

기체 유동층에서 슬러그 특성에 대한 온도의 영향

김태우 · 문영섭 · 최정후[†] · 김상돈* · 손재익**

건국대학교 화학공학과

*한국과학기술원 화학공학과

**한국에너지기술연구원

(2001년 5월 15일 접수, 2001년 7월 24일 채택)

Temperature Effect on the Slug Properties in a Gas Fluidized Bed

Tae-Woo Kim, Young-Sub Moon, Jeong-Hoo Choi[†], Sang-Don Kim* and Jae-Ek Son**

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

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

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

(Received 15 May 2001; accepted 24 July 2001)

요 약

기체 유동층에서 최소 슬러깅 속도와 슬러그 특성에 미치는 층 온도의 영향을 조사하기 위하여 전기로 가열되는 고온 유동층(0.1 m i.d., 2.1 m height, 12 kw)에서 FCC 입자(평균 입경 0.071 mm, 입자 밀도 1,600 kg/m³)를 사용하여 유속, 층 온도의 변화에 따른 최소 슬러깅 속도와 슬러그 특성(슬러그 상승 속도, 슬러그 길이, 슬러그 빈도)을 측정 및 고찰하였다. 유동화 기체로는 공기를 사용하였다. 기체 유속은 최소 유동화 속도로부터 0.15 m/s까지, 층 온도는 25 °C부터 400 °C까지 변화되었다. 기포 혹은 슬러그 특성은 각각 2개의 인접한 압력점들이 연결되는 두 개의 차압 변환기를 이용하는 차압법으로 측정하였다. 층 온도가 증가함에 따라 최소 슬러깅 속도와 슬러그 길이는 증가하였으며, 슬러그 빈도는 감소하는 경향을 나타내었다. 슬러그 상승 속도는 층 온도가 증가함에 따라 증가하였으며, 층 온도가 고려된 슬러그 상승 속도에 관한 상관식을 제시하였다.

Abstract – In order to understand the effect of temperature on slug properties, the onset velocity of slugging and slug properties(slug rising velocity, slug length, slug frequency) have been measured with variations of gas velocity and temperature in a electrically heated gas fluidized bed(0.1 m i.d., 2.1 m height, 12 kw). Air was used as fluidizing gas and FCC particle(specific surface mean diameter: 0.071 mm, apparent density: 1,600 kg/m³) as bed material. The gas velocity was varied from minimum fluidizing velocity to 0.15 m/s and the bed temperature from 25 °C to 400 °C. The bubble or slug properties were measured with the differential pressure method using two differential pressure transducers connected with a couple of adjacent pressure taps, respectively. As the bed temperature increased, the minimum slugging velocity, slug rising velocity, and slug length increased whereas the slug frequency decreased. A correlation for the slug rising velocity, which expresses the effect of bed temperature, was proposed.

Key words: Temperature, Slug, Properties, Gas, Fluidized-Bed

1. 서 론

기체 유동층의 분산판에서 생성된 기포는 상승하면서 서로의 충돌에 의해서 합체되어 성장하며, 유속이 증가함에 따라 기포 크기가 증가하여 마침내 기포의 직경이 층 직경과 같아지는 현상을 보이는데, 이를 슬러깅(slugging)이라 하며 발생한 기포의 형태를 슬러그(slug)라고 한다. 슬러깅 유동층 영역에서는 기포 유동층에 비해 층의 균일한 혼합이

저하되어 반응기 성능의 저하가 초래되며, 대형 유동층 반응기의 경우에는 슬러그가 층을 통과하면서 일어나는 압력 요동에 의해 반응기 설비에 기계적인 충격이 가해지는 중요한 단점이 있다. 한편 공정 개발 단계에서 사용되는 실험실 규모부터 pilot 규모에 해당하는 소규모 유동층에서는 슬러깅 영역이 흔히 형성된다. 결과적으로 상용 유동층 반응기에서 슬러깅의 발생을 방지하기 위해서 혹은 개발된 소규모 유동층 반응기의 적절한 scaleup을 위해서는 슬러깅 영역의 흐름 특성에 대한 이해가 매우 중요하다.

슬러깅 영역의 흐름 특성에 대한 이해는 기본적으로 슬러깅 현상의 시작 속도, 슬러그 빈도, 슬러그 길이, 슬러그 상승속도 등의 슬러그 특

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

성치에 대한 해석을 의미한다. 한편 슬러깅 영역에 대한 기존의 보고는 거의 상온에서 연구 결과이며, 실제 반응기에 적용될 수 있는 고온 영역에서 보고된 실험 자료는 극히 부족하다. 따라서 최소 슬러깅 속도 및 슬러깅 특성에 미치는 온도의 영향을 보다 분명하게 규명하는, 실제 반응기 조건에 적용될 수 있는 실험자료의 축적과 해석이 필요하다.

최소 슬러깅 속도는 유속이 증가함에 따라 기포 혹은 슬러그 빈도가 증가하여 최대 값을 보인 후 감소하기 시작하는 유속으로 정한다[1-3]. 최소 슬러깅 속도에 대해서 보고된 연구는 Fatah와 Flamant[2]의 연구를 제외하면 모두 상온에서 입자특성, 층 직경, 측정 높이의 영향에 대해서 수행되었다[1, 3-7]. Fatah와 Flamant[2]는 직경 0.1 m의 유동층에서 입자 크기 1.18-3.57 mm, 입자 밀도 3,950 kg/m³의 입자(Geldart classification, D)를 사용하여 20-700 °C의 온도 변화에 따른 최소 슬러깅 속도의 변화를 측정하였고 온도가 증가함에 따라 최소 슬러깅 속도가 감소하는 것으로 보고하였다.

