

삼상유동층에서 유동입자의 통계적 분산특성

우광재, 고명한, 김기인, 강 용, 김상돈*
충남대학교 화학공학과
한국과학기술원 화학공학과*

Stochastic Dispersion of Fluidized Particles in Three Phase Fluidized Beds

K.J.Woo, M.H.Ko, K.I. Kim, Y. Kang and S.D.Kim[†]
Department of Chemical Engineering, Chungnam National University,
Taejon, 305-764
^{*}Department of Chemical Engineering, KAIST, Taejon, 305-701

서론

삼상유동층을 다상 반응기나 다상의 접촉, 혼합, 수송공정 등에 응용할 경우 매우 우수한 장치로 알려져 있으며 그 운전비용도 저렴하게 나타나고 있어서 이들 반응기의 여러 공업적 응용은 날로 증가되고 있다.

삼상유동층에 대한 지금까지의 연구들은 삼상유동층에서 분산상으로 존재하는 기포의 크기, 상승속도, 분포 등 기포의 특성과 연속상인 액상의 축방향과 반경방향 혼합특성 그리고 열전달 및 물질전달 등이 주종을 이루고 있는데, 이들 대부분의 연구는 정상상태로 조업되고 있는 삼상유동층에서의 연구들이었다. 그러나, 삼상유동층은 기체, 액체 그리고 유동고체입자들의 접촉과 흐름이 매우 불규칙적이며 동특성(dynamic)을 나타내기 때문에 삼상유동층의 전체적 거동에 대한 해석에는 deterministic 방법보다는 stochastic 방법으로의 접근이 보다 효과적이며, 이를 위해서는 정상상태 뿐만 아니라 비정상상태의 거동을 해석해야 하는 것으로 알려지고 있다. 삼상유동층에서 유동입자는 분산상으로 존재하기 때문에 유동입자의 분산 및 흐름거동은 삼상유동층 반응기의 성능을 결정하는 중요한 요소로 인식되어지고 있다. 또한, 고체입자는 기포를 분쇄할 수 있는 potential을 지니고 있다고 여겨지므로 유동입자는 기포의 거동 및 특성에 큰 영향을 미칠 수 있다[1-3].

따라서, 본 연구에서는 삼상유동층의 거동과 유동입자의 요동(fluctuations) 및 분산특성을 해석하기 위하여 비정상상태에서 삼상유동층 내부에서의 압력변화 거동을 통계적 방법을 사용하여 해석하고자 하였다. 이와같은 연구는 삼상유동층의 거동특성을 규명하고 유동입자의 혼합 및 유동입자가 유동층 내부에서 각 상들과의 접촉과 흐름현상 등에 미치는 영향을 고찰하는데 매우 중요한 정량적인 정보를 제공할 것으로 사료된다.

이론

정상상태로 조업되고 있는 삼상유동층에 기체나 액체의 유량을 step 함수로 변화시켜 주면 유동층은 새로운 정상상태에 도달하게 되는데, 새로운 정상상태에 도달할때까지는 비정상상태의 거동을 나타낸다. 비정상상태에서 삼상유동층 내부의 압력변동을 측정하는 일정 시험영역에서 batch 상태로 유동하고 있는 유동입자들은 층의 팽창 정도에 따라 시험영역에 들어 오기도 하고 빠져나가기도 한다. 이와 같은 유동입자들의 요동빈도는 삼상유동층의 비정상상태 거동을 해석함으로써 구할 수 있다. 즉, 삼상유동층이 비정상상태 거동을 하면서 relaxation-point를 지나면 균일팽창을 하므로, 유동입자들의 일정 시험영역에서의 무작위적 거동

(random behavior)을 stochastic 공정을 도입하여 시험영역에 존재하는 유동입자의 평균분율인 $\overline{\varepsilon_S(t)}$ 와 시험영역을 벗어나는 유동입자의 평균분율인 $E(t)$ 의 두 무작위적 변수(random variable)로 다음과 같이 나타낼 수 있다[2-4].

$$\overline{\varepsilon_S(t)} = \overline{\varepsilon_{S0}} + (\overline{\varepsilon_{SR}} - \overline{\varepsilon_{S0}})\exp(-Ft) \quad (1)$$

$$E(t) = 1 - \frac{\overline{\varepsilon_S(t)}}{\overline{\varepsilon_{SR}}} \quad (2)$$

여기서, $\overline{\varepsilon_{S0}}$ 와 $\overline{\varepsilon_{SR}}$ 는 각각 새로운 정상상태와 relaxation point에서의 평균입자분율을 나타내고, F는 시험영역에서 유동입자의 요동빈도수(fluctuating frequency)를 나타낸다.

