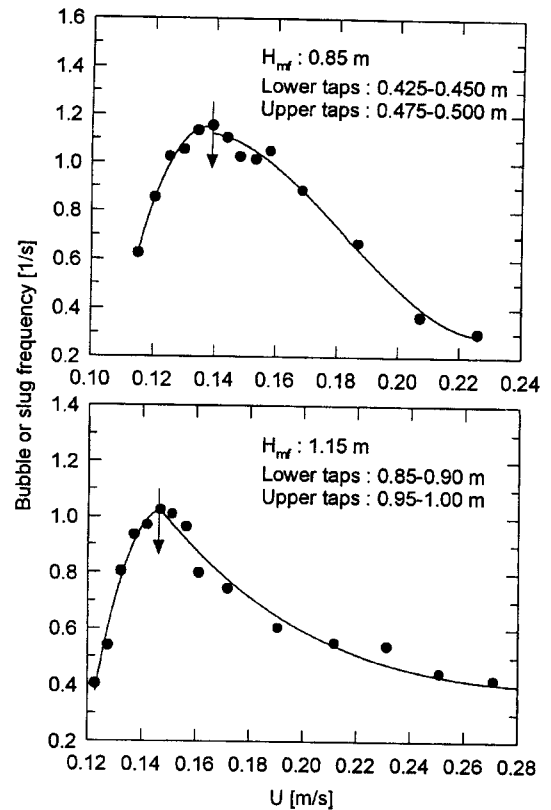


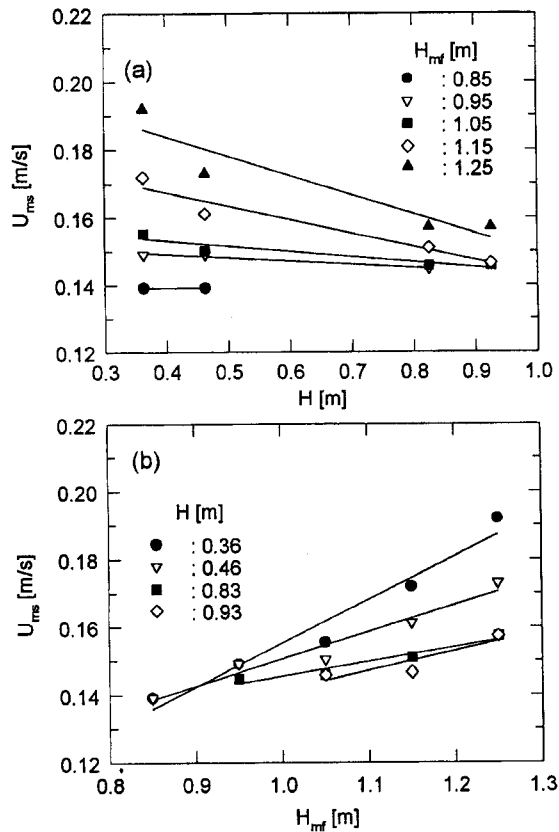
Fig. 2. Bubble or slug frequency versus gas velocity.

m에 각각 차압형 압력변환기를 연결한 경우와  $H_{mf}$  1.15 m, 분산판으로부터의 높이 0.85-0.90, 0.95-1.00 m에 각각 차압형 압력변환기를 연결한 경우에 유속 증가에 따라 측정된 기포 또는 슬러그빈도의 변화를 나타내고 있다. 기포 또는 슬러그빈도는 유속이 증가함에 따라 증가하여 최대점을 보인 후 감소하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 경향은 기포유동층 영역에서는 과잉공기량의 증가에 따라 기포빈도가 증가하고, 계속적으로 유속이 증가하면 기포의 합체가 활발히 일어나 슬러그가 형성되며, 슬러그간의 합체에 의한 크기증가로 인해 슬러깅 영역에서는 슬러그빈도가 감소하기 때문으로 사료되었다.

Baeyens와 Geldart[3], DiMattia 등[9]은 기포 또는 슬러그의 빈도가 증가하여 일정해지기 시작하는 유속을 최소슬러깅속도로 정의하였으며, 본 연구에서는 이와 유사하게 기포 또는 슬러그빈도가 최대점을 보이는 유속을 최소슬러깅속도로 결정하였다.

#### 3-2. 최소슬러깅속도

Fig. 3은 본 실험에서 측정된 최소슬러깅속도를 나타내고 있다. Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 측정된 최소슬러깅속도는 분산판으로부터의 높이가 증가함에 따라 감소하였는데, 이와 같은 경향은 분산판으로부터의 높이가 증가함에 따라 기포크기가 증가하여 충직경에 가까워지기 때문으로 사료되었다. Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 측정된 최소슬러깅 속도는 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 증가하였는데, 이와 같은 경향은 Ho 등[5]의 보고와 관련하여 해석할 수 있다. Ho 등[5]은 슬러그 위쪽에 존재하는 고체(plug solid)에 미치는 상승력(upward force)과 하강력(downward force)이 같아질 때 슬러깅이 시작되며, 상승력은 상승하는 기체에 의해 일어나며, 하강력은 슬러그 상부에 존재하는 고체의 무게와 고체와 벽 사이의 전단력(shear force)에 의해 일어난다고 보고하였다. 따라서 일정한 측정높이에서 최

Fig. 3. Minimum slugging velocity versus  $H$  and  $H_{mf}$ .

소유동화상태의 층높이가 증가하면 슬러그 상부의 고체무게가 증가하고, 측정높이보다 상부에 존재하는 고체가 층벽과 접촉하는 면적이 증가하여 전단력이 증가하므로 슬러그가 형성되기 위해서는 유속(upward force)이 증가해야 하기 때문에 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 최소슬러깅속도가 증가하는 것으로 사료되었다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이 최소슬러깅속도에 미치는 측정높이의 영향은 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 증가하였으며, 최소유동화상태의 층높이의 영향은 측정높이가 증가함에 따라 감소하였다.

#### 4. 모 델

Table 3은 최소슬러깅속도에 대한 기존의 상관식들을 요약하여 나타내고 있다. Stewart와 Davidson[2]은 그들의 실험결과와 문헌의 실험자료를 기반으로 최소슬러깅속도에 대한 층직경의 영향이 고려된 상관식을 제시하였으며, Baeyens와 Geldart[3]은 최소유동화상태의 층높이를 변화시켜가며 최소슬러깅속도를 측정하여 최소슬러깅속도의 변화가 둔화되는 높이를  $H_L$ 로 결정하고  $H_L$ 이상에서는 최소슬러깅속도가 Stewart와 Davidson[2]의 상관식과 일치하는 것으로 보고하였으며,  $H_L$ 이하에서 실험적인 상관식을 제시하였다.