슬러그 빈도에 대해서 보고된 연구는 대부분 상온에서 입자특성, 층 직경, 유동층 높이, 측정 높이, 유속, 기체 분배기의 영향에 대해서 수행되었다[1, 3, 7-14]. 슬러그 상승 속도에 대한 기존의 연구도 주로 상온에서 유속, 입자 특성, 층 직경, 유동층 높이 등의 변수를 고려하였으며 [9-11, 13-19], 슬러그 길이에 대한 기존의 연구도 주로 상온에서 유속, 입도, 층 직경, 측정 높이, 유동층 높이 등의 영향을 고려하였다[7, 9, 11, 13, 20-22]. 따라서 슬러그 빈도, 상승 속도, 길이에 관한 기존의 상관식에서 온도의 영향은 공통적으로 최소 유동화 속도의 항으로만 고려될 수 있는 정도이다.

본 연구는 실제 유동층 반응기의 조업 조건인 고온 영역에서 최소 슬러깅 속도와 슬러그 특성에 대한 온도의 영향을 고찰하는 것을 목적으로 수행되었다. 슬러깅 유동층 영역에서 온도와 유속에 따른 최소 슬러깅 속도와 슬러그 특성(슬러그 길이, 슬러그 빈도, 슬러그 상승 속도)의 변화에 대한 실험적 고찰을 수행하였다.

2. 실험

본 연구에 사용된 유동층 실험 장치의 개략적인 흐름도는 Fig. 1에 나타나 있다. 유동층은 내경 0.1 m, 두께 0.006 m인 스테인레스(SUS 316) 관으로 제작되었으며, 높이 0.5 m×2 ea, 0.58 m, 0.38 m, 0.04 m 각 1 개를 플랜지로 연결하여 총 높이가 2.1 m가 되도록 하였다. 층 가열 장치는 용량 6 kw(Max. 800 °C) 규격을 갖는 원통형 매몰히터 2개를 사용하였으며, 유동층의 열 손실을 최소화하기 위해서 유동층의 외벽은 ceramic wool(두께 150 mm)로 단열하였다. 유동화 기체는 plenum(SUS 316)에 위치한 수평관(32 mm-I.D.)으로 주입되도록 하였다. 분배기(distributor)는 multi-tuyere 형으로 직경 20 mm tuyere 4개에 각각 3 mm 오리피스 12개를 배치하였으며 입자의 통과를 방지하기 위해 체(ASTM 200 mesh)를 깔았다.

기체 출구(0.05 m I.D.)는 분산판으로부터 1.97 m 높이에 위치하며, 기체는 직렬로 연결된 1, 2차 사이클론(standard proportion: 각각의 내경은 0.1, 0.075 m)과 백필터(상업용 Nomex filter)를 거쳐서 대기로 배출되도록 하였다. 유동화 기체로는 공기가 사용되었으며, 75 Nm³/h(15 hp)의 용량을 갖는 압축기로 공급되고, 압력 조절기(regulator)와 수분 제거용 prefilter를 거친 후, 유량계(10, 1, 0.12 Nm³/hr)로 정량되어 유동층에 공급되었다.

유동층의 축 방향 압력 분포를 측정하기 위해 분산판으로부터 14개(-0.05,

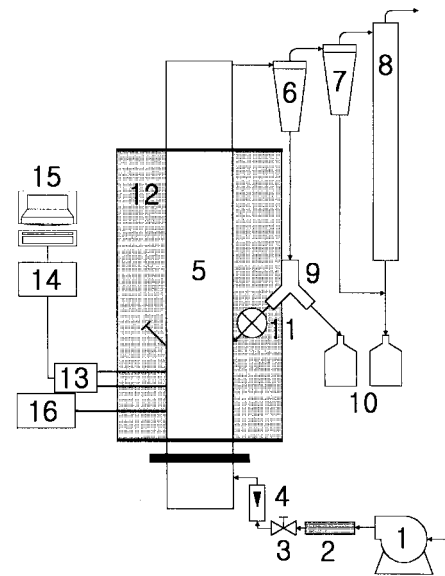


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup.

