

순환유동층내 고체재순환부의 특성

김성원, 남궁원, 김상돈
한국과학기술원 화학공학과

A Characteristics of Solid Recycle System in a Circulating Fluidized Bed

S. W. Kim, W. Namkung, and S. D. Kim
Dept. of Chemical Engineering, KAIST, Taejon, Korea

서론

순환유동층연소기술은 기존의 기포유동층에 비해 다양한 연료를 사용할 수 있고, 우수한 연소 효율을 가질뿐 아니라, SO_x, NO_x 저감등 공해방지특성이 우수하여 최근에 대형 보일러에 많이 사용되고 있다. 순환유동층은 기존의 기포유동층에 비하여 높은 유속에서 조업되므로, 싸이클론에서 입자의 포집이 중요하고, 상승관내의 고체량을 적절하게 유지시키기위해 포집된 입자를 상승관내로 주입하는 것이 필요하다. 순환유동층은 크게 상승관 또는 연소로, 싸이클론, 고체재순환부로 이루어져 있고, 고체재순환부는 다시 downcomer 와 고체재주입밸브로 이루어져 있다. 이러한 고체재순환부의 기능은 다음과 같다[5].

- (1) 고체입자를 압력이 낮은 지역에서 높은 지역으로 전달한다.
- (2) 반응기내 기체흐름이 역방향으로 흐르는 것을 방지하는 sealing 역할을 한다.
- (3) 고체순환속도를 조절한다.

Downcomer 하부에 위치한 밸브에는 크게 기계적 밸브와 비기계적 밸브가 있다. Slide-valve, rotary-valve와 같은 기계적밸브는 기계적 구동부로서 orifice 면적을 변화하여 고체흐름속도를 조절는 반면, loop-seal, L-valve와 같은 비기계적밸브는 공기주입량과 위치에 의해 고체흐름속도를 조절한다. 상업용의 CFB 보일러는 대부분 고온으로 조업되므로 구동부의 마모나 sealing 문제가 없는 비기계적 밸브를 사용한다 [3]. 비기계적 밸브는 기계적 밸브와 비교하여 고온·고압에서의 조업 및 설계가 간단하고, 가격이 저렴하며 유지비가 적게 든다는 장점이 있어 현재 널리 사용되고 있다 [4]. 이러한 고체 입자의 재순환을 특징으로 갖는 순환유동층에서 반응기의 조업정지를 가져오는 주요문제의 하나는 고체의 재순환부에서 발생한다[1]. 그러므로, 상승관내의 원활한 반응을 유지시키기위해 안정적이며, 최적의 고체입자의 재순환을 얻기위해서는 고체재순환부에 대한 이해가 필요하다.

따라서, 본 실험에서는 순환유동층내 원활한 고체흐름을 얻기위한 고체재순환부의 특성을 조사하고, 고체재순환부와 연소로와의 관계를 이해하고자 하였다.

실험장치 및 실험방법

본 연구에서 사용한 순환유동층 장치를 Fig. 1 에 나타내었다. 전체 장치는 상승관 (riser), 싸이클론(cyclone), 호퍼, downcomer, loop-seal 로 구성되어 있다. 상승관은 내경이 0.1 m 이고, 높이는 5.3 m 이다. 상승관은 기-고체 흐름현상을 관찰하기 위하여 아크릴 관으로 제작되었고, 분산판은 다공판(perforated plate)으로 steel로 제작되었다. 비산유출되는 고체입자를 포집하여 재순환 시키기 위하여 상승관 출구에 1차 싸이클론과 2차 싸이클론을 설치하였고, 싸이클론에 잡히지 않는 입자는 bag filter 를 사용하여 포집하였다. 싸이클론에서 포집된 입자는 호퍼에 저장되었다가, downcomer 와 loop-seal 을 통하여 공기량 조절을 통하여 원하는 고체흐름속도로 상승관내로 재주입된다. Downcomer 와 loop-seal 은 아크릴로 제작되었고 내경은 0.08 m 이다. 입자의 재주입을 원활하게 하기 위해 loop-seal 내의 입자를 유동화 시키기 위한 수단으로 loop-seal 하단에 sparger pipe 형태의 분산판을 설치하였고,

