

기체유동층에서 슬러그특성 2. 슬러그 길이와 슬러그 상승속도

류호정 · 최정후^{**} · 김상돈^{**} · 손재익

한국에너지기술연구원

*건국대학교 화학공학과

^{**}한국과학기술원 화학공학과 및 에너지환경연구센터

(2001년 4월 2일 접수, 2001년 5월 8일 채택)

Slug Characteristics in Gas Fluidized Beds

2. Slug Length and Slug Rising Velocity

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 2 April 2001; accepted 8 May 2001)

요 약

기체유동층에서 슬러그 길이와 슬러그 상승속도에 미치는 유속, 측정높이, 최소유동화상태의 층높이, 충직경 및 입자특성의 영향을 측정 및 고찰하였다. 슬러그 길이는 유속, 측정높이와 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 증가하였으나 충직경이 증가함에 따라 감소하였다. 슬러그 상승속도는 유속, 측정높이와 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 증가하였으며 충직경이 증가함에 따라 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 동일한 과잉기체속도에서 슬러그 길이와 슬러그 상승속도는 Geldart 분류 A 및 AB 입자계에 속하는 FCC 입자의 경우보다 Geldart 분류 B 입자계에 속하는 모래입자의 경우가 크게 나타났다.

Abstract – The effects of gas velocity, height from the distributor plate, bed height at minimum fluidization, column diameter and particle properties on vertical slug length and slug rising velocity were measured and discussed. The vertical slug length increased with increasing the gas velocity, height from the distributor plate and bed height at minimum fluidization, however, decreased with an increase of column diameter. The slug rising velocity also increased with increasing gas velocity, height from the distributor plate and bed height at minimum fluidization. The slug rising velocity increased slightly with column diameter. The vertical slug length and the slug rising velocity of sand were higher than that of FCC at the same excess gas velocity.

Key words: Gas-Solid Fluidization, Slug Length, Slug Rising Velocity

1. 서 론

슬러깅 영역에서 슬러그 길이, 슬러그 빈도 및 슬러그 상승속도는 정성적, 정량적으로 서로 밀접한 관계가 있으며 하나의 슬러그 특성값이 변화하면 다른 값들이 영향을 받게 된다. 앞의 보고에서는 슬러그 특성치 중에서 최소슬러그속도와 슬러그 빈도에 대한 여러 변수들의 영향을 측정 및 해석하였으며 기존 상관식과 비교하였다. 본 논문에서는 슬러그 특성치 중에서 슬러그 길이와 슬러그 상승속도에 대해 논의하고자 한다.

Table 1은 슬러그 길이에 영향을 미치는 여러 가지 인자들에 대한 기존의 연구를 요약하여 나타내고 있다. 기존 보고들에 의하면 슬러그 길이는 측정높이[5, 6], 입자크기[5], 유속[1-9], 최소유동화상태의 층높이[3, 4, 7]가 증가함에 따라 증가하고 압력이 증가함에 따라 감소[10, 11]하는 것으로 보고되었다. 한편 충직경의 영향은 보고자들에 따라 서로 다른 경향을 나타내었는데 Luca 등[3], Lee[4]는 충직경이 증가함에 따라 슬러그 길이가 감소하는 것으로 보고한 반면 Matsen 등[1], Hovmand 등[2]의 상관식에 의하면 충직경이 증가함에 따라 슬러그 길이가 증가하는 것으로 예측된다. 기존의 연구들을 종합적으로 재고하면 슬러그 길이에 영향을 미치는 인자들에 대한 기존의 보고들은 주로 유속의 영향에 대해 보고되어 왔으며 충직경의 영향에 대해서는 연구자에 따라 상반된 결과가 제시되었다.

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

Table 1. Factors influencing on the slug length

Variable increased		Effect on L_s	Source
Bed geometry	Bed diameter(D_t)	Increase	Matsen et al.[1] Hovmand et al.[2]
		Decrease	Luca et al.[3] Lee[4]
	Distance above distributor(H)	Increase	Park et al.[5] Nakamura et al.[6]
Particle properties	Mean particle diameter(\bar{d}_p)	Increase	Park et al.[5]
Operating condition	Superficial gas velocity(U)	Increase	Park et al.[5] Matsen et al.[1] Hovmand et al.[2] Nakamura et al.[2] Thiel and Potter[7] Donsi et al.[8] Shichun et al.[9] Luca et al.[3] Lee[4]
			Thiel and Potter[7] Luca et al.[3] Lee[4]
		Decrease	Lanneau[10] King and Harrison[11]

Table 2는 슬러그 길이를 예측하기 위해 제시된 기존의 상관식들을 요약하여 나타내고 있다. 기존 상관식들 대부분은 기존의 실험자료를 바탕으로 제시된 실험적인 상관식이며 Matsen 등[1]의 상관식은 슬러그

빈도 상관식을 바탕으로 제시되었으며 기존 보고와는 반대로 충전경이 증가함에 따라 슬러그 길이가 증가하는 것으로 예측된다. 하지만 그들이 사용한 슬러그 빈도 상관식은 최소슬러그속도 이상의 유속에서 슬러그 빈도가 일정한 것으로 고려하여 제시된 상관식이며 기존 보고와는 반대로 충전경이 증가함에 따라 슬러그 빈도가 감소하는 것으로 예측된다. 즉, 충전경의 영향을 잘못 고려한 슬러그 빈도 상관식을 사용하였기 때문에 슬러그 길이에 미치는 충전경의 영향이 반대로 예측되는 것으로 사료되었다. Hovmand과 Davidson[12]은 Nicklin 등[13]이 제시한 슬러그 부피와 슬러그 길이의 관계식과 슬러그 영역에서의 층팽창 및 슬러그 사이의 거리(slug spacing)를 고려하여 슬러그 길이에 대한 상관식을 제시하였는데 그들의 상관식도 Matsen 등[1]의 상관식과 마찬가지로 기존의 실험결과와는 반대로 충전경이 증가함에 따라 슬러그 길이가 증가하는 것으로 예측된다. Matsen 등[1], Hovmand과 Davidson[12]의 상관식에 의해 예측되는 충전경의 영향은 실험적으로 확인한 결과가 아니며 상관식을 유도하는 과정에서 슬러그 빈도 또는 슬러그 사이의 거리에 대한 고려가 적합치 않기 때문에 충전경의 영향이 반대로 예측되는 것으로 사료된다. 실제로 충전경을 바꾸면서 슬러그 길이를 측정한 보고는 충전경이 증가함에 따라 슬러그 길이가 감소한다는 Luca 등[3]의 결과뿐이다. 또한 주어진 슬러그 부피유량에서 충전경이 증가함에 따라 슬러그의 단면적이 증가하므로 슬러그 길이는 충전경이 증가함에 따라 감소하는 것으로 고려하는 것이 합리적이며 추가적인 실험을 통한 확인이 필요한 것으로 사료되었다.

슬러그 길이에 대한 기존 상관식들을 종합적으로 재고하면 입자특성의 영향은 최소유동화속도의 함수로 고려할 수 있으므로 최소유동화속도, 충전경, 최소유동화상태의 층높이를 변수로 고려한 Luca 등[3], Lee[4]의 상관식이 비교적 여러 변수들의 영향을 나타낼 수 있는 것으로 사료된다. 하지만 Luca 등[3], Lee[4]의 상관식은 유속이 작은 경우에는 과잉기체속도($U-U_{mf}$)가 작으므로 식의 형태상 슬러그 길이가 음수(-)