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Air compressor | 9. Diverter |
| 2. Filter | 10. Sample pot |
| 3. Pressure regulator | 11. Rotary valve |
| 4. Flowmeter | 12. Heater |
| 5. Electrically heated fluidized bed | 13. Differential pressure transducer |
| 6. Cyclone 1 | 14. A/D converter |
| 7. Cyclone 2 | 15. Personal computer |
| 8. Bag filter | 16. Data logger |

0.02, 0.10, 0.15, 0.24, 0.29, 0.335, 0.385, 0.48, 0.53, 0.58, 0.835, 1.29, 1.97 m)의 압력점을 두고 압력 변환기와 연결하였다. 축 방향 온도 분포는 분배기로부터 높이 -0.05, 0.02, 0.10, 0.53, 0.84, 1.29, 1.97 m에 설치된 K-형(chromel-alumel) 열전대(thermocouple)와 datalogger(Molytech, Model 2702)에 의해서 연속적으로 측정되었다. 유동층에 설치된 압력점에서의 압력 신호는 차압형 압력 변환기(differential pressure transducer, Validyne, Model P24D; ± 1400 , ± 560 , ± 200 , ± 100 mmH₂O)를 사용하여 전압(-5 V~+5V)-시간 신호로 바꾸어 자료 수집계(data acquisition system, real time devices Inc. Model AD2110)를 거쳐서 PC에 저장되었다. 압력 요동 신호는 100 Hz의 주파수로 100초 동안 10,000개의 자료를 수집하였다. 유동화 상태에서 유동층 내부의 압력 분포가 안정되고, 층 내 온도 분포가 일정한 실험 조건에 도달되었을 때를 유동층의 정상 상태로 간주하였다.

유동층내 입자의 고정층 높이는 0.8 m로 유지되었다. 층 물질로는 반응하지 않은 FCC 입자를 사용하였으며, 입자의 apparent density는 1,600 kg/m³, bulk density는 847 kg/m³이었다. 투명한 아크릴 상온 유동층에서 측정된 최소 유동화 상태에서 층 공극률은 0.47이었다. 입도 분포는 주로 0.15 mm 이하로 입도별 무게 분율을 고려한 비표면적 평균 입도(specific surface mean diameter)는 0.071 mm이었다. Geldart 분류에 의하면 A 입자에 해당하였다. Table 1은 FCC 입자의 입도 분포를 나타낸다.

Baeyens와 Geldart[1]의 상관식에 의하면 본 실험의 유동층에서 슬러그가 생성되는 높이는 분산판으로부터 0.19 m이고, 합체에 의한 성장이 무더진 안정적인 슬러그가 형성되는 높이는 0.8 m이며, 높이 0.19 m부터 0.8 m까지는 슬러그가 합체에 의해서 성장하는 영역이다. 본 실험에

Table 1. Size distribution of FCC

Sieve size range[μ m]	-425+300	-300+212	-212+150	-150+106	-106+75	-75+53	-53+0
Weight fraction	0.004	0.006	0.015	0.172	0.450	0.244	0.109

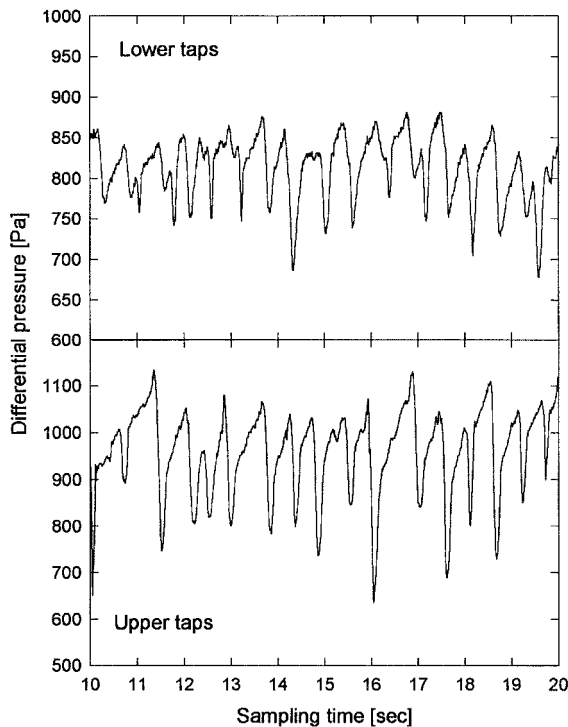


Fig. 2. Typical differential pressure fluctuation signals from the lower and upper differential pressure transducers($T_b=100\text{ }^{\circ}\text{C}$).

서는 높이 0.335 m와 0.385 m, 0.48 m와 0.53 m의 압력점에 차압 변환기를 각각 연결하여(평균 높이 0.433 m) 슬러그 특성의 측정을 수행하였다. Fig. 2는 실제로 측정된 전형적인 압력 요동 신호를 나타낸다.

측정된 상하 압력 요동 신호는 슬러그 특성치 계산에 앞서서 전처리되었다. 먼저 전체 신호(100 s)를 10개의 구간으로 나누어 각 구간에서 최소 자승법에 의한 선형 회귀 분석(linear regression)을 수행하고 이를 이용하여 신호의 경향성을 제거해 주었다. 경향성이 제거된 각 구간의 신호는 기준 전압(base line) 이상의 조밀상(emulsion phase)과 이하의 기포상 또는 슬러그상(bubble phase or slug phase)으로 구분되었다. 기준 전압(base line)은 기포 또는 슬러그 신호와 고체상의 신호가 명확하게 구분될 수 있도록 각 구간 신호의 평균값으로 결정하였다. 압력 신호에 있어서 기준 전압(base line)에 짧은 시간(0.03 s 이하) 동안 살짝 걸치는 신호는 잡음(noise)으로 간주되어 제거되었다.

