

순환유동층에서 기체-고체 흐름의 수력학적 특성

송평섭, 우광재, 강 용, 김상돈*

충남대학교 화학공학과

한국과학기술원 화학공학과*

Hydrodynamic Characteristics of Gas-Solid Flow in Circulating Fluidized Beds

P.S. Song, K.J. Woo, 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

순환유동층(Circulating Fluidized Bed)은 고속의 기체와 크기가 작은 고체 입자간의 긴밀한 접촉을 통하여 비교적 대규모의 여러 가지 화학적, 물리적 작업을 수행하는 유동층 기술(fluidized bed technology)의 한 분야이다. 즉, 기체-고체 접촉장치로서 빠른 기체유속에 의해 상승관 속에서 고체입자들이 수직적으로 상승관(riser)을 떠난 후에 고체입자들은 싸이클론에 의해 기체로부터 분리되고 상승관의 바닥으로 돌아가 재순환된다.

어떤 측면에서는 순환유동층은 다른 형태의 유동층 보다 많은 장점을 가지고 있다. 순환유동층은 빠른 기체 유속에서 운전되기 때문에 기체-고체 접촉을 비효율적으로 이끄는 원치 않는 기포를 포함하지 않는다. 그리고 속도가 최대에서 기체와 고체의 속도는 다르게 되어(slip velocity) 이들 간의 혼합이 용이하다. 높은 slip velocity는 고체의 비표면적을 증가시키고 기포의 부재는 유동층 혹은 분출층(spouted bed) 보다 더 높은 열전달 속도와 물질 전달 속도에 기여한다.

순환유동층의 수력학적 거동 중에서 대부분이 이해되어지고 있지만 그 중 세밀한 부분은 다만 제한된 범위 내에서 이해되어지고 있다. 이러한 방향 속에서 성공적이고 확실한 순환유동층의 조작성을 위해서는 수력학적 측면에 관계된 더 많은 연구가 수행되어야 하며 이러한 연구는 순환유동층의 설계 혹은 최적화에 상당한 도움을 줄 수 있다¹⁾.

본 실험에서는 순환유동층의 상승관 내의 압력강하(pressure drop)를 측정하여 고체 유동입자와 가스상의 체류량(holdup) 및 slip velocity를 결정하였으며, 순환유동층내에서 각각의 주요 조작 변수에 따른 유동입자의 수력학적 거동을 통하여 유동영역(fluidization regime) 및 흐름구조 변화를 고찰하였다.

이론

소형의 순환유동층에서의 국부적 수력학적 현상에 대한 많은 연구가 지난 수십년 동안 계속되어 왔으며, 또한 상업적 규모의 FCC 장치나 CFB combustor를 설계하고 운전한 industry에서도 많은 경험과 지식이 축적됐음에도 불구하고 CFB를 scale-up하는데는 아직도 많은 부분이 완전히 이해되지 못하고 있다.

순환유동층의 수력학적 특성에 관한 기초연구는 Geldart와 Rhode, Grace등을 들 수 있으며 최근에 Pira와 Sundaresan에 의하여 고체입자의 Kinetic Theory를 바탕으로 하는 model을 전개하기에 이르렀다.

순환유동층 내에서의 고체입자와 기체의 접촉에 따른 수력학적 특성을 이해하기 위해서는 우선 먼저 유동층내에서의 각기 다른 flow regime에 관한 이해가

필요하다.

Geldart에 의하면 flow regime은 유동층에서 거동하는 입자의 크기와 종류 그리고 유속에 의하여 나뉘어진다고 하였다²⁾. 그는 입자를 4가지의 group으로 나누었는데 Group A는 밀도가 1.4g/cm^3 보다 작고 부유성이 아주 좋은 물질이며, Group B는 입자크기가 $40\mu\text{m} < d_p < 500\mu\text{m}$ 사이로 밀도는 $1.4 < \rho_s < 4\text{g/cm}^3$ 이고, Group C는 점착성이 있는 아주 미세한 분말이다. 마지막으로 Group D는 무겁고 큰 입자로 유동화 시킬 때 spoutable한 입자이다³⁾. 또한 유속에 따른 유동영역은 각 group에 따라 다르지만 보통 다음과 같은 경로를 따른다. 처음 Fixed bed에서 smooth 상태로 그리고 기체의 기포와 같은 거동을 나타내는 bubbling 상태로 변한 후 유속이 더욱 커지면 비말동반과 다양한 크기와 형태의 기체 공극의 형태를 나타내는 turbulent 상태에 도달하며 이것은 또한 비말동반이 매우 커져 유동층 밖에서 입자를 포집하는 사이클론이 필요한 상태인 fast fluidized bed의 상태로 발전한 후 기체와 같은 흐름형태를 나타내는 pneumatic transport 지역까지 발전한다.