Broadhurst와 Becker[4]는 최소슬러깅속도에 미치는 층직경, 입자크기, 입자의 구형도, 고정층높이 등의 영향을 고려하여 상관식을 제시하였다.

Ho 등[5]은 슬러그에 작용하는 상승력과 하강력이 같아지는 유속을 최소슬러깅속도로 정의하여 Ergun 식[14]을 이용하여 최소슬러깅속도에 관한 상관식을 제시하였으며, Lee와 Kim[15]은 Ho 등[5]의 상관식과 Wen과 Yu[16]의 최소유동화속도 상관식에 나타난 상수값을 결합하여 최소슬러깅속도에 관한 상관식을 제시하였다.

Table 3. Summary of correlations for the calculation of  $U_{ms}$ 

Authors	Correlations	Parameters											
		$U_{mf}$	$D_t$	$H_{mf}(H_s)$	$H$	$\rho_p$	$\rho_g$	$d_p$	$\phi_s$	$\epsilon_{mf}$	$\mu$	$T$	$g$
Stewart and Davidson[2]	$U_{ms} - U_{mf} = 0.07 \sqrt{g D_t}$	*	*										*
Baeyens and Geldart[3]	for $H_{mf} < H_L$ $(U_{ms} - U_{mf}) - 0.07 \sqrt{g D_t} = 1.6 \times 10^{-3} (H_L - H_{mf})^2$ $H_L = 60 D_t^{0.175}$ (in CGS unit) for $H_{mf} > H_L$ $U_{ms} - U_{mf} = 0.07 \sqrt{g D_t}$ (Stewart and Davidson[2] correlation)	*	*	*									*
Broadhurst and Becker[4]	$\frac{\rho_p U_{ms}^2}{g(\rho_p - \rho_g) d_p} = 51.4 \left( \frac{D_t}{H_s} \right)^{1.79} \left( \frac{\rho_g}{\rho_p} \right)^{0.09} + 0.00416 \left( \frac{\rho_p g (\rho_p - \rho_g) d_p^3}{\mu^2} \right)^{0.41}$ (in CGS unit)		*	*		*	*	*			*	*	*
Ho et al.[5]	$150 \left[ \frac{(1 - \epsilon_{mf})^2 \mu}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s^2 d_p^2} (U_{ms} - 2U_{mf}) \right] + 1.75 \left[ \frac{(1 - \epsilon_{mf}) \rho_g}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s d_p} (U_{ms}^2 - 2U_{mf}^2) \right] = 0$	*				*	*	*	*	*	*	*	*
Lee and Kim [15]	$Re_{ms} = [(33.7)^2 + 2(0.0408) Ar]^{0.5} - 33.7$ Correlation derived by combining of Ho et al.[5] and Wen and Yu[16] correlations	*				*	*	*			*	*	*
Fatah and Flamant[13]	$Re_{ms} = \left( -0.01241 + \frac{30.6}{T} \right) Ar^0$ $\theta = 0.526 + 0.0001826T$ ( $T$ in $^{\circ}C$ )	*				*	*	*			*	*	*
Luca et al.[7]	$U_{ms} - U_{mf} = 21.85 \left( \frac{(r D_t)^{0.90}}{H^{0.73}} \right)$ $r = 0.50$ (in CGS unit)	*	*		*								
DiMattia et al.[9]	$U_{ms} = U_{mf} (1.0551 - 2.283 \log \phi_s)$	*								*			

Fatah와 Flamant[13]는 직경 0.1 m의 유동층에서 입자크기 1.18-3.57 mm, 입자밀도 3,950 kg/m<sup>3</sup>인 입자를 사용하여 20-700 °C의 온도변화에 따른 최소슬러깅속도의 변화를 측정하였으며 최소슬러깅속도에 대한 온도의 영향을 고려한 상관식을 제시하였다.

Luca 등[7]은 층적경, 분산판으로부터의 높이, 입자밀도 및 입자크기의 변화에 따른 최소슬러깅속도의 변화를 측정하였으며 Cranfield와 Geldart[17]의 기포크기 상관식을 기반으로 그들의 실험결과에 부합되는 조건인 기포크기가 층적경의 0.5배에 해당하는 유속을 최소슬러깅속도로 간주하여 상관식을 제시하였다.

최근에 DiMattia 등[9]은 형상이 다른 입자들을 사용하여 고정층높이와 입자구형도의 변화에 따른 최소유동화속도를 측정하였으며 입자구형도의 영향을 고려한 상관식을 제시하였다.

기존의 상관식들을 종합적으로 재고하면 Ho 등[5], Lee와 Kim[15], Fatah와 Flamant[13], DiMattia 등[9]의 상관식은 층적경의 증가에 따른 최소슬러깅속도의 증가경향을 나타낼 수 없으며 Stewart와 Davidson[2], Ho 등[5], Lee와 Kim[15], Fatah와 Flamant[13], DiMattia 등[9]의 상관식은 분산판으로부터의 높이 증가에 따른 최소슬러깅속도의 감소경향을 나타낼 수 없다. 한편, Baeyens와 Geldart[3], Broadhurst와 Becker[4]의 상관식은 최소유동화상태에서의 층높이 또는 고정층에서의 층높이를 고려하였으나 그들의 보고에 나타난 실험방법에 의하면 최소유동화상태의 층높이 또는 고정층높이가 증가하면 측정지점의 높이(분산판으로부터의 높이)가 증가하게 되므로 최소유동화상태의 층높이 또는 고정층높이의 영향을 명확히 구별하여 고려하기에는 미흡하며 최소유동화상태의 층높이나 고정층높이 대신 분산판으로부터의 높이에 대한 항으로 상관식을 표현하는 것이 적합한 것으로 사료되었다.

본 연구에서는 최소슬러깅속도에 미치는 층적경, 입자특성, 분산판으로부터의 높이 등의 영향을 종합적으로 고려하기 위하여 Geldart 분류 A, B, D 입자계에 일반적으로 적용될 수 있는 Choi 등[18]의 상관식을 이용하여 모델을 제시하였다. 최소슬러깅속도에 미치는 최소유동화상태의 층높이의 영향은 실험결과가 많지 않고, 변화정도가 작으므로 모델의 고려에서는 제외하였다.