기포 혹은 슬러그 빈도는 전처리된 상하 압력 변환기 신호에서 기포 또는 슬러그 상에 속하는 신호의 단위 시간당 평균수로 계산되었다. 슬러그 상승 속도(U_s)는 전처리 첫 단계에서 경향성만 제거된 상하 압력 신호의 cross-correlation function을 계산하여 그 값이 최대가 되는 시간을 평균 시간 지연(time delay, t_d)으로 먼저 결정하고, 상하 차압 측정점들 사이의 거리(0.145 m)를 t_d 로 나누어($U_s=0.145/t_d$) 결정하였다[16, 19]. 슬러그 길이는 슬러그 상승 속도와 압력점이 슬러그와 접촉한 시간의 곱으로 계산되었다. 슬러그와 접촉한 시간은 상하 신호에서 슬러그 상에 속한 총괄 시간을 총괄 슬러그 수로 나누어 한 개의 슬러그 상에 속하는 평균 시간으로 계산되었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 최소 유동화 속도

Fig. 3은 본 유동층의 온도를 변화시키며 측정된 최소 유동화 속도를 나타낸다. 최소 유동화 속도는 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을

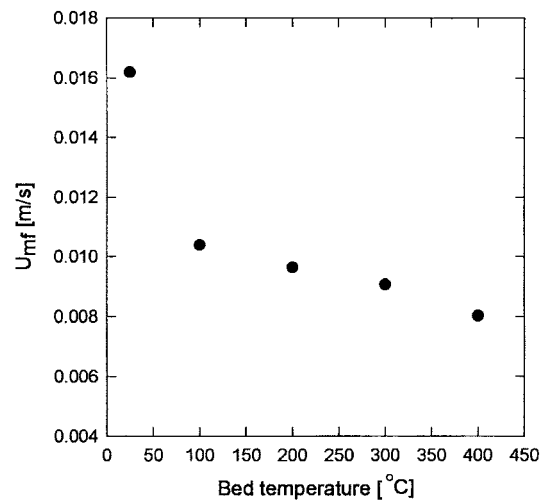


Fig. 3. Temperature versus measured minimum fluidizing velocity.

나타낸다. 상온으로부터 100 $^{\circ}\text{C}$ 로 층 온도가 증가할 때 가장 급격한 감소를 나타내었다. 본 연구에서 사용된 FCC와 같은 미세 입자(Geldart group A, B 입자)의 경우에는 입자에 작용하는 점성력(viscous force) 항이 관성력(inertia force) 항에 비해서 지배적이기 때문에 최소 유동화 속도는 온도가 증가함에 따라서 감소하는 경향을 보이게 된다[23].

3-2. 최소 슬러깅 속도

Fig. 4는 최소 슬러깅 속도를 결정하는 한 예로 층 온도 200 $^{\circ}\text{C}$ 의 경우에 유속을 증가시키며 측정된 기포 혹은 슬러그 빈도의 변화를 나타내고 있다. 기포 또는 슬러그 빈도는 유속이 증가함에 따라 증가하여 최대 값에 도달한 후 감소하는 경향을 나타내고 있다. 기포 유동층 영역에서는 유속이 증가하면 과잉 공기량이 증가하여 기포 빈도가 증가한다. 계속적으로 유속이 증가하면 기포 크기가 증가되어 층이 슬러그 영역에 도달되고, 슬러그 영역에서는 유속이 증가함에 따라서 슬러그 빈도가 감소하는 경향을 나타내며, 기포 혹은 슬러그 빈도가 최대 값을 나타내는 유속을 최소 슬러깅 속도로 정한다[1-3].

Fig. 5는 측정된 최소 슬러깅 속도를 층 온도에 따라 나타낸다. 최소 슬러깅 속도는 층 온도가 증가함에 따라서 증가하는 경향을 나타내었다. 이 결과는 다음과 같이 설명될 수 있었다. 본 실험에서 사용된 FCC

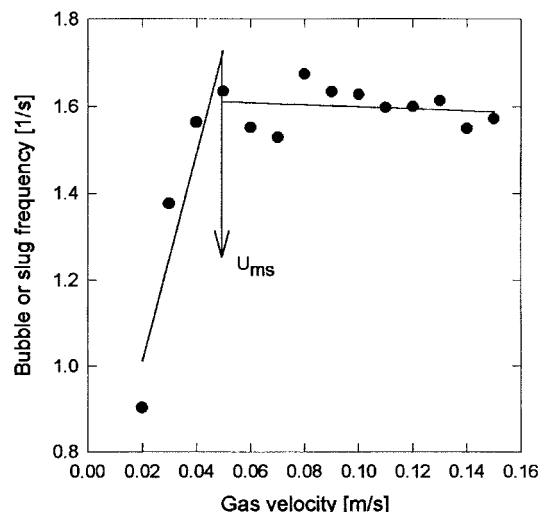


Fig. 4. Gas velocity versus bubble or slug frequency($T_b=200\text{ }^{\circ}\text{C}$).