downcomer 에 공기주입을 위해 aeration tap을 높이에 따라 일정한 간격으로 설치하였다. 상승관, 싸이클론, downcomer, loop-seal 내의 압력분포를 측정하기 위해서 압력탭을 설치하였다. 압력을 측정하기 위하여 마노미터와 pressure transducer 를 사용하였고, 여기서 나오는 신호는 data acquisition 을 이용하여 IBM-PC 에 저장하였다. 입자의 순환속도는 sampling pot 를 사용하여 주어진 높이에 대해 입자가 쌓이는 시간을 측정하는, time-of-descent method에 의해 측정하였다.

실험은 상승관이 비어 있는 상태에서 원하는 유속으로 상승관에 공기를 주입하면서 loop-seal 을 통하여 상승관내로 고체를 주입시키고, 상승관내의 압력을 측정하여 압력분포가 일정한 상태에 이르면 이를 정상상태로 간주하여 이 조건에서 고체순환속도와 압력을 측정하였다. Downcomer 와 loop-seal 내로 주입되는 공기의 양과 공기주입위치를 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 또한, downcomer내 압력변이를 측정하였다. 실험변수 및 범위를 표 1 에 나타내었다. 실험에 사용된 고체입자는 FCC 입자로, 평균입경은 64 μm 이고 겉보기밀도는 1720 kg/m^3 이다.

결과 및 고찰

고체재주입 밸브로서 loop-seal을 갖는 순환유동층은 조업시 전체루프에 대해 다음과 같은 압력강하에 대한 수지식을 갖는다[2].

$$\Delta P_d = \Delta P_{LS} + \Delta P_R + \Delta P_{TS} \quad (1)$$

여기서, ΔP_d : pressure drop across downcomer

ΔP_{LS} : pressure drop across loop-seal

ΔP_R : pressure drop across riser

ΔP_{TS} : pressure drop across top section 이다.

압력수지식에서 나타나듯이 downcomer 내 압력강하는 압력수지를 맞추기 위해 압력강하를 자동적으로 보상하므로 고체재순환은 downcomer를 포함한 고체재순환부의 적당한 설계와 그 내부에서의 원활한 고체흐름에 의존함을 알 수 있다. Fig. 2는 고체순환속도에 대한 aeration velocity 의 영향을 각각의 초기 고체량에 대해 비교하여 나타내었다. 상승관내 기체유속은 2.0 m/s 로, Loop-seal 의 공기주입은 수평부분에서 U_{mf} 조건으로 일정하게 유지시켰고, 수직부분에서 최대 고체순환속도를 얻은 위치인 수평관위 0.2 m ($L_v/D_d=2.5$) 지점에서 공기주입 속도를 증가시키며 초기에 채워진 고체량 30 kg 과 20 kg 에 대해 고체순환속도의 변화를 측정하였다. 그림에서 보듯이 초기에 채워진 고체량이 30 kg 인 경우 최대 고체순환속도는 28 $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ 를 나타내었고, 초기 고체량이 20 kg 인 경우 최대 고체순환속도는 25 로 초기 고체량이 30 kg 인 경우 더 높은 고체순환속도를 얻을 수 있었다. 식 (1)에서 볼 수 있듯이 downcomer 상부의 압력강하는 각 구성부의 압력강하에 의존하게 된다. 이를 달리 표현하면, loop-seal 을 통해 흐를 수 있는 고체흐름속도는 downcomer 상부의 압력강하와 관계된다는 것이다. 따라서 초기에 채워진 고체량의 증가는 고체에 의한 하중의 증가를 의미하고 이는 궁극적으로 downcomer 상부의 압력강하를 더 크게 함으로써 Loop-seal 을 통해 흐를 수 있는 고체흐름속도를 증가시키게 되는 것이다. Fig. 3은 일정한 상승관내 기체유속($U_g=2.0\text{m/s}$)에서 고체순환속도를 변화시켰을 때와 일정한 고체순환속도($G_s=13.0\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)에서 상승관내 기체유속을 변화시켰을 때에 대해 각각 순환유동층시스템내 압력수지의 각 성분에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 보이는 것과같이 상승관내 기상유속이 감소하거나 고체순환속도가 증가할수록 상승관내 고체체류량이 증가하여 상승관의 압력강하는 증가하였다. 이 때 cyclone 과 loop-seal에서의 압력강하변화는 크지 않았고 압력수지식에 의한 바와 같이 downcomer에서의 압력강하가 상승관내 수지식을 맞추기 위해 동시에 증가하였다. 따라서 이로부터 loop-seal을 밸브로 갖는 순환유동층시스템에서는 다른 밸브형태를 갖는 시스템과는 달리 downcomer내 압력강하가 상승관내 압력강하와 직접적인 연관성을 가짐을 알 수 있다. 즉 downcomer내 압력강하로부터 상승관내 압력강하를 알 수