Choi 등[18]은 Geldart 분류 A, B, D 입자계에서 기포의 합체빈도와 분쇄빈도가 동시에 고려된 식 (3)부터 (6)과 같은 기포크기에 관한 상관식을 제시하였다. 여기서  $d_{b,eq}$ ,  $k$ ,  $f_s^*$ 는 각각 최대평형기포크기, 기포흐름분율, 단일기포의 분쇄빈도를 의미하며 분산판에서의 기포크기  $d_{b0}$ 는 다공판(perforated plate)의 경우에는 식 (7), porous plate인 경우에는 식 (8)에 의해 계산할 수 있다.

$$\left[ \frac{d_{b0} - d_{b,eq}}{d_b - d_{b,eq}} \right]^{b-1} \left[ \frac{(d_{b0}^{1/2} - d_{b,eq}^{1/2})(d_b^{1/2} + d_{b,eq}^{1/2})}{(d_b^{1/2} - d_{b,eq}^{1/2})(d_{b0}^{1/2} + d_{b,eq}^{1/2})} \right]^{d_{b,eq}^{1/2}} = \exp \left[ 2 \left( \frac{H}{a} + d_b^{1/2} - d_{b0}^{1/2} \right) \right] \quad (3a)$$

$$a = \frac{4.266 g^{1/2}}{f_s^*} \quad b = \frac{(U - U_{mf})}{0.711 g^{1/2}} \quad (3b)$$

$$d_{b,eq} = \frac{6.792 k (U - U_{mf})}{f_s^*} \quad (4)$$

$$k = \frac{U - (U/U_{mf})^{0.620} U_{mf}}{U - U_{mf}} \quad (5)$$

$$f_s^* = 6.47 \times 10^{-4} (U/U_{mf})^{0.454} \frac{g}{U_{mf}} \quad (6)$$

$$d_{b0} = 1.38 \left[ \frac{A(U - U_{mf})}{N_o g^{0.5}} \right]^{0.4} \quad \text{for perforate plate} \quad (7)$$

$$d_{b0} = \frac{3.685 (U - U_{mf})^2}{g} \quad \text{for porous plate} \quad (8)$$

최소슬러깅속도는 Geldart[19]의 보고를 기반으로 주어진 조건에서

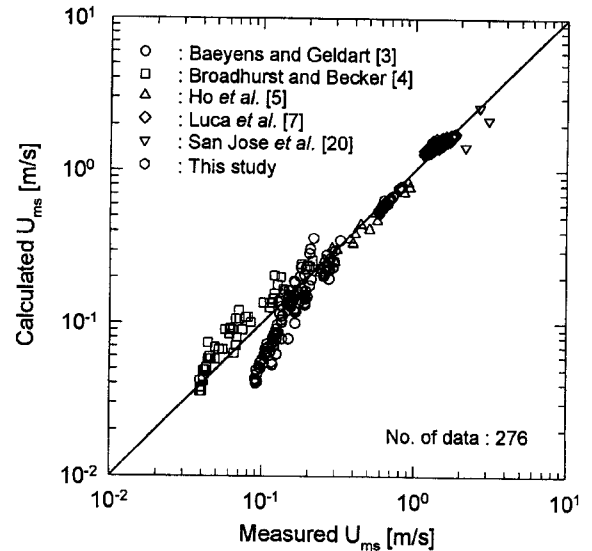


Fig. 4. Comparison between measured minimum slugging velocity and calculated values by present model.

기포크기가 층적경의 0.6배에 해당하는 유속, 즉  $d_b=0.6 D_f$ 인 유속으로 결정하였다.

## 5. 측정값 및 문헌의 상관식과의 비교

Fig. 4는 본 실험 및 문헌에 보고된 최소슬러깅속도와 본 모델에 의해 계산된 값을 비교하여 나타내고 있으며 본 모델 및 문헌의 상관식과의 비교에 사용된 실험자료들의 실험조건과 측정방법은 Table 4에 나타나 있다. Table 4에 나타난 실험자료 중 분산판 부근에서 absolute pressure transducer를 사용하여 압력요동이나 층의 압력강하를 측정된 경우인 Baeyens와 Geldart[3], San Jose 등[20]의 실험조건과 유속을 낮추면서 층표면에서 슬러그가 사라지는 유속을 측정된 Broadhurst와 Becker[4]의 실험조건에 대해 본 모델에서 최소슬러깅속도를 계산할 경우에는 실험조건의 고정층 높이 또는 최소유동화상태의 층높이를 이용하여 팽창층높이를 계산하였으며 팽창층 높이, 즉 층표면을 최소슬러깅속도의 측정높이로 간주하였다. 팽창층 높이의 계산에는 Choi 등[21]의 상관식을 사용하였다.

그림에 나타난 바와 같이 본 모델에 의해 예측된 최소슬러깅속도는 넓은 범위의 실험조건에서 측정값과 좋은 일치치를 보였다.

Fig. 5는 본 실험에서 측정된 최소슬러깅속도와 본 모델 및 기존 상관식에 의해 계산된 값을 비교하여 나타내고 있다. 기존 상관식들 중 Baeyens와 Geldart[3], Broadhurst와 Becker[4]의 상관식의 경우에는 최소유동화상태의 층높이 또는 고정층 높이를 1.05 m로 간주하여 계산하였다. 본 실험조건에서 대부분의 경우에 Baeyens와 Geldart[3]의 상관식에 나타난  $H_L$ 보다  $H_{mf}$ 가 크므로 Stewart와 Davidson[2], Baeyens와 Geldart[3]의 상관식에 의해 계산된 최소슬러깅속도가 같게 나타났다.