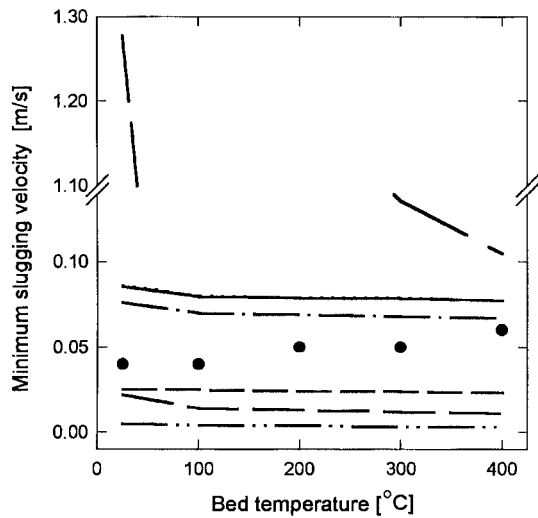


Fig. 5. Bed temperature versus minimum slugging velocity. Symbol: values measured in this study, lines: correlations. —: Stewart and Davidson[4], ...: Baeyens and Geldart[1], ---: Broadhurst and Becker[5], ----: DiMattia et al.[3], —: Fatah and Flamant[2], —: Luca et al.[7], —: Lee and Kim[6].

입자의 경우에 최소 유동화 속도는 층 온도가 증가함에 따라서 감소하는 경향을 나타내었다(Fig. 3). Choi 등[24]의 보고에 의하면 최소 유동화 속도가 감소하면 기포의 분쇄(breakage) 빈도가 증가하여 기포의 크기가 작아지며, 결과적으로 슬러그가 출현하는 최소 슬러깅 속도는 증가하게 된다. 한편 Fatah와 Flamant[2]는 직경 0.1 m의 유동층에서 입자 크기 1.18-3.57 mm, 입자 밀도 3,950 kg/m³의 입자를 사용하여 20-700 °C의 온도 변화에 따른 최소 슬러깅 속도의 변화를 측정하였으며, 온도가 증가함에 따라 최소 슬러깅 속도가 감소하는 것으로 보고하였다. 이들의 층 입자는 평균 입경 2.375 mm로 Geldart D 입자에 속하는 큰 입자이며, 이 입자의 최소 유동화 속도는 입자에 작용하는 점성력(viscous force) 항보다는 관성력(inertia force) 항이 훨씬 지배적이어서 온도가 증가함에 따라 증가하게 된다. Choi 등[24]의 보고에 의하면 최소 유동화 속도가 증가하면 기포의 분쇄 빈도가 감소하여 기포의 크기가 커지며, 결과적으로 슬러그가 출현하는 최소 슬러깅 속도는 감소하게 된다. 결과적으로 본 연구의 유동층과 Fatah와 Flamant[2]의 유동층은 최소 유동화 속도와 최소 슬러깅 속도에 있어서 온도의 변화에 대해서 서로 반대의 경향을 나타내는 근본적으로 전혀 다른 특성을 가짐을 알 수 있었다.

Fig. 5는 기존의 상관식들[1-7]로 예측되는 최소 슬러깅 속도와 본 연구에서 측정된 값의 비교도 나타낸다. 그림에서 나타내는 것과 같이 비교된 모든 기존의 상관식들은 본 보고의 결과와 상반된 온도 영향을 나타내었다. 기존의 상관식들은 Fatah와 Flamant[2]의 상관식을 제외하면 모두 상온 유동층 실험 결과로부터 얻어졌다. 결과적으로 기존의 상관식으로는 최소 슬러깅 속도에 대한 온도의 영향을 나타낼 수 없음을 보여준다.

3-3. 슬러그 상승 속도

Fig. 6은 슬러깅 영역에서 슬러그 상승 속도를 층 온도와 유속의 변화에 따라 나타낸다. 슬러그 상승 속도는 유속이 증가함에 따라서 증가하며, 층 온도가 증가함에 따라서 증가하는 경향을 나타내었다. 일정한 층 온도에서 유속의 증가는 과잉 기체 속도($U-U_{mf}$)를 증가시키며 따라서 슬러그 상승 속도는 증가된다. 일정한 기체 유속에서 층 온도가 증가하면 최소 유동화 속도는 감소하며 약간의 과잉 기체 속도($U-U_{mf}$)의 증가 효과가 있다. 또 Choi 등[24]의 보고에 의하면 최소 유동화 속도가 감

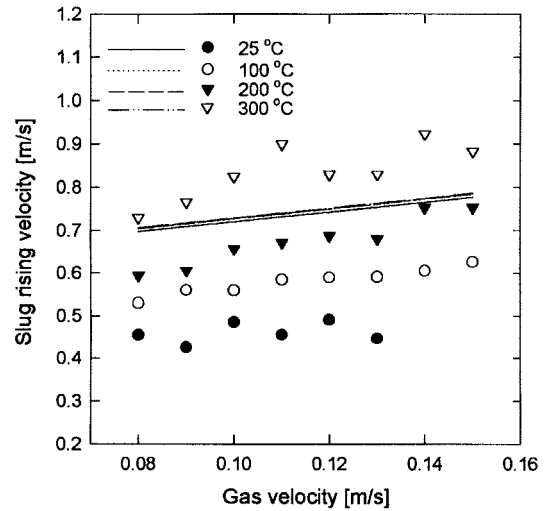


Fig. 6. Gas velocity versus slug rising velocity. Symbols: values measured in this study, lines: correlation of Dry et al.[17].

소하면 실질적으로 과잉 기체 속도($U-U_{mf}$)의 증가 효과가 있을 수 있다. 결과적으로 이와 같은 복합적인 효과에 의해서 슬러그 상승 속도는 증가하는 것으로 사료된다.