Table 2. Summary of correlations on the slug length

Authors	Experimental technique	Correlations	Parameters					
			U_{mf}	U	d_p	D_t	H	$H_{mf}(H_s)$
Park et al. [5]	Electroresistivity probe	$\frac{L_s}{H} = 33.3 d_p^{1.5} \left(\frac{U - U_{mf}}{U_{mf}} \right)^{0.77}$ (in CGS unit)	*	*	*		*	
Matsen et al. [1]	X-ray	$L_s = k(U - U_{mf})D_t^{0.5} / 0.35g^{0.5}$ $k = \frac{9.38}{D_t^{0.357}}$ from Baeyens and Geldart[26] (in CGS unit)	*	*		*		
Hovmand and Davidson [12]	CP	$\left(\frac{L_s}{D_t} \right) - 0.495 \left(\frac{L_s}{D_t} \right)^{0.5} \left[1 + \frac{U - U_{mf}}{0.35(gD_t)^{0.5}} \right]$ $+ 0.061 - 1.939 \frac{U - U_{mf}}{0.35(gD_t)^{0.5}} = 0$	*	*		*		
Nakamura et al.[6]	-	for $H < 120$ cm $L_s = 2.6(U - U_{mf})^{0.48} H^{0.22}$ for $H > 120$ cm $L_s = 0.47(U - U_{mf})^{0.78} H^{0.46}$ (in CGS unit)	*	*			*	
Shichun et al.[9]	OP	$L_s = 2.165U^{1.31}(U - U_{mf})^{-0.16}$ (in CGS unit)	*	*				
Luca et al.[3]	Visual observation (video camera)	$\frac{L_s}{(D_t H_{mf})^{0.5}} = 2.09 \frac{U - U_{mf}}{(gD_t)^{0.5}} - 0.37$	*	*		*		*
Lee[4]	DPT	$\frac{L_s}{(D_t H_{mf})^{0.5}} = 1.82 \frac{U - U_{mf}}{(gD_t)^{0.5}} - 0.13$	*	*		*		*

CP: capacitance probe, DPT: differential pressure transducer, OP: optical probe

Table 3. Factors influencing on the slug rising velocity

	Variable increased	Effect on U_s	Source
Bed geometry	Bed diameter (D_p)	Increase	Lanneau[10] Nicklin et al.[13] Ormiston et al.[14] Matsen et al.[15] Kehoe and Davidson[16] Carotenuto et al.[17] Nakamura et al.[6] Thiel and Potter[7] Fan et al.[18] Dry et al.[19] Satija and Fan[20] Shichun et al.[9] Lee and Kim[21] Clark et al.[22] Lee[4]
	Distance above distributor(H)	No effect	Dry et al.[19]
Particle properties	Mean particle diameter(\bar{d}_p)	Decrease	Ormiston et al.[14] Fan et al.[18] Donsi et al.[8] Satija and Fan[20] Lee and Kim[21]
	Particle density(ρ_p)	Decrease	Fan et al.[18] Satija and Fan[20] Lee and Kim[21]
Operating condition	Static bed height(H_s) or bed height at minimum fluidization(H_{mf})	Decrease	Clark et al.[22]
		Initial increase and independent thereafter	Satija and Fan[20]
		Increase	Lee[4]
	Superficial gas velocity(U)	Increase	Lanneau[10] Nicklin et al.[13] Ormiston et al.[14] Matsen et al.[15] Kehoe and Davidson[16] Carotenuto et al.[17] Nakamura et al.[6] Thiel and Potter[7] Fan et al.[18] Ho et al.[23] Dry et al.[19] Shichun et al.[9] Lee and Kim[21, 24] Clark et al.[22] Lee[4]
		Initial increase and decrease thereafter	Satija and Fan[20]

로 예측되는 단점이 있다. 한편 기존의 상관식들은 슬러깅 영역에서 슬러그 길이와 슬러그 빈도 사이의 상호관계에 대한 고려가 미흡하며 상관식의 정확성에 대해서는 기존 실험결과와의 비교를 통한 검토가 필요하다.

Table 3은 슬러그 상승속도에 영향을 미치는 여러 가지 인자들에 대한 기존의 연구를 요약하여 나타내고 있다. 슬러그 상승속도에 대한 기존의 연구들을 살펴보면 Lanneau[10], Nicklin 등[13], Ormiston 등[14], Matsen 등[15], Kehoe와 Davidson[16], Carotenuto 등[17], Nakamura 등[6], Thiel과 Potter[7], Fan 등[18], Dry 등[19], Satija와 Fan[20], Shichun 등[9], Lee와 Kim[21], Clark 등[22], Lee[4]는 층적경이 증가함에 따라 슬러그 상승속도가 증가하는 것으로 보고하였으며 Lanneau[10], Nicklin 등[13], Ormiston 등[14], Matsen 등[15], Kehoe와 Davidson[16], Carotenuto

등[17], Nakamura 등[6], Thiel과 Potter[7], Fan 등[18], Ho 등[23], Dry 등[19], Shichun 등[9], Lee와 Kim[21, 24], Clark 등[22], Lee[4]는 유속이 증가함에 따라 슬러그 상승속도가 증가하는 것으로 보고하였다. 한편 Satija와 Fan[20]은 Geldart 분류 D 입자재에 속하는 굵은 입자를 사용하여 실험한 결과 유속이 증가함에 따라 슬러그 상승속도가 증가하다가 유속이 더욱 증가하면 square-nose slug가 주로 형성되어 유속증가에 따라 슬러그 상승속도가 오히려 감소하는 것으로 보고하였다.

슬러그 상승속도에 미치는 입자특성의 영향에 대해 Ormiston 등[14], Fan 등[18], Donsi 등[8], Satija와 Fan[20], Lee와 Kim[21]은 입자크기가 증가함에 따라 슬러그 상승속도가 감소하는 것으로 보고하였으며 Fan 등[18], Satija와 Fan [20], Lee와 Kim[21]은 입자밀도가 증가함에 따라 슬러그 상승속도가 감소하는 것으로 보고하였다. 한편 슬러그 상

승속도에 대한 고정층 높이 또는 최소유동화상태의 층높이의 영향은 서로 다른 결과가 제시되었는데 Satija와 Fan[20]은 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 슬러그 상승속도가 증가한 후 일정해지는 것으로, Lee[4]는 계속적으로 증가하는 것으로 보고한 반면 Clark 등[22]은 고정층 높이가 증가함에 따라 슬러그 상승속도가 감소하는 것으로 보고하였다. 이와 같이 슬러그 상승속도에 대한 고정층 높이 또는 최소유동화상태의 층높이 영향이 서로 다른 결과를 나타내는 이유는 각 보고에서 나타난 슬러그 형태가 다르기 때문으로 사료된다. Clark 등[22]의 보고에서 나타난 슬러그의 형태는 완전한 square-nose slug이며, 이러한 경우에는 슬러그가 중단면 전체를 차지하고 상승하며 슬러그 위쪽에 존재하는 고체량(고정층 높이)이 증가함에 따라 슬러그에 작용하는 중력의 영향이 증가하므로 고정층 높이가 증가함에 따라 슬러그 상승속도가 감소하는 것으로 사료되었다. 한편 Satija와 Fan[20], Lee[4]의 보고에서는 입자종류나 유속 변화에 따라 round-nose slug 또는 square-nose

slug가 형성되었다.

슬러그 상승속도에 대한 분산판으로부터의 높이영향에 대한 보고는 Dry 등[19]의 보고 뿐으로 그들은 분산판으로부터의 높이 변화는 슬러그 상승속도에 영향을 미치지 않는 것으로 보고하였다.

기존의 연구들을 종합적으로 재고하면 슬러그 상승속도에 영향을 미치는 인자들에 대한 기존의 보고들은 주로 층직경, 입자특성, 유속 등의 영향에 대해 보고되어 왔으며 분산판으로부터의 높이와 최소유동화상태의 층높이의 영향에 대한 보고는 제한적이며, 명확한 해석이 부족한 실정이다. 특히 슬러그 상승속도에 미치는 고정층 높이(또는 최소유동화상태의 층높이)의 영향은 연구자들에 따라 상반된 결과가 제시되었다.