유동층 내부에서 유동입자들이 시험영역을 벗어나는 속도는 식 (2)로부터 식 (3)과 같이 얻을 수 있으며,

$$R_E(t) = F\left(1 - \frac{\overline{\varepsilon_{S0}}}{\overline{\varepsilon_{SR}}}\right)\left(\frac{\overline{\varepsilon_S(t)} - \overline{\varepsilon_{S0}}}{\overline{\varepsilon_{SR}} - \overline{\varepsilon_{S0}}}\right) \quad (3)$$

유동입자들이 시험영역에 머무는 평균체류시간은 식 (4)에 의해 얻을 수 있다.

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} tR_E(t)dt}{\int_0^{\infty} R_E(t)dt} \quad (4)$$

한편, 유동층의 시험영역에서의 유동입자의 분산계수(Dispersion coefficient)는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$D_p = \frac{F}{2} \beta \frac{\overline{\varepsilon_{S0}}}{\overline{\varepsilon_{SR}}} \quad (5)$$

실험 방법

실험장치는 직경 0.152m이고 높이가 2.5m인 아크릴관을 사용하였으며, 연속상인 액체는 물을 분산상인 기체와 유동입자로는 압축공기와 밀도가 2500 kg/m³인 유리구슬(dp:1.0~6.0×10⁻³m)을 사용하였다. 유동층에서의 전체 압력강하 및 유동층의 높이 측정을 위하여 유동층 벽면에 분산판으로부터 0.15m의 높이에서부터 0.15m 간격으로 압력탭을 설치하여 이들을 액체 마노미터에 연결하여서 정압력강하(static pressure drop)을 측정하였다. 동압력(dynamic pressure drop) 측정을 위한 압력센서는 분산판으로부터 0.1m 높이에 설치하였으며, 이를 압력변환기(semi-conductor type, Copel Electronics)를 사용하여 volt-time 신호로 바꾸어 증폭기와 오실로스코프 및 필터를 거쳐서 A/D 변환기를 사용하여 디지털 신호로 바꾼 다음 data acquisition system에 의해 PC에 입력시켰다. 각 실험조건에서 sample의 크기는 2500 point였으며 sampling rate는 31.25ms 이었는데, 이는 각 조건에서의 압력요동(pressure fluctuations) 및 동압력변화 해석 및 분석에 충분하였다.

결과 및 고찰

유동층 내부의 일정 시험영역에서 유동입자들의 평균체류시간(mean residence time)인 τ 는 식 (4)에 의해 구할 수 있는데, 이를 기체유속의 변화에 따라 Fig.1

에 나타내었다. Figure 1에서 볼 수 있듯이 유동층 내부의 일정 시험영역에서 유동입자의 평균체류시간은 기체유속이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있는데, 이는 기체유속의 증가에 따라 유동층 내부에 분산상으로 존재하는 기포의 체류량의 증가와 동시에 기체와 액체의 접촉 강도의 증가에 따른 유동층 내부의 turbulence 현상의 증가 때문이라고 설명할 수 있다. 다시 말하면 이들은 결과적으로 분산상으로 존재하며 유동화되고 있는 유동입자에 작용하는 turbulence와 buoyance force의 증가를 가져와 삼상유동층의 층팽창의 증가를 가져오며 이에 따라 유동입자들이 일정 시험영역에서 머무르는 평균체류시간의 감소를 가져온다고 볼 수 있다. 삼상유동층에서 연속상인 액체의 유속이 시험영역에서 유동입자의 요동빈도수에 미치는 영향을 Fig.2에 나타내었는데, 유동입자의 요동빈도수는 액체유속의 증가에 따라 최대값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 삼상유동층에서 액체유속의 증가에 따라 고체 유동입자의 흐름형태(flow regime)가 변환하는 것과 밀접한 관계가 있다고 볼 수 있다[4,5]. 즉, 삼상유동층에서 고체유동입자는 액체의 유속이 낮은 범위에서는 제한된 영역에서 완만한 순환유동(circulation motion)만을 하나, 액체의 유속이 점점 증가하여 가면서 유동입자의 운동폭도 커지고 운동도 점점 무작위적이며 불규칙적인 거동을 하게 되며, 액체유속이 어느정도 이상이 되면 고체유동입자는 완전히 난류의 무작위적인 거동(turbulent random motion)을 하게 된다. 또한, 유동입자의 흐름형태 변환은 유동입자가 운동할 수 있는 공간영역인 층공극률(bed porosity)의 변화에도 큰 영향을 받으므로 Fig.3에 층공극률이 유동입자의 일정 시험영역에서의 요동빈도수에 미치는 영향을 나타내었다. Figure 3에서 볼 수 있듯이 유동입자의 요동 빈도수는 층공극률의 변화에 따라서도 최대값을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 이는 Fig.2의 설명에서 설명된 이유 때문에 예견된 것이라 할 수 있다. 한편, 유동층 내부의 일정 시험영역에서 유동입자들의 축방향분산계수(axial dispersion coefficient)인 D_p 는 식 (5)에 의해 구할 수 있으므로, 이를 액체유속의 변화에 따라 Fig.4에 나타내었다. Figure 4에서 볼 수 있듯이 유동층 내부의 일정 시험영역에서 유동입자의 축방향분산계수는 액체유속이 증가함에 따라 최대값을 나타내는 것을 알 수 있다.