Fig. 6에서는 기존의 상관식에 의해서 계산된 슬러그 상승 속도와 본 연구의 측정값과 비교의 한 예로 본 측정값과 가장 근접한 값을 예측하는 Dry 등[17]의 상관식과의 비교도 나타낸다. 상관식들 중에서 Satija와 Fan[10], Fan 등[16], Lee와 Kim[19]의 상관식들은 온도 영향에 있어서 본 연구 결과와 반대의 경향을 나타내었다. 그 밖의 상관식들[9, 11, 13, 15, 17, 18]은 본 연구 결과와 같이 온도가 증가함에 따라 슬러그 상승 속도가 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 그림의 예에서 나타내는 것과 같이 비교된 모든 상관식으로 예측되는 온도의 영향은 실험 값에 비해서 매우 작게 나타났다. 이는 비교된 모든 상관식들이 상온에서 측정된 값을 기반으로 얻어졌고, 온도의 영향이 최소 유동화 속도 항만으로 표현되기 때문으로 사료되었다.

Fig. 7은 $(U-U_{mf})$ 와 $(U_s-0.35\sqrt{gD_t})$ 의 관계를 나타낸다. 그림에서 나타내는 것과 같이 $(U_s-0.35\sqrt{gD_t})$ 는 $(U-U_{mf})$ 의 변화에 따라 거의 선형으로 증가하는 경향을 나타내며 그 기울기는 온도가 증가함에 따라 증가하였다. Fig. 8은 $(U-U_{mf})$ 와 $(U_s-0.35\sqrt{gD_t})$ 사이의 관계에서 기울기

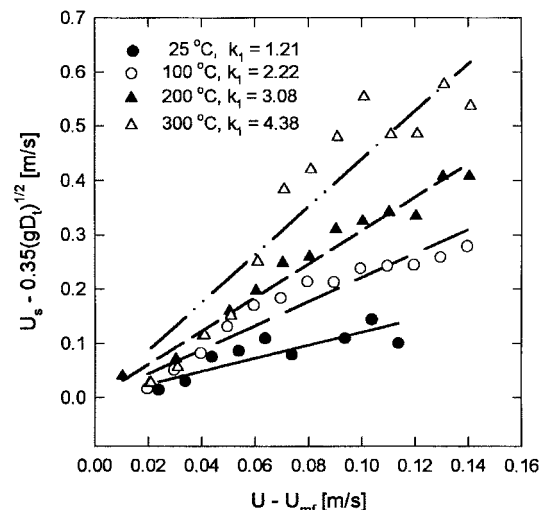
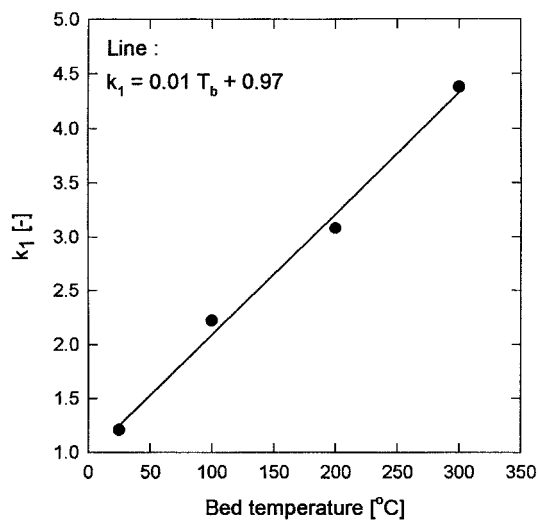


Fig. 7. $U-U_{mf}$ versus $U_s-0.35\sqrt{gD_t}$.

Fig. 8. Bed temperature versus k_1 .

k_1 을 온도에 따라 나타낸다. 그림에서 나타내는 것과 같이 k_1 은 온도의 변화에 따라 거의 선형으로 증가하였다. 결과적으로 온도의 증가에 따른 슬러그 상승 속도의 증가에는 에멀전 상의 고체 거동 특성의 변화 영향이 포함되는 것으로 사료되었다. 온도의 영향이 고려된 슬러그 상승 속도에 대한 상관식은 다음과 같이 표현되었다.

$$U_s = (0.01T_b + 0.97)(U - U_{mf}) + 0.35\sqrt{gD_t} \quad (1)$$

where T_b =bed temperature[°C]

상온(25 °C)에서는 $U_s = 1.2(U - U_{mf}) + 0.35\sqrt{gD_t}$ 로 기존의 상관식[25]과 유사하였다.