Table 4는 슬러그 상승속도를 예측하기 위해 제시된 기존의 상관식들을 요약하여 나타내고 있다. 표에 나타난 바와 같이 대부분의 상관식들이 Nicklin 등[13]의 상관식 형태와 유사하며 근래에 들어 Ormiston 등[14]의 상관식에 표시된 바와 같은 k_1 , k_2 값에 대해 여러 실험변수들의

Table 4. Summary of correlations on the slug rising velocity

Authors	Experimental technique	Correlations	Parameters						
			U	U_{mf}	d_p	ρ_p	ρ_g	D_t	H_s
Lanneau[10]	CP	$U_s = (U - U_{mf}) + 0.41\sqrt{gD_t}$	*	*				*	
Nicklin et al.[13]		$U_s = (U - U_{mf}) + 0.35\sqrt{gD_t}$	*	*				*	
		for angular slugs							
		$U_s = (U - U_{mf}) + 0.35\sqrt{2gD_t}$							
Ormiston et al.[14]	CP, X-ray	for wall slugs							
		$U_s = k_1(U - U_{mf}) + k_2\sqrt{gD_t}$	*	*				*	
		$k_1 = 0.87-9.68, k_2 = 0.335-0.383$							
Matsen et al.[15]		$U_s = (U - U_{mf}) + 0.35\sqrt{gD_t}$	*	*				*	
Kehoe and Davidson [16]	CP, X-ray	$U_s = (U - U_{mf}) + 0.35\sqrt{gD_t}$	*	*				*	
		$U_s = (U - U_{mf}) + 0.35\sqrt{2gD_t}$							
		$U_s = (U - U_{mf}) + 0.35\sqrt{gD_t}$	*	*				*	
Carotenuto et al.[17]	CP	$U_s = (U - U_{mf}) + 0.35\sqrt{gD_t}$	*	*				*	
Nakamura et al.[6]		$U_s = 0.28\sqrt{gL_s}$							*
Thiel and Potter[7]	CP	$U_s = (U - U_{mf}) + 0.35\sqrt{gD_t}$	*	*				*	
Fan et al.[18]	PT	$U_s = k(U - U_{mf}) + 0.35\sqrt{gD_t}$	*	*	*	*	*	*	
		$k = 2.43\left(\frac{\bar{d}_p}{D_t}\right)^{-0.5}\left(\frac{\rho_p}{1000\rho_g}\right)^{-4.2}$							
Dry et al.[19]	Gas tracer signal	$U_s = 1.15(U - U_{mf}) + 0.63\sqrt{gD_t}$	*	*				*	
Satija and Fan[20]	PT	$U_s = k(U - U_{mf}) + 0.35\sqrt{gD_t}$	*	*	*	*	*	*	
		$k = 2.43\left(\frac{\bar{d}_p}{D_t}\right)^{-0.5}\left(\frac{\rho_p}{1000\rho_g}\right)^{-4.2}$							
		for $d_p < 1.12$ mm							
		$k = 1.476\left(\frac{\bar{d}_p}{D_t}\right)^{-0.9}\left(\frac{\rho_p}{1000\rho_g}\right)^{-4.2}$							
		for $d_p > 2.3$ mm							
Shichun et al.[9]	OP	$U_s = 0.7613(U - U_{mf}) + 0.35\sqrt{1.19gD_t}$	*	*				*	
Lee and Kim[21]	PT	$U_s = k(U - U_{mf}) + 0.35\sqrt{gD_t}$	*	*	*	*	*	*	
		$k = 85.7\left(\frac{\bar{d}_p}{D_t}\right)^{-0.093}\left(\frac{\rho_p}{\rho_g}\right)^{-0.616}$							
Clark et al. [22]	PT	$U_s = (U - U_{mf}) + U^*$	*	*					*
		$U^* = 0.389, 0.316, 0.243$							
		for H_s 0.152, 0.305, 0.61 m respectively							
Lee[4]	PT	$U_s = 0.6(U - U_{mf}) + 0.18\sqrt{gD_t}$	*	*				*	

CP: capacitance probe, PT: pressure transducer, OP: optical probe

영향을 고려한 상관식이 제시되었다. 한편 Fan 등[18], Satija와 Fan[20], Lee와 Kim[21]의 상관식에서는 기체밀도의 항이 포함되어 있으나 상온, 상압에서의 실험결과를 사용하여 상관식을 결정하였으므로 고온, 고압에서의 적용가능성은 불분명하다.

기존의 상관식들과는 다른 형태로 Nakamura 등[6]은 슬러그 상승속도에 미치는 슬러그 길이의 영향을 고려하였다. 한편 Clark 등[22]의 상관식은 슬러그 상승속도에 미치는 고정층 높이의 영향을 고려하였으나 그들의 보고에 나타난 슬러그의 형태는 square-nose slug로 round-nose slug의 경우에는 고정층 높이 또는 최소유동화 상태의 층높이 영향이 기존 보고와는 반대로 예측되게 된다. 결과적으로 기존 상관식 중에서 round-nose slug에 대한 고정층 높이 또는 최소유동화상태의 층높이 영향을 고려할 수 있는 상관식은 제시되지 않았다.

지금까지 살펴본 바와 같이 슬러그 길이와 슬러그 상승속도에 대한 기존의 연구들을 종합하면 슬러그 길이에 대해서는 층직경의 영향에 대해 서로 다른 결과가 보고되었으며 슬러그 상승속도에 대해서는 고정층 높이 또는 최소유동화상태의 층높이의 영향에 대해 서로 다른 결과가 보고되었다. 또한 슬러그 길이와 슬러그 상승속도에 미치는 분산판으로부터의 높이, 고정층 높이 또는 최소유동화상태의 층높이 영향에 대한 보고는 제한적인 실정이다.

본 연구에서는 이러한 변수들이 슬러그 길이와 슬러그 상승속도에 미치는 영향을 확인하고 기존 상관식과의 비교를 통하여 각 변수의 영향에 대한 기존 상관식의 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 층물질로 모래와 FCC를 사용하여 유속, 측정높이, 최소유동화상태의 층높이, 층직경 및 입자특성의 변화에 따른 슬러그 길이와 슬러그 상승속도의 변화를 측정 및 고찰하였다.

2. 실험

슬러그 길이와 슬러그 상승속도의 측정을 위해 사용된 실험장치, 층물질 및 압력요동신호의 측정방법은 앞서 최소슬러그상속도와 슬러그 빈도에 대한 보고에 설명한 바와 같다.

슬러그 빈도 실험의 경우와 마찬가지로 슬러그 길이와 슬러그 상승속도에 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, 모래입자에 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 슬러그 길이와 슬러그 상승속도의 변화를 고려하기 위해 서로 다른 입자계에 속하는 FCC(Geldart 분류 A 및 AB)와 모래(Geldart 분류 B)입자를 사용하였다. 슬러그 길이와 슬러그 상승속도 측정을 위한 실험조건 및 실험변수는 앞서 보고에 설명한 슬러그 빈도의 측정조건과 같다.

슬러그 상승속도는 smoothing과 filtering을 거치기 전의 압력요동신호를 사용하여 결정하였으며 슬러그 길이는 smoothing과 filtering과정을 거친 신호를 이용하여 계산하였다.

주어진 실험조건에서 슬러그 상승속도(slug rising velocity)는 Fan 등[18], Lee와 Kim[21]의 보고에 나타난 방법과 같이 상부와 하부의 압력변환기에서 측정된 압력신호의 cross-correlation function(ϕ_{xy})을 이용하여 결정하였다. 슬러그 상승속도는 식 (1)과 같이 정의되며 두 압력변환기 사이의 시간지연(time delay, τ_m)은 식 (2)와 같이 cross-correlation function을 계산하여 그 값이 최대가 되는 시간으로 결정하였다. 식 (2)에서 N은 전체 압력신호의 개수, l_n 은 시간 τ 동안에 측정되는 압력신호의 개수, x_n , y_{n+l_n} 은 각각 위쪽과 아래쪽의 압력변환기에서 n번째와 n+l_n번째에 측정된 신호를 의미한다. 상부와 하부의 압력 측정점들 사이의

거리는 식 (3)과 같이 상부 압력변환기와 연결된 두 압력 측정점의 평균 높이와 하부 압력변환기와 연결된 두 압력 측정점의 평균높이의 차이로 결정하였다.

$$U_s = \frac{\text{distance between pressure taps, } d_{avg}}{\text{average time delay, } \tau_m} \quad (1)$$

$$\phi_{xy} = \frac{1}{N-l_n} \sum_{n=1}^{N-l_n} x_n \cdot y_{n+l_n} \quad (2)$$

$$d_{avg} = H_{U, avg} - H_{L, avg} \quad (3)$$

슬러그 길이를 계산하기 위해 각 실험조건에서 상부와 하부에 위치한 압력점에서 동시에 측정된 차압 압력신호를 기준값(reference value)을 기준으로 조밀상(emulsion phase)과 기포상(bubble phase)으로 나누고 [25], 프로그램을 사용하여 smoothing을 해 주었다. Smoothing을 거친 압력신호 중 압력탭에 의해 슬러그가 합체 또는 분쇄되는 경우, 슬러그가 수직으로 상승하지 않는 경우, 슬러그가 압력탭의 위쪽에 오랜동안 머무는 경우 등의 적합치 않은 신호를 filtering을 통해 제거하였으며 smoothing과 filtering을 거친 신호를 사용하여 슬러그 길이를 결정하였다.