그림에 나타난 바와 같이 본 모델과 Luca 등[7]의 상관식이 분산판으로부터의 높이변화에 따른 최소슬러깅속도의 감소경향을 나타낼 수 있었으며 본 모델에 의한 계산값이 Luca 등[7]의 상관식에 비해 측정값과 유사하였다. Stewart와 Davidson[2], Baeyens와 Geldart[3], Broadhurst와 Becker[4], Ho 등[5], Lee와 Kim[15], Fatah와 Flamant[13], DiMattia 등[9]의 상관식은 높이의 영향을 고려할 수 없었다. 한편 Fatah와 Flamant[13]의 상관식에 의해 예측된 최소슬러깅속도는 Table 4에 나타난 대부분의 실험조건에 대해 측정값에 비해 과도하게 예측

Table 4. Summary of experimental conditions of present and previous studies on the minimum slugging velocity

Authors	Fluidizing gas	No. (hole dia.)	Particles	$d_p$ [ $\mu$ m]	$\phi_s$ [-]	$\rho_p$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	Geldart's group	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	P [kPa]	$D_i$ [m]	$H_i$ [m]	$U_{mf}$ [m/s]	$H_{mf}(H_i)$ [m]	$H_{mea}$ [m]	Measurement method
Leva et al.[1]	Air	-	Sand	270-380	-	-	A	A.C.	A.C.	0.0635	-	0.0023	0.176-1.248	0.154-0.298	Visual observation
Baeyens and Geldart[3]	Air	12000 (2 mm)	Alumina catalyst	58	1.0	1630	B	A.C.	A.C.	0.0762	-	0.039	0.240-1.936	Just above distributor	APT & Visual observation
			Southport sand	195	0.85	2650	B					0.051	0.344-2.040		
			Molochite sand	252	0.67	2540	B					0.029	0.320-2.010		
			Diakon spheres	270	1.0	1180	B					0.108	0.208-2.200		
			Southport sand	435	0.85	2650	B					0.192	0.296-2.144		
			Molochite sand	470	0.67	2540	B					0.632	0.408-1.024		
			Nitram fertilizer	1520	1.0	1800	D					0.730	0.344-0.640		
			Granular fertilizer	1790	0.67	1720	D					0.541	0.280-2.096		
			Millet seed	1848	1.0	1170	D					0.039	0.368-1.240		
			Southport sand	195	0.85	2650	B			0.308		0.029	0.416-1.240		
			Diakon sphere	270	1.0	1180	B					0.0023	0.240-1.720		
			Alumina catalyst	58	0.67	1630	A			0.1524		0.039	0.340-1.620		
			Southport sand	195	0.85	2650	B					0.051	0.290-1.920		
			Molochite sand	252	0.67	2540	B					0.029	0.360-2.360		
			Diakon spheres	270	1.0	1180	B					0.108	0.290-2.210		
			Southport sand	435	0.85	2650	B					0.192	0.340-1.840		
			Molochite sand	470	0.67	2540	B					0.632	0.410-2.130		
			Molochite sand	778	0.67	2540	BD					0.541	0.055-2.340		
Broadhurst and Becker[4]	Air	Feltmetal disk over perforated plate	Millet seed	1848	1.0	1170	D	A.C.	A.C.	0.025-0.21	3.0-4.0	-	(0.075)-(4.2)	-	Visual observation (bed surface)
Ho et al.[5]	Air	5000 (1.59 mm)	Sand	71-343	0.85	2650	AB or B	A.C.	A.C.	0.102-0.203	-	0.0281	(0.1-4.0)	0.4-0.59	DPT U vs. $U_b(U_j)$
			Glass bead	165	1.00	2450	B	A.C.	A.C.		-	0.66	0.6		
			Sand	1122	-	2650	D					0.36			
				711		2640	BD					0.20			
				491		2620	B					0.28			
			Glass beads	491		2430	B					0.16			
				358		2400	B					-			
Fatah and Flamant[13]	Air	-	Alumina	1180-3570	-	3950	D	20-700	A.C.	0.10	-	-	-	-	APT
Luca et al.[7]	Air		Glass beads	2400	0.94	2240	D	A.C.	A.C.	0.10-0.30	-	1.10	0.5-0.7	0.027-0.378	Video camera
San Jose et al.[20]	Air	Porous & Perforated plate	Glass spheres	1900	0.85	2100	D	A.C.	A.C.	0.153	0.8	1.03	0.5-0.7	0.018-0.345	Pitot tube (bed pressure drop)
		Perforated plate (1.5, 5.5 10 mm) & metallic mesh		8000	1.0	2420	D					2.33	0.20	below distributor	
				3000	1.0		D					2.00	0.35		
			Polystyrene	3500	0.78	960	D					1.16	0.20		
			-polybutadiene												
DiMattia et al.[9]	Air	Orifice plate	Whole Peas	-	0.91	858	-	A.C.	A.C.	0.145	1.50	-	0.15-0.60	0.15	APT
			Rice	-	-	576	-								
			Pearl barley	-	0.82	615	-								
			Glass bead	1000	-	625	D								
			Sand	-	0.85	2600	-								
			Wheat	-	0.77	770	-								
This study	Air	4 tuyere(3 mm)	Sand	286	0.67	2561	B	A.C.	A.C.	0.10	2.5	0.108	0.85-1.25	0.36-0.93	DPT

A.C.: Ambient condition, APT: Absolute pressure transducer, DPT: Differential pressure transducer.

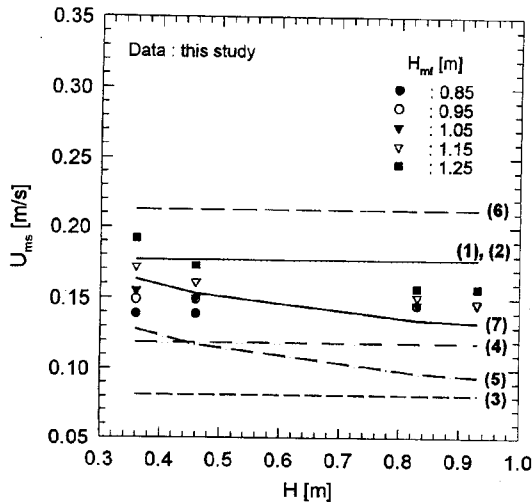


Fig. 5. Comparison between measured minimum slugging velocity and calculated values by previous correlations and present model.

Symbols : measured values, lines : calculated values

- |                              |                        |
|------------------------------|------------------------|
| (1) Stewart and Davidson[2]  | (5) Luca et al.[7]     |
| (2) Baeyens and Geldart[3]   | (6) DiMattia et al.[9] |
| (3) Broadhurst and Becker[4] | (7) present model      |
| (4) Lee and Kim[15]          |                        |

되었는데, 이는 대부분의 실험조건이 상온으로, Fatah와 Flamant[13] 상관식의 적용범위에서 벗어나기 때문으로 사료되었으며 문헌의 실험결과와 비교한 그림에서 Fatah와 Flamant[13]의 상관식은 제외하였다.