3-4. 슬러그 길이

Fig. 9는 슬러그 길이를 층 온도와 유속의 변화에 따라 나타낸다. 슬러그 길이는 다소 기복은 있으나 유속이 증가함에 따라서 증가하고, 층 온도가 증가함에 따라서 증가하는 경향을 나타내었다. 일정한 층 온도에서 유속의 증가는 과잉 기체 속도($U - U_{mf}$)를 증가시켜서 슬러그 상승 속도가 증가된다(Fig. 6). 슬러그 상승 속도의 증가는 상하로 인접한 슬러그들 중 뒤따르는 슬러그의 상대 속도를 증가시켜서 슬러그 사이의

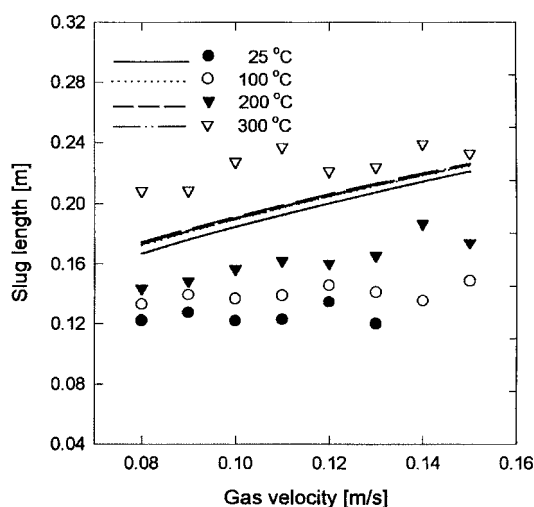


Fig. 9. Gas velocity versus slug length. Symbols: value measured in this study, lines: correlation of Nakamura et al.[9].

합체를 증가시키고 그 결과 슬러그 길이를 증가시키는 것으로 사료된다. 일정한 기체 유속에서 층 온도가 증가하면 슬러그 상승 속도는 증가되며(Fig. 6), 위와 같은 효과로 슬러그 사이의 합체를 증가시켜서 슬러그의 길이를 증가시키는 것으로 사료된다. 한편 온도가 200 °C에서 300 °C로 증가할 때 슬러그 길이가 특히 더 크게 증가하는 경향을 보이는데 본 실험의 결과만으로는 그 이유를 정확하게 해석하기는 어려운 것으로 사료되며, 이 구간에서 슬러그의 상승 속도가 더 크게 증가하는 것(Fig. 6)에 영향이 있는 것으로 유추된다.

Fig. 9에서는 기존 상관식으로 계산된 슬러그 길이와 본 연구의 측정값과 비교의 한 예로 본 측정값에 가장 근접한 값을 예측하는 Nakamura 등[9]의 상관식과의 비교도 나타낸다. Shichun 등[11]의 상관식은 본 실험결과와 반대로 온도가 증가함에 따라 슬러그 길이가 감소하는 경향을 나타내었으며, Luca 등[7]과 Lee[13]의 상관식은 본 실험 범위에서 음의 값을 나타내어 적용 범위가 제한됨을 알 수 있었다. 그밖의 상관식들[9, 20-22]은 본 실험결과와 같이 온도가 증가함에 따라서 슬러그 길이가 증가하는 경향을 나타내었으나 그림에서 보여주는 한 예와 같이 온도 영향의 크기가 매우 작게 나타났다. 이는 기존의 상관식들이 상온에서 수행된 실험결과로부터 얻어졌고, 온도의 영향이 단순히 최소 유동화 속도 항만에 의해서 표현되기 때문으로 사료되었다.

3-5. 슬러그 빈도

Fig. 10은 슬러그 빈도를 층 온도와 유속의 변화에 따라 나타낸다. 각 유동층 온도에서 슬러그 빈도는 다소 기복이 있으나 유속이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내며, 층 온도가 증가함에 따라서 감소하였다. Baeyens와 Geldart[1]의 상관식에 의하면 본 실험의 측정 높이 0.433 m는 활발한 슬러그 성장 영역에 속하기 때문에 기체 유속이 증가함에 따라서 슬러그 길이는 증가하고(Fig. 9) 반면에 슬러그 빈도는 감소하는 것으로 사료된다. 한편 온도가 증가하는 경우에도 슬러그 길이가 증가하여(Fig. 9) 슬러그 빈도는 감소하는 것으로 사료된다.

Fig. 10에서는 기존의 상관식으로 계산된 슬러그 빈도와 본 연구에서 측정된 값의 비교의 한 예로 본 결과와 가장 근접한 값을 예측하는 Nakamura 등[9]의 상관식과의 비교도 나타낸다. Baeyens와 Geldart[1], DiMattia 등[3], Verloop와 Heertjes[8], Noordergraaf 등[12]의 상관식은 온도의 영향을 예측할 수 없었다. 그림에서 예로 나타내는 바와 같이 비교된 상관식들[7, 9-11, 13]은 본 측정 결과와 유사하게 온도가 증가함에 따라서 슬러그 빈도는 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 상관식이 예측하는

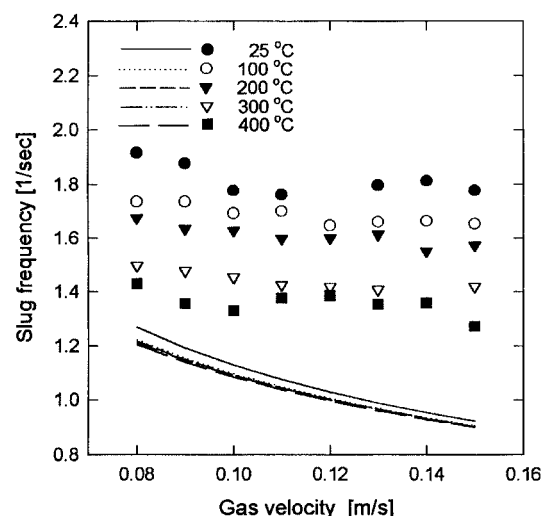


Fig. 10. Gas velocity versus slug frequency. Symbols: value measured in this study, lines: correlation of Nakamura et al.[9].