슬러그 길이는 계산된 슬러그 상승속도를 이용하여 식 (4)와 같이 결정하였다.

$$L_s = U_s \cdot B_m \quad (4)$$

식 (4)에서 B_m 은 아래쪽 탭과 위쪽 탭에서 측정된 신호에서 슬러그 상에 속하는 시간(B_L , B_U)의 평균값을 의미하며 식 (5)와 같이 결정하였다.

$$B_m = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_L + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_U}{2} \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 슬러그 길이

3-1-1. 슬러그 길이: 유속과 최소유동화상태의 층높이 영향

Fig. 1은 층직경 0.1 m에서 모래(0.286 mm) 입자에 대해 2개의 차압형 압력변환기를 각각 0.75-0.80, 0.85-0.90 m(평균높이 0.83 m)에 연결한 경우와 0.85-0.90, 0.95-1.00 m(평균높이 0.93 m)에 연결한 경우에 유속과 최소유동화상태의 층높이 변화에 따른 슬러그 길이의 변화를 나타내고 있다. Park 등[5], Matsen 등[1], Hovmand 등[2], Nakamura 등[6], Thiel과 Potter[7], Donsi 등[8], Shichun 등[9], Luca 등[3], Lee[4]의 보고와 마찬가지로 유속이 증가함에 따라 슬러그 길이가 증가하였으며, 이와 같은 경향은 유속이 증가함에 따라 과잉기체량($U-U_{mf}$)이 증가하고 초기기포크기 및 기포빈도가 증가하여 기포 및 슬러그의 합체가 활발히 일어나기 때문으로 사료되었다. 한편 Thiel과 Potter[7], Luca 등[3], Lee[4]의 보고와 마찬가지로 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 슬러그 길이가 증가하였다. 이와 같은 경향은 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 주어진 측정높이 상부에 존재하는 고체층이 증가하여 슬러그를 보유할 수 있는 고체층의 높이가 증가하기 때문으로 사료되었다.

3-1-2. 슬러그 길이: 분산판으로부터의 높이 영향

Fig. 2(a)는 모래(0.286 mm) 입자에 대해 유속과 측정높이(평균높이 0.83, 0.93 m)의 변화에 따라 측정된 슬러그 길이의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 Park 등[5], Nakamura 등[6]의 결과와 마찬가지로 측정높이가 증가함에 따라 슬러그의 합체에 의해 슬러그 길이가 증가하였다. 그림에서 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라

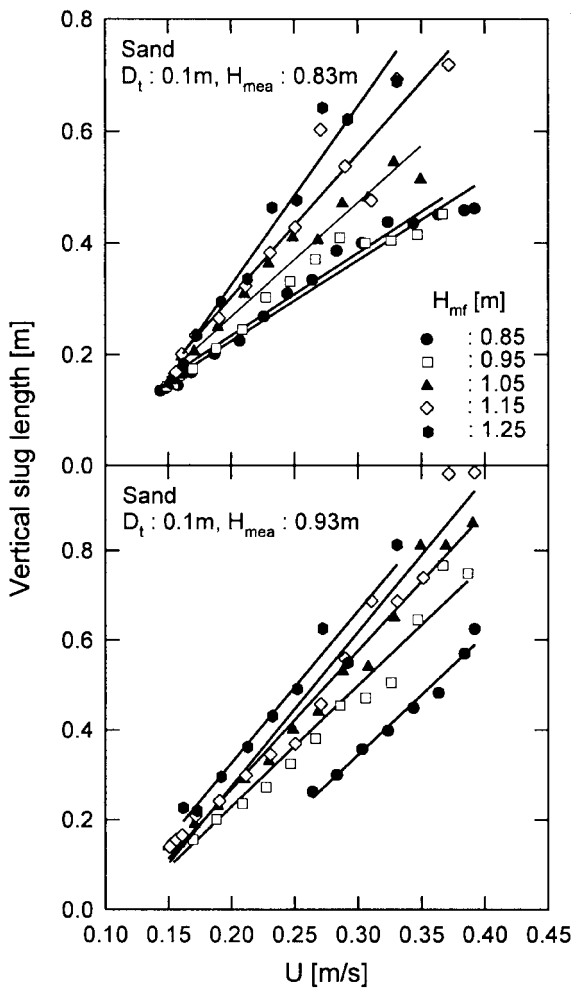


Fig. 1. Effects of gas velocity and bed height at minimum fluidization on vertical slug length.

높이변화에 따른 슬러그 길이의 변화가 둔화되었는데, 이와 같은 경향은 Baeyens와 Geldart[26]가 고려한 분산판으로부터의 높이변화에 따른 슬러그 영역을 고려하여 해석할 수 있다. 즉, 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 슬러그 길이가 증가하여 슬러그간의 제한적인 합체가 일어나는 영역(zone II)에서 더 이상 슬러그간의 합체가 일어나지 않는 영역(zone III)으로 이동하기 때문에 높이변화에 따른 슬러그 길이의 변화가 둔화되는 것으로 사료되었다.

Fig. 2(b)는 층직경 0.055, 0.1 m에서 FCC A(0.082 mm), 층직경 0.055 m에서 모래(0.286 mm) 입자를 충물질로 사용한 경우에 유속과 분산판으로부터의 높이변화에 따라 측정된 슬러그 길이의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 층직경과 입자특성이 변화할 때에도 유속과 분산판으로부터의 높이가 증가함에 따라 슬러그 길이가 증가하는 경향을 나타내었다.

3-1-3. 슬러그 길이: 층직경과 입자특성의 영향

Fig. 3(a)는 유속과 층직경의 변화에 따라 측정된 슬러그 길이의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 유속에서 슬러그 길이는 층직경이 증가함에 따라 감소하였으며 Luca 등[3], Lee[4]의 결과와 유사하였다. 이와 같은 경향은 앞서 보고에서 살펴본 바와 같이 주어진 유속에서 층직경이 증가함에 따라 슬러그 빈도가 증가하므로 슬러그 길이는 감소하는 것으로 사료되었다. Fig. 3(b)는 층직경 0.055 m에서 분산판으로부터의 높이 0.38, 0.58 m일 때 입자특성 변화에 따라 측정된 슬러그 길이의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 확측은 과잉기체속도

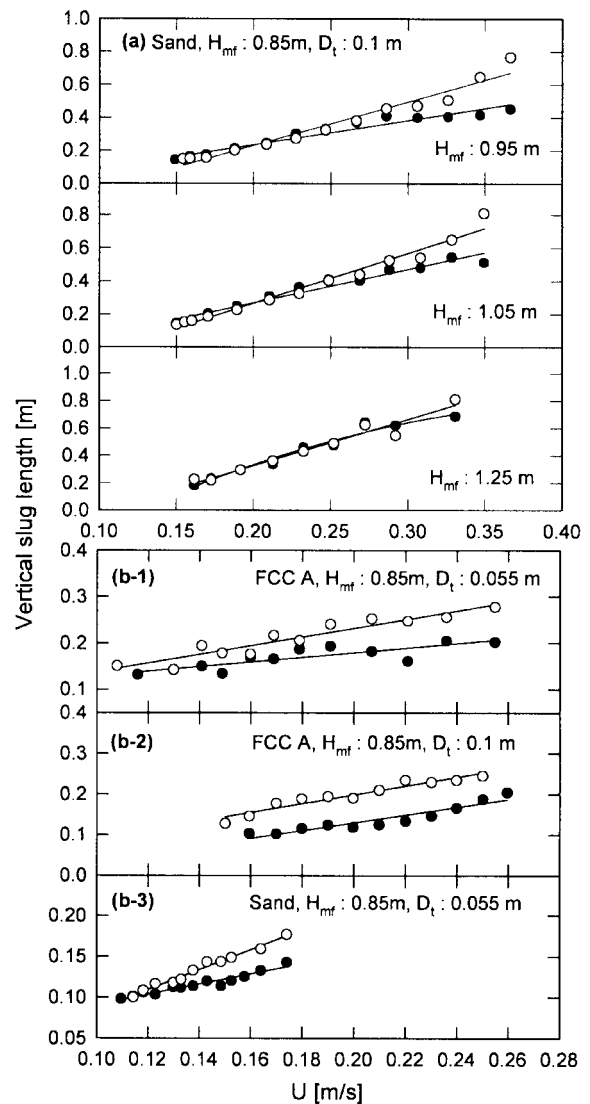


Fig. 2. Effect of height from the distributor plate on vertical slug length.