순환유동층은 fast fluidization regime을 가지며 기체에 의해 유동층 밖으로 나간 입자들이 cyclone에 의해 포집된다. 유동층의 독특한 유동특성은 유동층 중앙부(core)에서는 고체입자의 농도가 아주 희박한 상태에서 upflow를 가진다. 유동층 벽면에서는 고체입자의 농도가 농후한 downflow를 가지며 이러한 현상 때문에 순환유동층의 유동특성을 coreannulus flow라 부른다.

순환유동층에서 고체순환질량 flux(R_c)를 구하기 위하여 순환되는 전체의 고체량을 측정된 후 다음과 같은 식을 사용하여 구하였다.

$$R_c = \frac{h_D \times \rho_B}{t} \quad (1)$$

또한, test section내의 고체체류량을 구하기 위해서 ΔP 를 이용한 정압 강하법을 사용하였으며 다음과 같은 식을 사용한다.

$$\epsilon_G + \epsilon_s = 1.0 \quad (2)$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = (\epsilon_G \cdot \rho_G + \epsilon_s \cdot \rho_s)g \quad (3)$$

그리고 slip velocity는 기체와 고체사이의 상대적인 속도로 고체입자의 거동을 예측할 수 있는 것으로 다음과 같은 식에 의해서 얻을 수 있다.

$$U_s = \frac{U_G}{\epsilon_G} - \frac{R_c}{\epsilon_s \rho_s} \quad (4)$$

실험

실험장치는 분체가 유동화되는 유동층상승관(riser), 고속유동화에 의해 분출되는 분말입자를 포집하는 사이클론, 사이클론에서 Rotary valve까지 연결하는 하강관, 포집된 분말을 유동층상승관에 일정속도로 다시 주입하는 Rotary Valve (Capacity : 2 KVA, maximum rpm : 60), 유동화시키기 위해 가스를 발생시키는 Blower등으로 구성되어 있다.

유동층상승관의 내경은 0.10m이고 높이는 3.5m인 아크릴관(Acrylic resin column)을 사용하였다. 사이클론의 내경은 0.2m이고 높이는 0.85m이며 아래로 배출되는 내경은 0.045m로 분출되는 분말이 거의 포집되어 충분한 사이클론의 용량을 나타내었다. Blower로 부터 들어오는 공기를 층내에 똑같은 분포의 상승 가스를 만들어 주기 위해서 사용한 distributor는 두께가 0.01m이고 stainless steel로 만들었으며 삼각뿔모양의 perforated plate 형을 사용하였다. 유동층내

의 축방향 고체분포와 관련된 bed의 압력강하를 측정하기 위하여 유동층상승관에 5 cm간격으로 18개의 manometer tap을 설치하였다. 그중에 distributor로부터 0.3 m와 1.9 m 위치의 manometer tap에 differential pressure manometer를 연결하여 압력강하를 측정하였다. 실험재료로는 밀도(ρ_s)가 0.92 g/cm³이고 벌크밀도(ρ_b)가 0.47 g/cm³인 폴리에틸렌을 사용하였고 유동화 가스로는 Blower에서 공급되는 공기를 사용하였다.

유동화의 연속상으로 쓰인 폴리에틸렌을 초기층높이 0.52m계량하여 유동층에 넣고 초기층높이를 0.13m씩 증가시키면서 실험하였다. Blower를 통하여 유동화 가스를 공급하는데 flowcell을 통하여 유속을 조절하였다. 유속은 분말이 유동화하여 싸이클론으로 유출되기 전부터 rotary valve에 원료물질이 2/3 이상이 쌓이기 전까지 0.05m/s 간격으로 증가시키면서 실험하였다. 이 실험에서는 세 가지를 측정하였다. 첫째, 유동층의 압력강하를 측정하기 위하여 미리 설치해 둔 differential manometer 의 눈금을 읽는다. 둘째, 유동층에 쌓이는 전체의 체류량을 측정하였다. 이것을 이용하여 전체 분말에 대한 유동층상승관에서의 체류량을 계산한다. 마지막으로 순환되는 분말의 질량속도를 측정하기 위해서 싸이클론을 통해서 나오는 고체량을 측정하였다.