Fig. 6은 최소유동화상태의 층높이, 고정층 높이 및 분산판으로부터의 높이변화에 따라 측정된 Baeyens와 Geldart[3], Broadhurst와 Becker[4], Luca 등[7]의 실험결과와 본 모델 및 기존 상관식들에 의해 계산된 값을 비교하여 나타내고 있다. Baeyens와 Geldart[3], Broadhurst와 Becker[4]의 실험조건에서 최소유동화상태의 층높이와 고정층높이의 증가는 분산판으로부터의 높이증가를 의미한다. 그림에 나타난 바와 같이 각각의 실험결과에 대해서는 각각의 보고자들이 제시한 상관식이 측정값과 가장 유사한 경향을 나타내었으나 다른 실험결과에 대해서는 측정값과 다소 차이가 있었다. 하지만 본 모델에 의해 계산된 최소슬러깅속도는 대부분의 실험조건에서 측정값과 유사한 경향을 나타내었으며 분산판으로부터의 높이 증가에 따른 최소슬러깅속도의 감소경향을 명확히 나타낼 수 있었다.

Fig. 7은 층직경 변화에 따라 측정된 Ho 등[5]의 실험결과와 본 모델 및 기존 상관식들에 의해 계산된 값을 비교하여 나타내고 있다. Ho 등[5]의 보고에서는 입자구형도에 대한 자료가 없으므로 DiMattia 등[9]의 상관식은 그림에서 제외하였다. Fig. 7과 Table 3에 나타난 바와 같이 Lee와 Kim[15], Fatah와 Flamant[13], DiMattia 등[9]의 상관식은 층직경 증가에 따른 최소슬러깅속도의 증가경향을 나타낼 수 없다. 본 모델에 의한 예측값은 세 가지 입자 모두에 대해 다른 상관식들에 비해 실험값과 유사한 경향을 나타내었다.

Fig. 8은 입자크기 변화에 따라 측정된 Broadhurst와 Becker[4], Ho 등[5]의 실험결과와 본 모델 및 기존 상관식들에 의해 계산된 값을 비교하여 나타내고 있다. 대부분의 상관식들이 식의 형태에 입자크기 또는 최소유동화속도의 항을 포함하고 있으므로 입자크기가 증가함에 따라 최소슬러깅속도가 증가하는 것으로 나타났으며, 그림에 나타난 바와 같이 본 모델에 의해 계산된 값은 Broadhurst와 Becker[4], Ho 등[5]의 실험결과에 대해 다른 상관식들에 비해 측정값과 유사한 경향을 나타내었다.

Table 5는 본 실험 및 문헌에 보고된 최소슬러깅속도와, 기존 상관식들 및 본 모델과의 비교를 나타내고 있다. 측정값과 본 모델 및 기

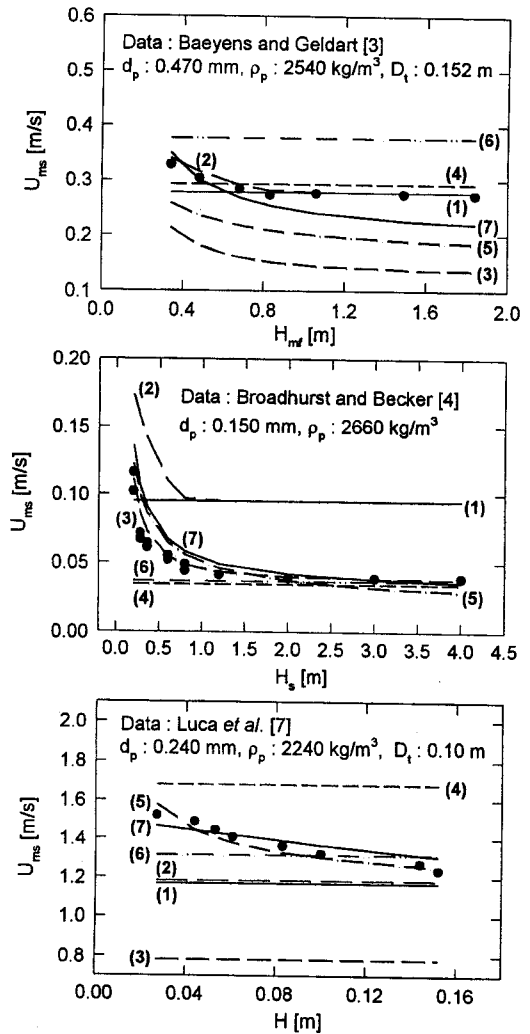


Fig. 6. Comparison between measured minimum slugging velocity and calculated values by previous correlations and present model.

Symbols : measured values, lines : calculated values

- |                              |                        |
|------------------------------|------------------------|
| (1) Stewart and Davidson[2]  | (5) Luca et al.[7]     |
| (2) Baeyens and Geldart[3]   | (6) DiMattia et al.[9] |
| (3) Broadhurst and Becker[4] | (7) present model      |
| (4) Lee and Kim[15]          |                        |

존 상관식에 의해 계산된 값의 통계적인 비교를 위해 표준편차(standard deviation)와 근평균제곱편차(root-mean-square deviation, RMS)를 고려하였으며, 다음과 같은 식에 의해 계산하였다.

$$\text{Standard deviation} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (U_{ms,mea} - U_{ms,cal})^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$\text{RMS} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \frac{U_{ms,mea} - U_{ms,cal}}{U_{ms,mea}}^2}{n} \right]^{1/2} \quad (10)$$

표에 나타난 바와 같이 각 상관식들은 각 연구자들의 실험결과에 대해서는 표준편차 및 근평균제곱편차가 작게 나타났으나, 다른 실험결과에 대해서는 비교적 크게 나타났다. 한편, 본 연구의 모델은 비교된 측정값 범위에서 고르게 좋은 일치율을 보였다.