(a) ●, $H_{mea}=0.83\text{ m}$, ○, $H_{mea}=0.93$, (b-1) ●, $H_{mea}=0.38\text{ m}$, ○, $H_{mea}=0.58$, (b-2) ●, $H_{mea}=0.43\text{ m}$, ○, $H_{mea}=0.60$, (b-3) ●, $H_{mea}=0.38\text{ m}$, ○, $H_{mea}=0.58$.

($U-U_{mf}$)로 표시하였다. 그림에 나타난 과잉기체속도 변화에 따른 슬러그 길이의 증가 추이를 고려하면 동일한 과잉기체속도에서 모래입자가 FCC에 비해 슬러그 길이가 크게 나타났다. 이와 같은 경향은 Geldart 분류 A 입자계의 경우 기포의 합체효과와 함께 분쇄효과도 작용하기 때문으로 사료되었다.

3-2. 슬러그 상승속도

3-2-1. 슬러그 상승속도: 유속과 최소유동화상태의 층높이 영향

Fig. 4는 층직경 0.1 m에서 모래(0.286 mm) 입자에 대하여 2개의 차압형 압력변환기를 각각 0.85-0.90 m, 0.95-1.00 m(평균높이 0.93 m)에 연결한 경우에 유속과 최소유동화상태의 층높이 변화에 따라 측정된 슬러그 상승속도의 변화를 나타내고 있다. Nakamura 등[6]은 슬러그 상승속도가 슬러그 길이에 영향을 받으며 슬러그 길이의 0.5승에 비례한다고 보고한 바 있다. 본 연구에서 측정된 슬러그 상승속도는 Nakamura 등[6]의 결과와 마찬가지로 슬러그 길이의 변화와 유사한 경향을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 유속이 증가함에 따라 과잉기체량($U-U_{mf}$)

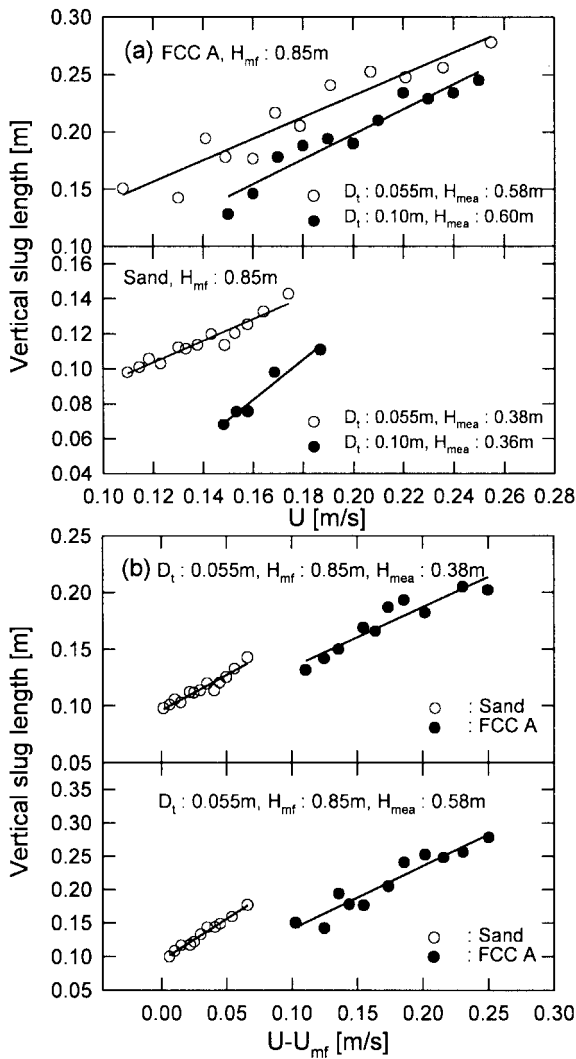


Fig. 3. Effects of column diameter and particle properties on vertical slug length.

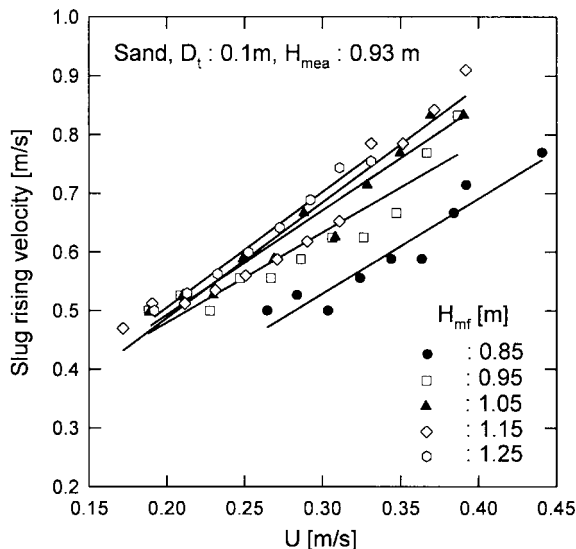


Fig. 4. Effects of gas velocity and bed height at minimum fluidization on slug rising velocity.

U_{mf})이 증가하고 슬러그 길이가 증가하므로 슬러그 상승속도가 증가하였으며 이러한 경향은 Lanneau[10], Nicklin 등[13], Ormiston 등[14], Matsen 등[15], Kehoe와 Davidson[16], Carotenuto 등[17], Nakamura 등[6], Thiel과 Potter[7], Fan 등[18], Ho 등[23], Dry 등[19], Shichun 등[9], Lee와 Kim[21, 24], Clark 등[22], Lee[4]의 보고와 유사하였다. 한편 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 슬러그 크기가 증가하여 슬러그 상승속도가 증가하였는데, 이러한 경향은 Lee[4]의 결과와 유사한 반면 Clark 등[22]의 결과와는 반대의 경향을 나타내었다. 하지만 Clark 등[22]의 보고에서 나타난 슬러그의 형태는 square-nose slug이며, 이러한 경우에는 슬러그가 충전면 전체를 차지하고 상승하며 슬러그 위쪽에 존재하는 고정층(고정층 높이)이 증가함에 따라 슬러그에 작용하는 중력의 영향이 증가하므로 고정층 높이가 증가함에 따라 슬러그 상승속도가 감소하는 것으로 사료되었다. 결과적으로 round-nose slug의 경우에는 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 슬러그 상승속도가 증가하는 것으로 고려하는 것이 적절한 것으로 사료되었다.