있고, 또한 상승관내 고체체류량을 예측할 수 있음을 알 수 있다. 이는 또한 downcomer내 고체흐름의 제어 또는 흐름의 안정성이 상승관내 직접적인 영향을 준다는 것을 의미한다.

이상과같은 상승관내 기상유속의 변화와 고체순환속도의 변화에 대한 각 구성성분의 압력강하의 변화는 압력변화 측정을 통해 고체순환속도 예측이 가능함을 알 수 있게 해준다.

만약, 상승관이 fully developed zone에서 조업이 된다면 상승관내 고체순환속도는 다음식에 의하여 예측할 수 있다.

$$G_s = \rho_s U_s \varepsilon_s \quad (2)$$

여기서 ρ_s 는 고체의 밀도, U_s 는 상승관내 고체 입자의 속도, ε_s 는 상승관내 고체 체류량을 나타낸다. 식 (2)에서 상승관내 고체체류량은 상승관내 압력차를 측정하여 다음식에 의해 구할 수 있다.

$$\varepsilon_s = \frac{(\Delta P_r / L)}{\rho_s g} \quad (3)$$

여기서, ΔP_r 는 상승관내의 압력강하를 나타낸다.

상승관내 고체입자의 속도, U_s 는 직접적인 측정이 어려우므로 실제 기체유속에 대한 고체입자속도의 비인 slip factor 를 도입하였다.

$$\varphi = \frac{U_g}{\varepsilon U_s} \quad (4)$$

이 slip factor 는 조업조건에 따라 변화된다. Patience 등(1992) 은 Froude number 함수 형태로 slip-factor 를 예측할 수 있는 다음과 같은 상관식을 제시하였다.

$$\varphi = 1 + 5.6/Fr + 0.47Fr_t^{0.41} \quad (5)$$

여기서, $Fr = \frac{U_g}{(gD)^{0.5}}$, $Fr_t = \frac{V_t}{(gD)^{0.5}}$ 이다.

식 (3), (4), (5) 를 식 (2)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_s = \rho_s \varepsilon_s \frac{U_g}{(1 - \varepsilon_s) \varphi} \quad (6)$$

그러므로, 식 (6)로부터 고체순환속도를 예측할 수 있다.

Fig. 4에 실험에서 얻은 고체순환속도의 결과와 식 (6)에서 구한 계산 결과를 비교해 보았다. 그림에서 보듯이 실험치와 계산한 결과는 잘 일치하였다.