온도의 영향은 측정값보다 매우 작았다. 이는 기존의 상관식들이 모두 상온에서 실험된 결과로부터 얻어졌고, 온도의 영향이 최소 유동화 속도 항만에 의해서 표현되기 때문으로 사료되었다.

4. 결 론

기체 유동층에서 최소 슬러깅 속도와 슬러그 특성치(슬러그 길이, 슬러그 상승 속도, 슬러그 빈도)에 대한 층 온도의 영향을 측정 및 고찰하였다. 본 연구의 실험 범위에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다. 최소 슬러깅 속도는 층 온도가 증가함에 따라서 증가하였다. 온도의 증가에 따른 최소 슬러깅 속도의 변화 경향은 최소 유동화 속도의 변화 경향과 반대의 경향을 보임을 확인하였다. 층 온도가 증가함에 따라 슬러그 상승 속도와 길이는 증가하였으나 슬러그 빈도는 감소하였다. 슬러그 상승 속도는 온도에 선형으로 비례하였다. 층 온도가 고려된 슬러그 상승 속도에 관한 상관식을 제시하였다.

감 사

이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 지원되었습니다(KRF-99-041-E00384).

사용기호

D_t	: column diameter [m]
g	: gravitational acceleration, 9.8 [m/s ²]
k_1	: coefficient [-]
T_b	: bed temperature [°C]
t_d	: average time delay between upper and lower signal [s]
U	: superficial gas velocity [m/s]
U_{mf}	: minimum fluidization velocity [m/s]
U_{ms}	: minimum slugging velocity [m/s]
U_s	: average slug rising velocity [m/s]

참고문헌

1. Baeyens, J. and Geldart, D.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 255(1974).
2. Fatah, N. and Flamant, G.: "Velocity at the Onset of Slugging in Large Particle Fluidized Systems at High Temperatures," in *Fluidization and Fluid Particle Systems*, Casal, J. and Arnaldos, J.(eds.), Universitat Politecnica de Catalunya, Spain, 103(1990).
3. DiMattia, D. G., Amyotte, P. R. and Hamdullahph, F.: *Can. J. of Chem. Eng.*, **75**, 452(1997).
4. Stewart, P. S. B. and Davidson, J. F.: *Powder Technology*, **1**, 61(1967).
5. Broadhurst, T. E. and Becker, H. A.: *AIChE J.*, **21**(2), 238(1975).
6. Lee, G. S. and Kim, S. D.: *Powder Technology*, **62**, 207(1990).
7. Luca, L. De, Felice, R. Di. and Foscolo, P. U.: *Powder Technology*, **69**, 171(1992).
8. Verloop, J. and Heertjes, P. M.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 1035(1974).
9. Nakamura, K., Masaaki, G. H. and Katsuhiko, H.: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **2**(6), 577(1976).
10. Satija, S. and Fan, L. S.: *AIChE J.*, **31**, 1554(1985).
11. Shichun, C., Heling, Z. and Feichen, J.: "A Study of Hydrodynamic Behavior of the Slugging Fluidized Bed," in *Fluidization*, Kwauk, M. and Kunii, D.(eds.), Elsevier, Amsterdam, 75(1985).
12. Noordergraaf, I. W., Van Dijk, A. and Van Den Bleek, C. M.: *Powder Technology*, **52**, 59(1987).
13. Lee, S. H.: "Slug Properties in a Fluidized Bed of Polymer Powders," Master Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1(1997).
14. Lee, S. H., Lee, D. H. and Kim, S. D.: *Korean J. Chem. Eng.*, **18**, 387(2001).
15. Lanneau, K. P.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **38**, 125(1960).
16. Fan, L. T., Ho, T. C. and Walawender, W. P.: *AIChE J.*, **29**, 33(1983).
17. Dry, R. J., Judd, M. R. and Shingles, T.: *Powder Technology*, **39**, 69 (1984).
18. Clark, N. N., McKenzie, E. A. and Gautam, M.: *Powder Technology*, **67**, 187(1991).
19. Lee, G. S. and Kim, S. D.: *Korean J. Chem. Eng.*, **6**, 15(1989).
20. Park, W. H., Kang, W. K., Capes, C. E. and Osberg, G. L.: *Chem. Eng. Sci.*, **24**, 851(1969).
21. Matsen, J. M. and Tarmy, B. L.: *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, **66**(1), 1(1970).
22. Hovmand, S. and Davidson, J. F.: in "Fluidization," Davidson, J. F. and Harrison, D.(eds.), Academic Press, Yorkshire, 193(1971).
23. Kunii, D. and Levenspiel, O.: "Fluidization Engineering," 2nd ed., Butterworth-Heinemann, 68(1991).
24. Choi, J. H., Son, J. E. and Kim, S. D.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **37**(6), 2559(1998).
25. Kehoe, P. W. K. and Davidson, J. F.: "Continuously Slugging Fluidized Beds," CHEMECA'70, Inst. Chem. Eng. Symp. Ser., No. 33, Butterworths, Australia, Melbourne, 97(1970).