3-2-2. 슬러그 상승속도: 분산판으로부터의 높이 영향

Fig. 5(a)는 최소유동화상태의 층높이가 각각 1.05, 1.15 m인 경우에 유속과 측정높이(평균높이 0.83, 0.93 m)의 변화에 따라 측정된 슬러그 상승속도의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 슬러그 상승속도는 측정높이가 증가함에 따라 슬러그의 크기 증가로 인해 증가하였다. 한편 슬러그 길이 및 슬러그 빈도의 경우와 마찬가지로 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 측정지점의 높이변화에 따른 슬러그

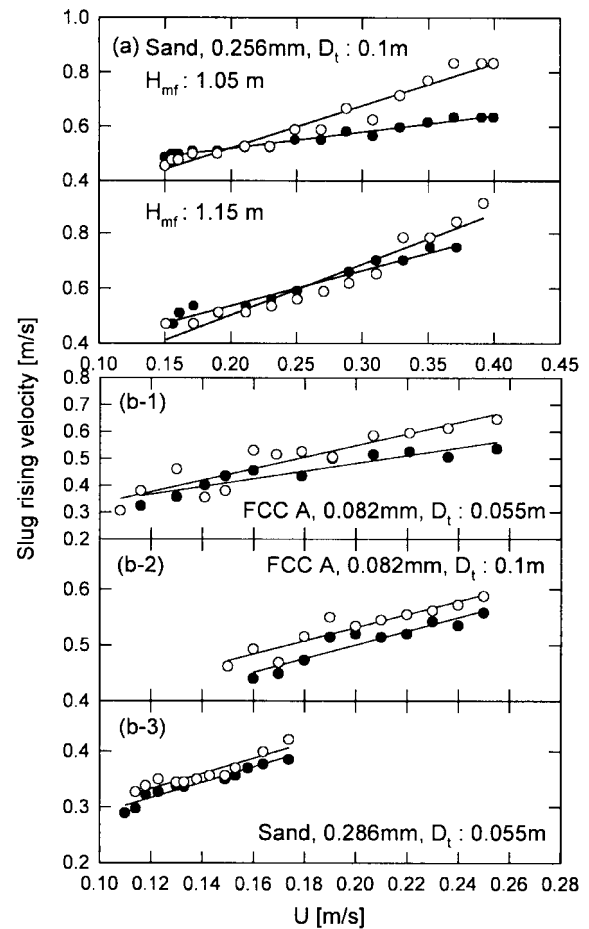


Fig. 5. Effect of height from the distributor plate on slug rising velocity.

(a) ●, $H_{mea} = 0.83$ m, ○, $H_{mea} = 0.93$ m, (b-1) ●, $H_{mea} = 0.38$ m, ○, $H_{mea} = 0.58$ m, (b-2) ●, $H_{mea} = 0.43$ m, ○, $H_{mea} = 0.60$ m, (b-3) ●, $H_{mea} = 0.38$ m, ○, $H_{mea} = 0.58$ m.

그 상승속도의 변화가 둔화되었으며, 이는 앞서 살펴본 바와 같이 최소 유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 측정높이 변화에 따른 슬러그 길이의 변화가 둔화되기 때문으로 사료되었다.

Fig. 5(b)는 층직경 0.1, 0.055 m에서 FCC A(0.082 mm), 층직경 0.055 m에서 모래(0.286 mm) 입자를 층물질로 사용한 경우에 유속과 분산판으로부터의 높이변화에 따라 측정된 슬러그 상승속도의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 층직경과 입자특성이 변화할 때에도 분산판으로부터의 높이가 증가함에 따라 슬러그 상승속도가 증가하는 경향을 나타내었다.

본 연구에서 관찰된 슬러그의 형태는 Noordergraaf 등[27]의 기준으로 분류하면 round-nose slug였으며 그들의 보고에 나타난 바와 같이 슬러그 상승속도가 유속보다 크게 나타났다.

3-2-3. 슬러그 상승속도: 층직경과 입자특성의 영향

Fig. 6(a)는 층직경 0.055 m와 0.10 m에서 FCC A(평균입경 0.082 mm)를 층물질로 사용하여 유속과 층직경 변화에 따라 측정된 슬러그 상승속도의 변화를 나타내고 있다. Lanneau[10], Nicklin 등[13], Ormiston 등[14], Matsen 등[15], Kehoe와 Davidson[16], Carotenuto 등[17], Nakamura 등[6], Thiel과 Potter[7], Fan 등[18], Dry 등[19], Satija와 Fan[20], Shichun 등[9], Lee와 Kim[21], Clark 등[22], Lee[4] 등은 층직경이 증가함에 따라 슬러그 상승속도가 증가하는 것으로 보고한 바 있다. 그림에 나타난 바와 같이 측정된 슬러그 상승속도는 층직경이 증가함에 따라 다소 증가하였으나 영향이 작게 나타났다. 이와 같은 경향은 본 실험의 층직경 변화범위(0.055, 0.1 m)가 비교적 작기 때문으로 사료되었다.

Fig. 6(b)는 층직경 0.055 m에서 분산판으로부터의 높이 0.38 m일 때 입자특성 변화에 따라 측정된 슬러그 상승속도의 변화를 나타내고 있

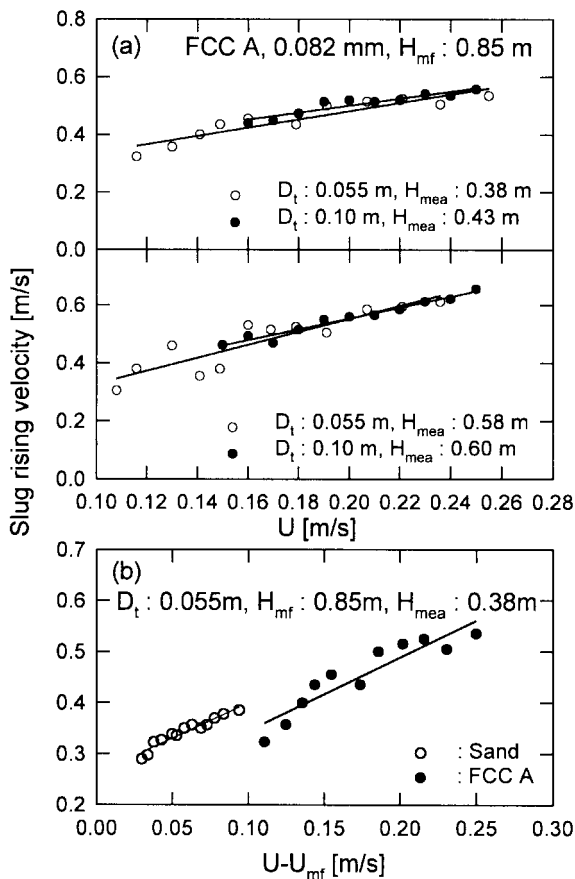


Fig. 6. Effects of column diameter and particle properties on slug rising velocity.

다. 그림에서 횡축은 과잉기체속도($U-U_{mf}$)로 표시하였다. 그림에 나타난 과잉기체속도 변화에 따른 슬러그 상승속도의 증가 추이를 고려하면 동일한 과잉기체속도에서 모래입자가 FCC에 비해 슬러그 상승속도가 크게 나타났다. 이와 같은 경향은 Geldart 분류 A 입자계의 경우 기포의 합체효과와 함께 분쇄효과도 작용하여 Geldart 분류 B 입자계의 경우가 슬러그 길이가 더 크기 때문에 슬러그 상승속도가 더 크게 나타나는 것으로 사료되었다.

3-3. 기존 상관식과의 비교

지금까지 여러 연구자들에 의해 슬러그 길이와 슬러그 상승속도를 예측하기 위한 상관식들이 제시되어져 왔다. 하지만 이러한 상관식들의 대부분은 기존의 실험자료를 기반으로 제시된 실험적인 상관식으로서 다른 실험조건에서의 적용가능 여부가 불분명하고 상관식에 고려되지 않은 변수들에 대해서는 그 변화경향을 예측할 수 없는 단점이 있다. 또한 슬러그 상승속도에 대한 상관식의 경우 슬러그의 형태(round-nose slug, square-nose slug)에 따라 각 변수의 영향이 다르게 나타날 수 있다. 결과적으로 각 상관식의 비교를 통해 여러 변수들의 영향에 대한 예측 가능성과 상관식의 정확성에 대한 검토가 필요하다.