참고 문헌

1. Merrow, E., Linking R & D to problems experienced in solids processing, *Chemical Engineering Processing*, May, 14-22 (1985)
2. Knowlton, T. M. and Hirsan, I., *Hydrocarbon Processing*, 57, 149-156 (1978)
3. Easu, P. and Fraser, S. A., *Circulating Fluidized Bed Boiler : design and operation*, Butterworth-Heinemann, Boston (1991)
4. Knowlton, T. M., *CFB technol. II*, edit by P. Basu and J. F. Lange, Pergamon Press, New York, 31-41 (1988)
5. Rudolph, V., Chong, Y. O. and Nicklin, D. J., *CFB technol. III*, edit by P. Basu and J. F. Lange, Pergamon Press, New York, 49-64 (1990)
6. Zenz, F. A., *Powder Technol.*, 47, 105-113, (1986)

Table 1 실험변수 및 범위

실험 변수	실험 범위
Inventory (kg)	20, 30
Gas Velocity (m/s)	1.5 - 4.0
Aeration Height (m)	0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8
Aeration velocity(m ² /s) × 10 ⁵	0.3 - 24.7

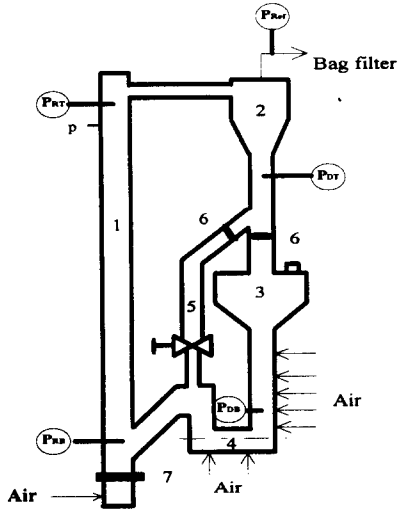


Fig. 1 Schematic diagram of apparatus
 1. riser, 2. cyclone, 3. hopper, 4. Loop-seal
 5. sampling port, 6. butterfly valve
 7. distributor, p: pressure taps

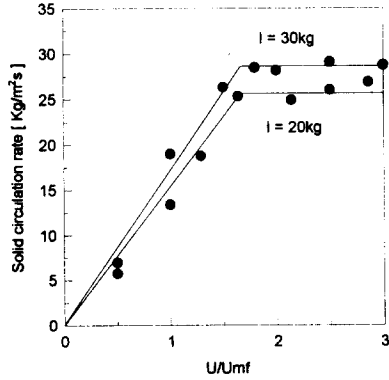


Fig. 2 The effect of aeration velocity on solid circulation rate
 (U_g=2.0m/s; I=20kg, 30kg)

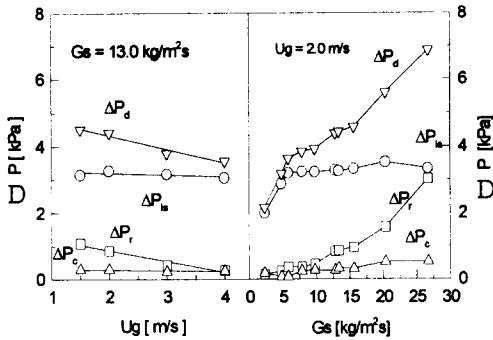


Fig. 3 Effect of gas velocity and solid circulation rate on the components of the pressure balance around the CFB loop (I = 30kg).

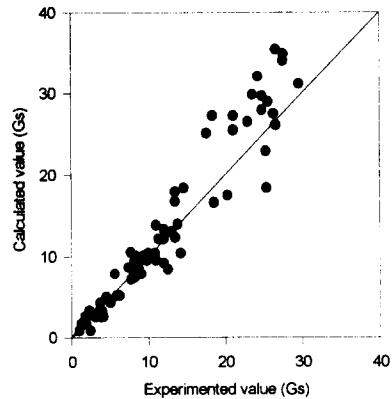


Fig. 4 Comparison between the measured and calculated values of solid circulation rate