본 연구의 실험결과 및 문헌의 실험자료들과 본 모델 및 기존 상관

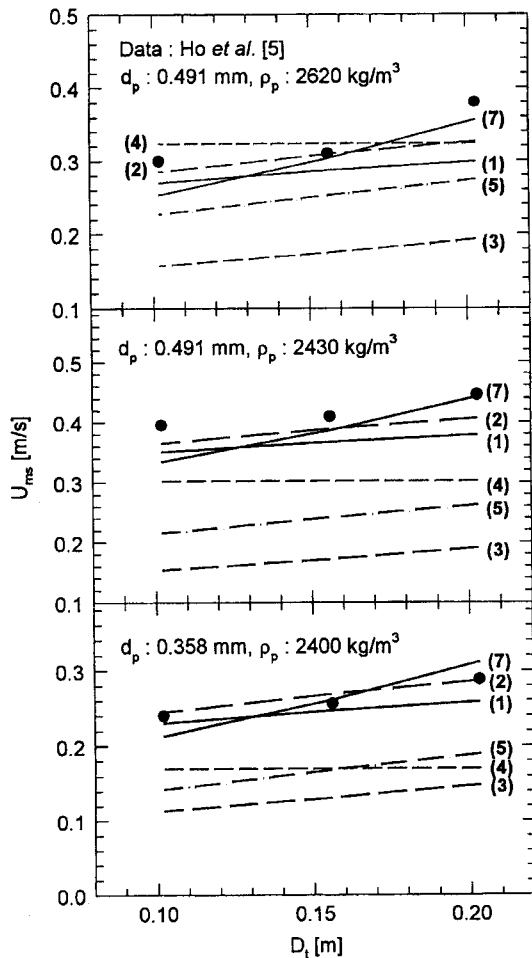


Fig. 7. Comparison between measured minimum slugging velocity and calculated values by previous correlations and present model.

Symbols : measured values, lines : calculated values

- |                              |                        |
|------------------------------|------------------------|
| (1) Stewart and Davidson[2]  | (5) Luca et al.[7]     |
| (2) Baeyens and Geldart[3]   | (6) DiMattia et al.[9] |
| (3) Broadhurst and Becker[4] | (7) present model      |
| (4) Lee and Kim[15]          |                        |

식들을 비교해본 결과 본 모델은 분산판으로부터의 높이, 층직경, 입자크기의 영향을 명확히 나타낼 수 있었으며 기존 상관식들에 비해 측정값과 유사한 경향을 나타내었다.

## 6. 유동화 영역도(Flow Regime Map)

Fig. 9는 Geldart 분류 A, B, D 입자계에 대하여 아르키메데스수 (Ar)의 변화에 따른 각 유동화영역 전이유속에서의 레이놀즈수(Reynolds number) 변화를 나타내고 있다. Fig. 9(a)는 아르키메데스수의 변화에 따른 각 흐름영역 전이유속 변화를 개략적으로 나타내고 있으며 Fig. 9(b)는 아르키메데스수  $10^{-10}$  범위와 레이놀즈수  $10^{-1} \sim 10^3$  범위에 대해 각 흐름영역 전이유속의 변화 및 층직경과 분산판으로부터의 높이 변화에 따른  $Re_{ms}$ 의 변화를 보다 자세히 나타내고 있다.

각 입자분류의 경계는 Bi와 Fan[22]의 보고에 나타난 바와 같이  $Ar < 125$ 인 경우를 Geldart 분류 A 입자계,  $125 < Ar < 1.45 \times 10^5$ 인 경우를 B 입자계,  $1.45 \times 10^5 < Ar$ 인 경우를 D 입자계로 고려하였다.

그림에서  $Re_{mf}$ ,  $Re_{ms}$ ,  $Re_c$ 는 각각 최소유동화속도, 최소슬러깅속도, 난류유동층으로 전이유속에서 레이놀즈수를 의미한다. 최소유동화속도

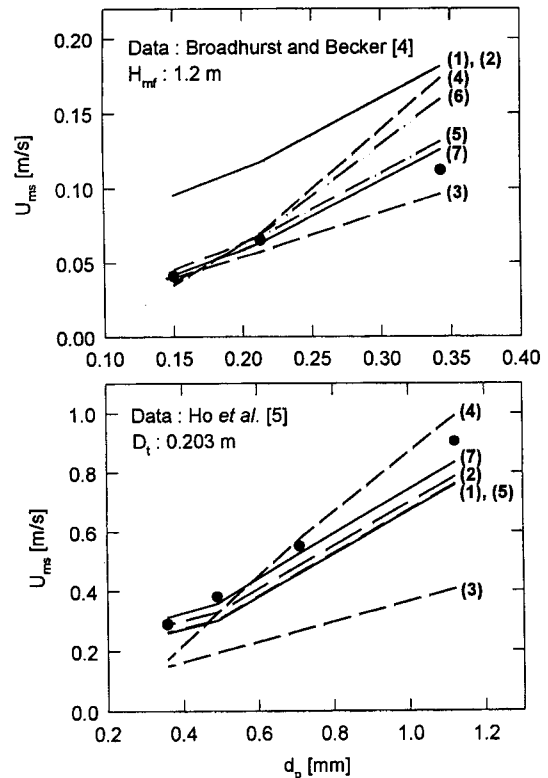


Fig. 8. Comparison between measured minimum slugging velocity and calculated values by previous correlations and present model.

Symbols : measured values, lines : calculated values

- |                              |                        |
|------------------------------|------------------------|
| (1) Stewart and Davidson[2]  | (5) Luca et al.[7]     |
| (2) Baeyens and Geldart[3]   | (6) DiMattia et al.[9] |
| (3) Broadhurst and Becker[4] | (7) present model      |
| (4) Lee and Kim[15]          |                        |

는 다음의 식 (11)과 같은 Wen과 Yu[16]의 상관식으로 계산하였다.

$$Re_{mf} = [(33.7)^2 + 0.0408Ar]^{1/2} - 33.7 \quad (11)$$

$Re_{ms}$ 는 본 모델에 의해 계산하였고,  $Re_c$ 는 식 (12)와 같은 Ryu 등 [23]의 상관식으로 계산하였다.

$$Re_c = Re_{mf} + 0.5985Ar^{0.5} \quad (12)$$

$Re_t$ 는 입자의 종말속도에서의 레이놀즈수를 의미하며, 입자의 종말 속도는 다음 식에 의해 계산하였다[24].

$$U_t = \frac{g(\rho_p - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{for } Re_p < 5.76 \quad (13)$$

$$U_t = \left[ \frac{4(\rho_p - \rho_g)^2 g^2}{225 \rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \quad \text{for } 5.76 < Re_p < 541 \quad (14)$$

$$U_t = \left[ \frac{3.1g(\rho_p - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad \text{for } 541 < Re_p < 200,000 \quad (15)$$

그림에 나타난 바와 같이  $Re_{mf}$ ,  $Re_c$ ,  $Re_t$ 는 입자의 아르키메데스수가 증가함에 따라 증가하는 일반적인 경향을 나타내었다. 본 연구에서는 기존의 보고들과 마찬가지로 주어진 조건의 레이놀즈수(Re)가  $Re_{mf}$  이하인 영역을 고정층으로,  $Re_{mf} < Re < (Re_{ms} \text{ or } Re_c)$ 인 영역을 기포유동층으로,  $Re_{ms} < Re < Re_c$ 인 영역을 슬러깅 영역으로 고려하였으며,  $Re_c < Re$ 인 영역을 난류유동층 영역으로 고려하였다.