결과 및 고찰

Test section내의 고체체류량은 ΔP 를 이용하여 구하는 정압강하법(식-3)을 이용하여 구하였다. 이것은 다시 기체유속에 대한 Test section내의 고체체류량(ϵ_s)으로 Fig.2에 나타내었다. Figure 2 에서 볼 수 있듯이 Test section내의 고체체류량과 유속의 관계는 유속이 증가함에 따라 체류량은 감소한다. 이 그림은 세 부분으로 나뉘는 데 거의 일정하게 감소하는 turbulent fluidization 영역과 급격히 감소하는 fast fluidization 영역 그리고 마지막으로 일정한 pneumatic transport 영역으로 나뉜다. 예를 들면 초기층높이가 0.91m에서 유속이 1.7m/s에서 1.9m/s 까지가 turbulent 영역이고, 1.9m/s 에서 2.0m/s 까지는 fast 영역이고, 2.0m/s 이상은 pneumatic transport영역이다. Turbulent fluidization영역에서는 고체체류량의 감소가 아주 적은 데 이것은 아직도 circulating condition이 되지 않은 것으로 단지 유동층내에서의 활발한 유동입자의 거동만을 나타낸다. 유속이 증가하여 fast fluidization 영역에 도달하자 고체가 순환되기 시작하여 고체체류량은 급격히 감소함을 나타낸다. 유속이 더욱 증가하면 유동층은 pneumatic transport 영역에 도달하여 유동층내의 고체는 유입되는 즉시 순환되므로 고체체류량은 아주 적으며 거의 일정함을 나타낸다.

층공극률에 대한 slip velocity는 식 (4)에 의해 구하였으며 Fig.3에 나타내었다. 층공극률에 대한 slip velocity를 살펴보면 일반적인 현상은 층공극률이 증가함에 따라 slip velocity는 일정하다가 증가한 다음 다시 감소하는 pattern을 나타내는데 처음 상태는 turbulent fluidization 영역이고 다음은 fast fluidization 영역이며 마지막은 pneumatic transport 영역이다.

결론

순환유동층에서 유동입자의 수력학적 특성을 고찰한 결과, 유동층내에서 유동입자의 흐름구조(flow structure) 및 각각의 주요 조작변수에 따른 유동영역(fluidization regime)의 변화를 해석할 수 있었다.

참고문헌

1. Horio, M., in Circulating Fluidized Bed Technology III, ed.. by

bnasu, P., Horio, M., and Hastani, M., 3 (1990).
 2. Kunii, D and Levenspiel, O. in *Fluidization Engineering*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann (1991).
 3. Geldart, D., *Powder Technol.*, 7, 285 (1973).

Table.1 Experimental Condition

U_{mf} , minimum fluidization velocity (m/s)	0.219
U_t , terminal velocity (m/s)	1.932
Range of gas (m/s)	1.6 ~ 2.2
Range of initial bed height (m)	0.52 ~ 1.04
Mean particle size (μm)	128

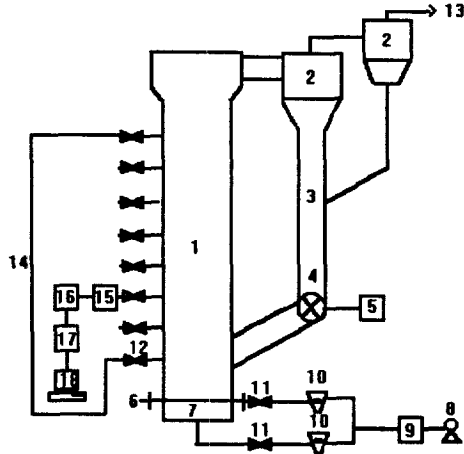


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

- | | |
|----------------------------|-------------------------|
| 1. Riser | 10. Flowmeter |
| 2. Cyclone | 11. Control valve |
| 3. Down corner | 12. Manometer tap |
| 4. Rotary valve | 13. Carry over |
| 5. Rotary valve controller | 14. Manometer |
| 6. Distributor | 15. Pressure transducer |
| 7. Calming section | 16. Amplifier |
| 8. Blower | 17. A/D converter |
| 9. Air regulator | 18. Computer |

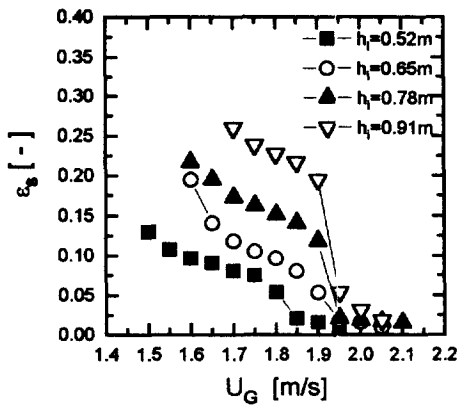


Fig. 2. Effects of gas velocity on solid holdup in circulating fluidized beds.

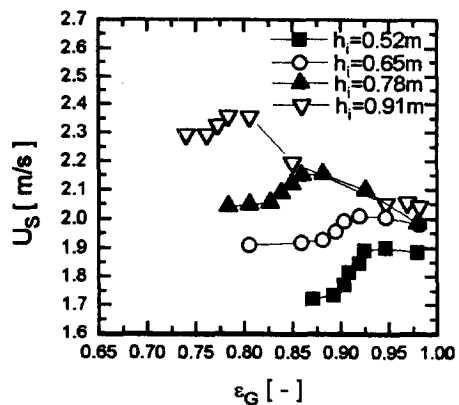


Fig. 3. Effects of bed porosity on slip velocity in circulating fluidized beds.