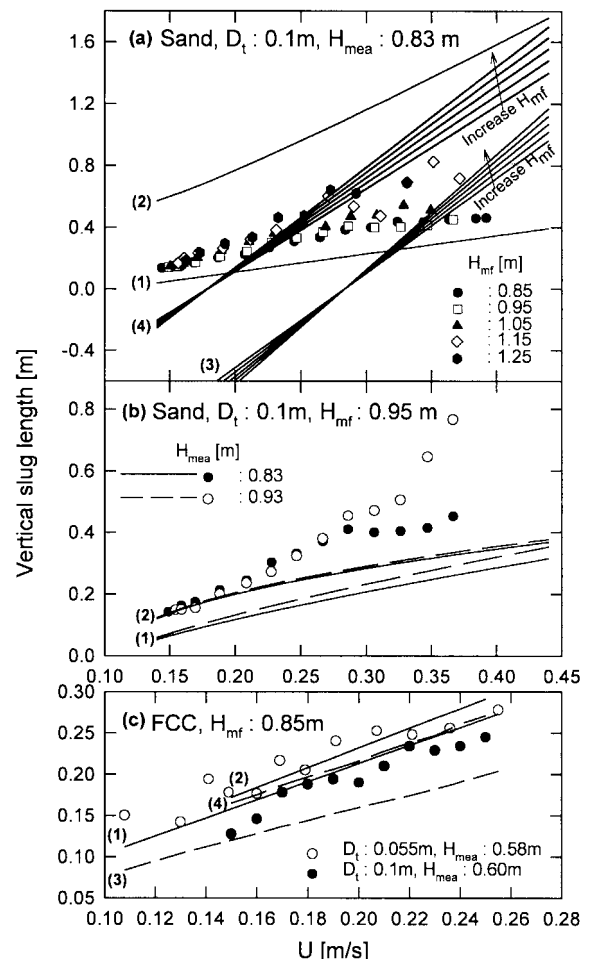


Fig. 7. Comparison between measured vertical slug length and calculated values by previous correlations.

Symbols: measured values, lines: calculated values. (a) (1) Matsen et al.[1], (2) Shichun et al.[9], (3) Luca et al.[3], (4) Lee[4], (b) (1) Park et al.[5], (2) Nakamura et al.[6], (c) Matsen et al.[1], (1): $D_t=0.055$ m, (2): $D_t=0.1$ m, Hovmand and Davidson[12], (3): $D_t=0.055$ m, (4): $D_t=0.1$ m.

Fig. 7은 본 연구에서 측정된 슬러그 길이와 기존 상관식들에 의해 계산된 값을 비교하여 나타내고 있다. Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이 Luca 등[3], Lee[4]의 상관식에 의해 계산된 슬러그 길이는 최소유동화상태의 층높이 증가에 따른 슬러그 길이의 증가경향은 예측할 수 있었으나 유속변화에 따른 슬러그 길이의 증가 기울기가 측정값에 비해 다소 크게 나타났으며 식의 형태상 슬러그 길이가 음(-)인 경우도 존재하였고 측정높이의 변화에 따른 슬러그 길이의 변화경향을 예측할 수 없었다. Matsen 등[1], Shichun 등[9]의 상관식은 최소유동화상태의 층높이에 따른 슬러그 길이의 증가경향을 예측할 수 없었다. Fig. 7(b)는 슬러그 길이에 미치는 측정높이의 영향을 고려한 Park 등[5]과 Nakamura 등[6]의 상관식과 본 연구에서 측정된 슬러그 길이와의 비교를 나타내고 있다. 그들의 상관식은 높이 증가에 따른 슬러그 길이의 증가경향을 나타낼 수 있었으나 측정값에 비해 작게 예측되었고 최소유동화상태의 층높이 변화에 따른 슬러그 길이의 변화경향을 나타낼 수 없었다. Fig. 7(c)는 슬러그 길이에 미치는 층직경의 영향을 고려한 Matsen 등[1], Hovmand과 Davidson[12]의 상관식과의 비교를 나타내고 있다. 기존 상관식들중 Luca 등[3], Lee[4]의 상관식도 층직경의 영향을 고려하였으나 Luca 등[3]의 상관식은 슬러그 길이가 음수(-)인 경우가 존재하였고 Lee[4]의 상관식은 측정값에 비해 과도하게 예측되어 그림에서 제외하였다. 이와 같이 Lee[4]의 상관식이 본 연구의 실험결과에 비해 슬러그 길이가 과도하게 예측되는 이유는 그들의 상관식이 Geldart 분류 D 입자계에 속하는 고분자 입자를 사용하여 실험한 결과를 바탕으로 제시되었기 때문으로 사료되었다. Fig. 7(c)에 나타난 바와 같이 Matsen 등[1], Hovmand과 Davidson[12]의 상관식은 본 실험결과와는 반대로 층직경이 증가함에 따라 슬러그 길이가 증가하는 것으로 예측하였다. 같은 과잉기체유속에서 입자특성 변화에 따른 슬러그 길이의 변화에 대해서는 Table 3에 나타난 바와 같이 대부분의 상관식이($U-U_{mf}$)의 항만을 고려하여 동일한 과잉기체유속에서 입자특성이 변하더라도 슬러그 길이의 변화가 없는 것으로 예측되며 Park 등[5]의 상관식은 FCC 입자의 최소유동화속도가 작으므로 본 실험결과와는 반대로 모래입자에 비해 FCC 입자의 슬러그 길이가 크게 예측된다.

Fig. 8은 본 연구에서 측정된 슬러그 상승속도와 기존 상관식들에 의해 계산된 값을 비교하여 나타내고 있다. Fig. 8(a)에 나타난 바와 같이 Lee[4]의 상관식은 측정값에 비해 작게 예측되었으며 Dry 등[19]의 상관식은 측정값에 비해 다소 크게 예측되었다. 한편 Fig. 8(a)에 나타난 상관식들은 슬러그 상승속도에 미치는 측정높이와 최소유동화상태의 층높이의 영향을 나타낼 수 없었다. Fig. 8(b)는 슬러그 상승속도에 미치는 최소유동화상태의 층높이의 영향을 고려한 Clark 등[22]의 상관식에 의해 계산된 값과 측정값과의 비교를 나타내고 있다. Clark 등[22]의 상관식을 계산할 경우 U^* 는 H_m 에 선형적으로 비례하는 것으로 고려하여 계산하였다. 그들의 상관식에 의해 계산된 슬러그 상승속도는 유속 증가에 따른 슬러그 상승속도의 기울기가 본 연구의 측정값과 유사하였으나 측정값에 비해 작게 예측되었다. 한편 그들의 상관식에 의한 예측값은 측정값과 반대로 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 슬러그 상승속도가 감소하는 것으로 나타났으며 슬러그 상승속도에 미치는 측정높이의 영향을 고려할 수 없었다. 본 실험에서 측정된 슬러그 상승속도는 층직경이 증가함에 따라 다소 증가하는 것으로 나타났으며 Table 4에 나타난 대부분의 상관식들이 본 실험결과와 유사하게 층직경이 증가함에 따라 슬러그 상승속도가 증가하는 것으로 예측되었으나 Nakamura 등[6]의 상관식의 경우 층직경이 증가함에 따라 슬러그 길이가 감소하므로 슬러그 상승속도도 감소하는 것으로 예측되었다. 한편 슬러그 상승속도에 미치는 입자특성의 영향의 경우 대부분의 상관식들이 ($U-U_{mf}$)만을 고려하여 동일한 과잉기체유속에서 입자특성 변화에 따른 슬러그 상승속도의 변화를 예측할 수 없었으나 슬러그 길이의 영향을 고려한 Nakamura 등[6]의 상관식의 경우 본 실험결과와 유사하게

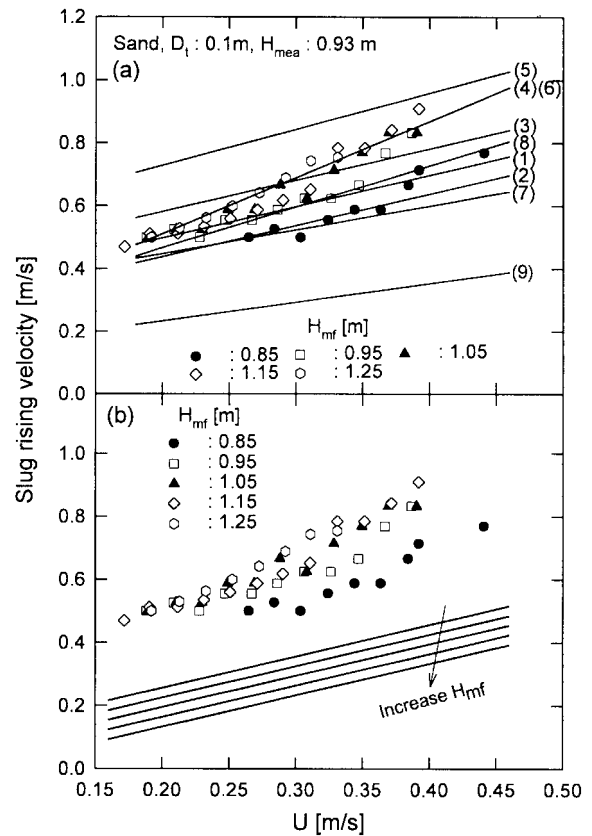


Fig. 8. Comparison between measured slug rising velocity and calculated values by previous correlations.