$Re_{ms}$ 의 경우에, 기존의 유동화영역도에서는 입자의 아르키메데스수



Table 5. Result of the statistical analysis of correlations for predicting  $U_{ms}$ 

Measured data	No. of data	Standard deviation of correlations[cm/s]							
		Stewart and Davidson[2]	Baeyens and Geldart[3]	Broadhurst and Becker[4]	Lee and Kim[15]	Fatah and Flamant[13]	Luca et al.[7]	DiMattia et al.[9]	This study
Baeyens and Geldart[3]	130	2.513	0.896	14.048	15.811	471.71	6.198	16.161	4.579
Broadhurst and Becker[4]	51	5.708	6.424	1.167	6.721	285.80	1.954	6.665	2.967
Ho et al.[5]	15	9.226	7.472	31.126	8.624	574.60	15.399	-	7.503
Luca et al.[7]	60	31.783	29.528	72.853	22.800	1002.60	10.748	21.242	10.373
San Jose et al.[20]	3	96.681	88.059	162.310	111.860	1919.90	136.24	72.226	82.118
This study	17	2.709	2.716	7.598	3.932	369.58	4.704	4.142	1.648
Total data	276	17.223	15.957	38.416	18.240	621.64	13.851	16.821	9.305

Measured data	No. of data	Root-mean-square deviation(RMS) of correlations[-]							
		Stewart and Davidson[2]	Baeyens and Geldart[3]	Broadhurst and Becker[4]	Lee and Kim[15]	Fatah and Flamant[13]	Luca et al.[7]	DiMattia et al.[9]	This study
Baeyens and Geldart[3]	130	0.1145	0.0477	0.3820	0.4484	19.9850	0.2927	0.4862	0.2805
Broadhurst and Becker[4]	51	0.8165	1.0214	0.1029	0.4809	43.6710	0.2444	0.4729	0.3258
Ho et al.[5]	15	0.1433	0.1059	0.5370	0.2117	12.3830	0.3143	-	0.1174
Luca et al.[7]	60	0.1999	0.1850	0.4944	0.1647	7.0939	0.0740	0.1429	0.0773
San Jose et al.[20]	3	0.3115	0.2818	0.4777	0.3477	5.8645	0.4179	0.2005	0.2588
This study	17	0.1788	0.1792	0.4662	0.2342	23.431	0.2905	0.3998	0.1016
Total data	276	0.3763	0.4514	0.3929	0.3880	24.315	0.2548	0.4207	0.2484

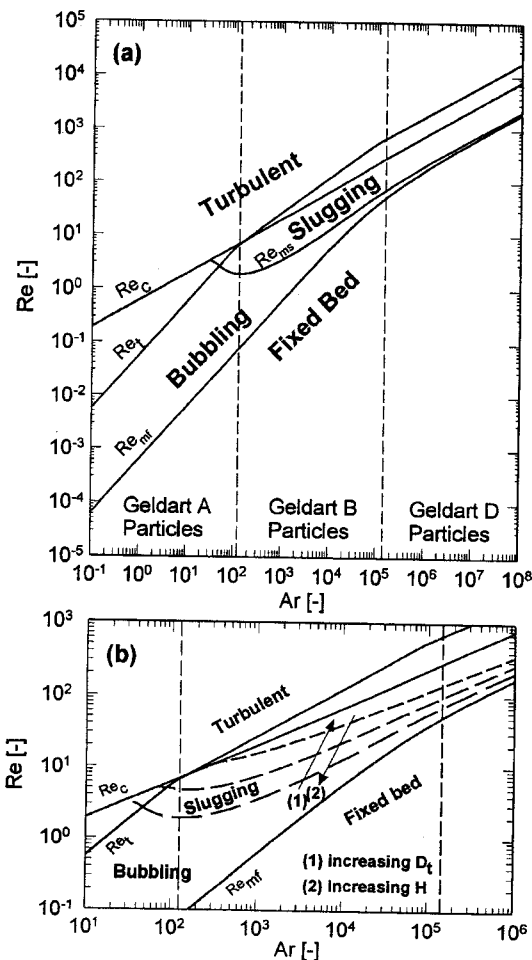


Fig. 9. Flow regime map.

화학공학 제37권 제3호 1999년 6월

(입자특성)에 관계없이 모든 입자에 대해 슬러깅이 일어나는 것으로 고려된 반면에, 본 연구의 유동화영역도에서는 입자크기와 입자밀도가 작은 입자의 경우에는 슬러깅이 없이 난류유동층으로 전이되는 현상을 나타낼 수 있었다.

그림에서 Geldart 분류 A 입자계의 경우에는 아르키메데스수가 증가함에 따라  $Re_{ms}$ 가 감소하는 경향을 나타내는데 이는 입자크기와 입자밀도가 증가함에 따라 기포의 분쇄효과가 감소하여 슬러깅이 쉽게 형성되는 경향을 나타내며, 아르키메데스수가 증가할수록 최소슬러깅속도와 최소유동화속도의 차이( $Re_{ms} - Re_{mf}$ )가 감소하는 경향을 명확히 나타낼 수 있었다. 또한 층직경이 증가함에 따라 최소슬러깅속도가 증가하고, 분산판으로부터의 높이가 증가함에 따라 감소하는 경향도 함께 나타낼 수 있었다.

$Re_c$ 와  $Re_t$ 를 보면, Geldart 분류 A 입자계의 경우에는  $U_c$ 가  $U_b$ 보다 크고, B, D 입자계의 경우에는  $U_c$ 가  $U_b$ 보다 작다는 기존의 보고들과 일치하는 결과를 나타낼 수 있었다.

## 7. 결 론

기체유동층에서 분산판으로부터의 높이가 최소유동화상태의 층높이 변화에 따른 최소슬러깅속도의 변화를 측정 및 고찰하였다. 최소슬러깅속도는 분산판으로부터의 높이가 증가함에 따라 감소하였으며 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 증가하였다.

기포크기에 관한 기존의 상관식을 이용하여 최소슬러깅속도에 관한 모델을 제시하였다. 본 연구에서 제시된 최소슬러깅속도에 관한 모델은 본 연구 및 문헌의 실험결과들과 만족스러운 일치를 보였으며 분산판으로부터의 높이, 장치직경, 입자특성 변화에 따른 최소슬러깅속도의 변화경향을 예측할 수 있었다.