따라서, 유동입자의 거동이 난류의 무작위적인 거동을 시작하기 전단계인, 순환운동의 흐름영역과 난류 무작위적인 흐름거동의 영역의 중간단계에서는 제한된 영역에서의 순환운동의 특성과 입자의 운동폭이 커지는 거동의 특성을 같이 나타내므로 이 중간영역에서의 유동입자의 단위체적당 운동량과 요동빈도수 및 축방향 분산계수가 가장 크다고 볼 수 있다.

결론

본 연구의 결과, 삼상유동층에서 기체유속의 단계변화(Relaxation method)에 따른 유동층 내부구조 및 유동입자의 흐름형태의 변화를 해석할 수 있었으며, 삼상유동층에서의 유동입자의 유동형태와 분산특성을 예측할 수 있었다.

참고문헌

1. Fan, L.S.: Gas-Liquid-Solid Fluidization Engineering, Butterworths Publish, Stoneham, MA(1989).
2. Kang, Y. and Kim, S.D.: *Chem. Ind. Technol.*, **13**, 27(1995).
3. Yashima, M., Nassar, R., Fan, L.T. and Kang, Y.: *AIChE J.*, **38**, 629(1992).
4. Kang, Y., Woo, K.J., Ko, M.H. and Kim, S.D.: *HWAHAK KONGHAK*, **33**(5), 633(1995).
5. Fan, L.T., Kang, Y., Nieogi, D. and Yashima, M.: *AIChE J.*, **39**, 513(1993).

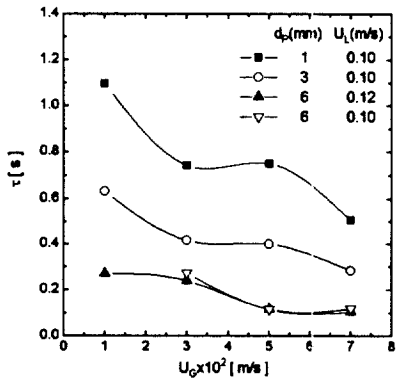


Fig. 1. Mean residence time of particles in the test section.

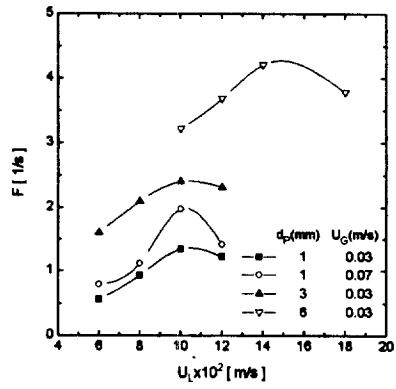


Fig. 2. Effects of U_L on fluctuating frequency of particles in the test section.

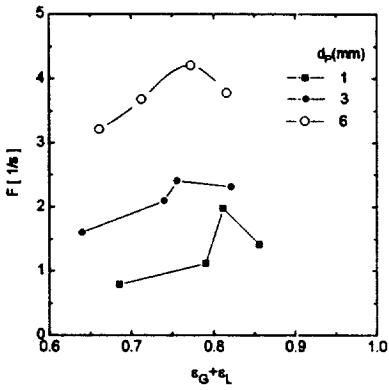


Fig. 3. Effects of bed porosity on fluctuating frequency of particles in the test section.

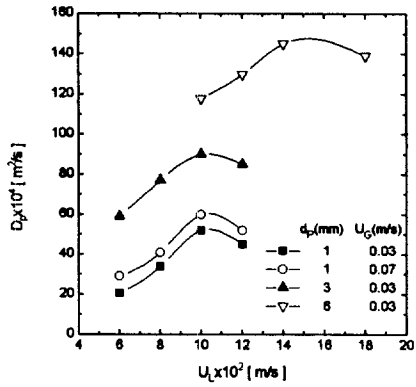


Fig. 4. Effects of U_L on axial dispersion coefficient of particles in the test section.