Symbols: measured values, lines: calculated values. (a) (1) Lanneau [10], (2) Nicklin et al. [13]-angular slug, (3) Nicklin et al. [13]-axial slug, (4) Fan et al. [18], (5) Dry et al. [19], (6) Satija and Fan [20], (7) Shichun et al. [9], (8) Lee and Kim [21], (9) Lee [4]. (b) Clark et al. [22].

동일한 과잉기체유속에서 모래의 슬러그 상승속도가 FCC에 비해 크게 예측되었다. 한편 입자크기와 입자밀도의 영향을 고려한 Fan 등[18], Satija and Fan [20], Lee와 Kim [21]의 상관식은 본 실험결과와는 반대로 동일한 과잉기체유속에서 FCC의 슬러그 상승속도가 모래에 비해 크게 예측되었는데, 이는 그들이 사용한 입자는 주로 Geldart 분류 D 입자계에 속하는 입자들이어서 입자크기와 입자밀도가 증가함에 따라 square-nose slug의 형태를 갖게 되어 슬러그 상승속도가 감소하는 것으로 예측된다.

슬러그 길이와 슬러그 상승속도에 대한 기존의 상관식을 재고하면 대부분의 상관식들이 슬러그 길이와 슬러그 상승속도에 미치는 유속, 측정높이, 최소유동화상태의 층높이, 층직경 및 입자특성의 영향을 종합적으로 고려하기에는 미흡하였다. 따라서 슬러그 길이와 슬러그 상승속도에 미치는 여러 변수들의 영향에 대한 추가적인 실험 및 고찰과 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) 슬러그 길이는 유속, 측정높이와 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 증가하였으나 층직경이 증가함에 따라 감소하였다.

(2) 슬러그 상승속도는 유속, 측정높이와 최소유동화상태의 층높이가 증가함에 따라 증가하였으며 층직경이 증가함에 따라 다소 증가하는 경향을 나타내었다.

(3) 동일한 과잉기체속도에서 슬러그 길이와 슬러그 상승속도는 Geldart 분류 B 입자계에 속하는 모래입자의 경우가 크게 나타났다.

(4) 문헌에 보고된 슬러그 길이와 슬러그 상승속도에 관한 상관식들은 유속, 분산관으로부터의 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

B_L	: contact time between slug and lower couple of pressure taps [s]
B_m	: average contact time between slug and pressure taps [s]
B_U	: contact time between slug and upper couple of pressure taps [s]
d_{avg}	: average height of $H_{U,avg}$ and $H_{L,avg}$ [m]
d_p	: particle diameter [mm]
\bar{d}_p	: mean particle diameter [mm]
D_t	: column diameter [m]
g	: gravitational acceleration, 9.8 [m/s ²]
H	: height above distributor [m]
$H_{L,avg}$: average height of lower couple of pressure taps [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]
$H_{U,avg}$: average height of upper couple of pressure taps [m]
l_n	: lag number [-]
L_s	: average vertical slug length [m]
n	: number of data [-]
N	: number of pressure fluctuation signal [-]
U	: superficial gas velocity [m/s]
U^*	: dimensionless measure of particle velocity, $U[\rho_g^2/\mu(\rho_p-\rho_g)g]^{1/3}$ [-]
U_{mf}	: minimum fluidizing velocity [m/s]
U_s	: slug rising velocity [m/s]
x_n	: n-th value of pressure signal [mmH ₂ O]
y_{n+ln}	: n+ l_n -th value of pressure signal [mmH ₂ O]

그리스 문자

ϕ_{xy}	: cross-correlation function between x(t) and y(t+ τ) [mmH ₂ O ²]
ϕ_s	: sphericity of particle [-]
ρ_g	: gas density [kg/m ³]
ρ_p	: apparent particle density [kg/m ³]
τ_m	: average time delay between upper and lower signal [s]

참고문헌

1. Matsen, J. M. and Tarmy, B. L.: *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, **66**(1), 1(1970).
2. Hovmand, S., Freedman, W. and Davidson, J. F.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **49**, 149(1971).
3. Luca, L. De, Felice, R. Di. and Foscolo, P. U.: *Powder Technol.*, **69**, 171(1992).
4. Lee, S. H.: Master Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejeon, Korea(1997).
5. Park, W. H., Kang, W. K., Capes, C. E. and Osberg, G. L.: *Chem. Eng. Sci.*, **24**, 851(1969).
6. Nakamura, K., Masaaki, G. H. H. and Katsuhiko H.: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **2**(6), 577(1976).
7. Thiel, W. J. and Potter, O. E.: *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **16**, 242(1977).
8. Donsi, G., Lancia, A., Massimilla, L. and Volpicelli, G.: in "Fluidization IV", Kunii, D. and Toei, R., eds, Engineering Foundation, 347 (1983).
9. Shichun, C., Heling, Z. and Feichen, J.: in "Fluidization", Kwauk, M. and Kunii, D., eds., Elsevier, Amsterdam, 75(1985).
10. Lanneau, K. P.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **38**, 125(1960).
11. King, D. F. and Harrison, D.: in "Fluidization", Grace, J. R. and Matsen, J. M., eds, Plenum Press, New York, 101(1980).
12. Hovmand, S. and Davidson, J. F.: in "Fluidization", Davidson, J. F. and Harrison, D., eds., Academic Press, Yorkshire, 193(1971).
13. Nicklin, D. J., Wilkes, J. O. and Davidson, J. F.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **40**, 61(1962).
14. Ormiston, R. M., Mitchell, F. R. G. and Davidson, J. F.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **43**, T209(1965).
15. Matsen, J. M., Hovmand, S. and Davidson, J. F.: *Chem. Eng. Sci.*, **24**(12), 1743(1969).
16. Kehoe, P. W. K. and Davidson, J. F.: *Inst. Chem. Eng. Symp. Ser.*, No. 33, Butterworth-Heinemann, Australia, Melbourne, 97(1971).
17. Carotenuto, L., Crescitelli, S. and Donsi, G.: *Quad. Ing. Chim. Ital.*, **10**(12), 185(1974).
18. Fan, L. T., Ho, T. C. and Walawender, W. P.: *AIChE J.*, **29**, 33(1983).
19. Dry, R. J., Judd, M. R. and Shingles, T.: *Powder Technology*, **39**, 69 (1984).
20. Satija, S. and Fan, L. S.: *AIChE J.*, **31**, 1554(1985).
21. Lee, G. S. and Kim, S. D.: *Korean J. Chem. Eng.*, **6**, 15(1989).
22. Clark, N. N., McKenzie, E. A. and Gautam, M.: *Powder Technology*, **67**, 187(1991).
23. Ho, T. H., Yutani, N., Fan, L. T. and Walawender, W. P.: *Powder Technol.*, **35**, 249(1983).
24. Lee, G. S. and Kim, S. D.: *Korean J. Chem. Eng.*, **6**, 338(1989).
25. Ryu, H. J., Choi, J. H., Yi, C. K., Shun, D. W., Son, J. E. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **37**, 472(1999).
26. Baeyens, J. and Geldart, D.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 255(1974).
27. Noordergraaf, I. W., Van Dijk, A. and Van Den Bleek, C. M.: *Powder Technology*, **52**, 59(1987).