본 연구에서 제시된 최소슬러깅속도 모델과 기존에 보고된 유동층 흐름영역에 대한 상관식을 기반으로 고정층, 기포유동층, 슬러깅, 난류유동층영역을 구분할 수 있는 유동화영역도를 제시하였다.

## 사용기호

a	: variable defined by Eq. (3b) [ $m^{1/2}$ ]
Ar	: Archimedes number, $\rho_g(\rho_p - \rho_g)gd_p^3/\mu^2$ [-]
b	: variable defined by Eq. (3b) [ $m^{1/2}$ ]
$d_b$	: equivalent spherical bubble diameter having same volume as that of bubble [m]
$d_{b,eq}$	: $d_b$ in equilibrium [m]
$d_{b0}$	: $d_b$ at distributor [m]
$d_p$	: particle diameter [mm]
$D_t$	: column diameter [m]
$f_s$	: slug frequency [1/s]
$\bar{f}_s$	: average slug frequency [1/s]
$f_s^*$	: splitting frequency of a single bubble [1/s]
$f_{s,l}$	: slug frequency measured lower pressure taps [1/s]
$\bar{f}_{s,u}$	: slug frequency measure upper pressure taps [1/s]
g	: gravitational acceleration, 9.8 [ $m/s^2$ ]
H	: height above distributor [m]
$H_L$	: limiting bed height where coalescence is complete and a stable slug spacing achieved [cm]
$H_{mea}$	: height from distributor of measuring point [m]
$H_{mf}$	: bed height at minimum fluidizing condition [m]
$H_s$	: static bed height [m]
$H_t$	: column diameter [m]
k	: bubble flow fraction of excess gas flow $A(U-U_{mf})$ [-]
n	: number of data [-]
$N_o$	: number of orifices per unit area of distributor [ $1/m^2$ ]
P	: pressure [kPa]
r	: ratio between bubble and column diameter [-]
Re	: Reynolds number, $d_p U_p \rho_g / \mu$ [-]
$Re_c$	: Reynolds number at transport velocity to turbulent fluidization regime, $d_p U_c \rho_g / \mu$ [-]
$Re_{mf}$	: Reynolds number at minimum fluidizing condition, $d_p U_{mf} \rho_g / \mu$ [-]
$Re_{ms}$	: Reynolds number at minimum slugging condition, $d_p U_{ms} \rho_g / \mu$ [-]
$Re_p$	: particle Reynolds number, $d_p U_p \rho_g / \mu$ [-]
$Re_t$	: Reynolds number at terminal velocity, $d_p U_t \rho_g / \mu$ [-]
T	: bed temperature [ $^{\circ}C$ ]
U	: superficial gas velocity [m/s]
$U_b$	: bubble rising velocity [m/s]
$U_c$	: transport velocity to turbulent fluidization regime [m/s]
$U_{mf}$	: minimum fluidizing velocity [m/s]
$U_{ms}$	: minimum slugging velocity [m/s]
$U_{ms,cal}$	: calculated minimum slugging velocity [m/s]
$U_{ms,mea}$	: measured minimum slugging velocity [m/s]
$U_s$	: slug rising velocity [m/s]
$U_t$	: terminal velocity [m/s]

## 그리스 문자

$\epsilon_{mf}$	: void fraction in a bed at minimum fluidizing condition [-]
$\mu$	: gas viscosity [ $kg/m \cdot s$ ]
$\rho_g$	: gas density [ $kg/m^3$ ]
$\rho_p$	: apparent particle density [ $kg/m^3$ ]
$\phi_s$	: sphericity of particle [-]

## 참고문헌

- Davidson, J. F., Clift, R. and Harrison, D.: "Fluidization," Chapter 3, 2nd ed., Academic press, London, 122(1985).
- Stewart, P. S. B. and Davidson, J. F.: *Powder Technol.*, **1**, 61(1967).
- Baeyens, J. and Geldart, D.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 255(1974).
- Broadhurst, T. E. and Becker, H. A.: *AIChE J.*, **21**(2), 238(1975).
- Ho, T. H., Yutani, N., Fan, L. T. and Walawender, W. P.: *Powder Technol.*, **35**, 249(1983).
- Agarwal, P. K.: 2nd Int. Symp. on Gas-Solid Flows, Atlanta, May 12-16, 1(1986).
- Luca, L. De, Felice, R. Di. and Foscolo, P. U.: *Powder Technol.*, **69**, 171(1992).
- Matheson, G. L., Herbst, W. A. and Holt, P. H.: *Ind. Eng. Chem.*, **41**, 1099(1949).
- DiMattia, D. G., Amyotte, P. R. and Hamdullahph, F.: *Can. J. of Chem. Eng.*, **75**, 452(1997).
- Gerald, D.: *Chem. Eng. Prog.*, **47**, 483(1951).
- Leva, M., Weintraub, M., Grummer, M., Pollchik, M. and Storch, H. H.: *U. S. Bureau of Mines Bulletin*, 504(1951).
- Lanneau, K. P.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **38**, 125(1960).
- Fatah, N. and Flamant, G.: "Fluidization and Fluid Particle Systems," Casal, J. and Arnaldos, J. eds, Universitat Politecnica de Catalunya, Spain, 103(1990).
- Ergun, S.: *Chem. Eng. Prog.*, **48**, 89(1952).
- Lee, G. S. and Kim, S. D.: *Powder Technol.*, **62**, 207(1990).
- Wen, C. Y. and Yu, Y. H.: *AIChE J.*, **12**, 610(1966).
- Cranfield, R. R. and Geldart, D.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 935(1974).
- 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, 88(1986).
- San Jose, M. J., Olazar, M., Benito, P. L. and Bilbao, J.: *Inst. of Chem. Engrs.*, **73**, 473(1995).
- Choi, J. H., Chang, I. Y., Shun, D. W., Yi, C. K., Son, J. E. and Kim, S. D.: Proceedings of the 6th Asian Conference on Fluidized-Bed and Three-Phase Reactors, Chun, H. S. and Kim, S. D. eds, 31-36 (1998).
- Bi, H. and Fan, L. S.: *AIChE J.*, **38**(2), 297(1992).
- Ryu, H. J. and Choi, J. H.: *Theories and Applications of Chem. Eng.*, **3**, 1065(1997).
- Kunii, D. and Levenspiel, O.: "Fluidization Engineering," 1st ed., John Wiley and Sons(1969).