

순환유동층내 Loop-seal 에서의 고체재순환에 대한 입자크기 및 밀도의 영향

김 성원, 안 정렬, 김 상돈
한국과학기술원 화학공학과 및 에너지·환경 연구 센터

Effects of particle size and density on solid recycle characteristics of Loop-seal in a Circulating Fluidized Bed

S. W. Kim, J. Y. Ahn and S. D. Kim
Dept. of Chem. Eng. & Energy and Environment Research Center
KAIST, Taejeon, Korea

서 론

기-고체간의 접촉효율이 높고, 층 내 전체에 걸쳐서 균일한 기-고의 접촉을 갖는 등 많은 장점이 있어 석탄연소로, 촉매반응기와 같은 여러 기-고 반응기에 적용이 확대되고 있는 순환유동층은 높은 유속에서 조업되므로 상승관내 고체입자들은 즉시 비산하게 된다. 따라서, 원활한 반응에 필요한 상승관내 적절한 고체체류량 유지를 위해 고체입자들 대부분은 싸이클론에서 포집되어 고체재순환부에 의하여 상승관내로 재주입된다.

Downcomer 하부에 위치하여 고체순환속도를 조절하는 고체재주입밸브에는 크게 기계적밸브와 비기계적밸브가 있다. Slide 밸브, rotary 밸브, screw 밸브 같은 기계적밸브는 기계적 구동부에 의해 고체흐름속도를 조절하는 반면, loop-seal, L-valve, J-valve, V-valve 와 같은 비기계적밸브는 공기주입량과 주입위치에 의해 고체흐름속도를 조절한다. 비기계적 밸브는 기계적밸브와 비교하여 설계가 간단하고, sealing 문제가 없어 고온, 고압에서의 조업에 적합하여 현재 순환유동층 연소로에서 널리 사용되고 있다[1].

순환유동층 조업시 공장에서 반응기가 정지되는 대부분의 문제는 화학반응과 관련된 것이 아니라 고체의 주입부나 재순환부에서 발생한다. 이와 관련하여 지금까지 L-valve, J-valve, V-valve 등 비기계적밸브에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 실제로 조업 중이거나 문헌상에 발표된 많은 순환유동층장치에서 loop-seal 이 사용됨에도 불구하고 loop-seal 에서의 고체흐름특성에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 최근에 Kim et al. [1] 이 loop-seal 의 고체재순환특성에 대한 연구를 발표하였으나, FCC 단일입자에 대한 연구로 입자특성에 따른 loop-seal 의 고체재순환특성에 대한 연구가 요구된다.

그러므로, 본 연구에서는 서로 다른 크기 및 밀도의 입자를 갖는 순환유동층에서 조업 변수 변화에 따른 loop-seal 의 고체흐름특성을 고찰하고, 얻어진 실험결과를 토대로 조업에 따른 loop-seal 에서의 압력강하를 예측할 수 있는 상관식을 제시하고자 하였다.

실 험

본 연구에서 사용한 순환유동층 장치를 Fig. 1 에 나타내었다. 장치는 상승관, 싸이클론, 호퍼, downcomer, loop-seal 로 구성되어 있다. 상승관은 내경이 0.1 m 이고, 높이는 5.3 m 이다. 상승관은 내부 흐름현상을 관찰하기 위하여 아크릴 관으로 제작되었다. 비산유출되는

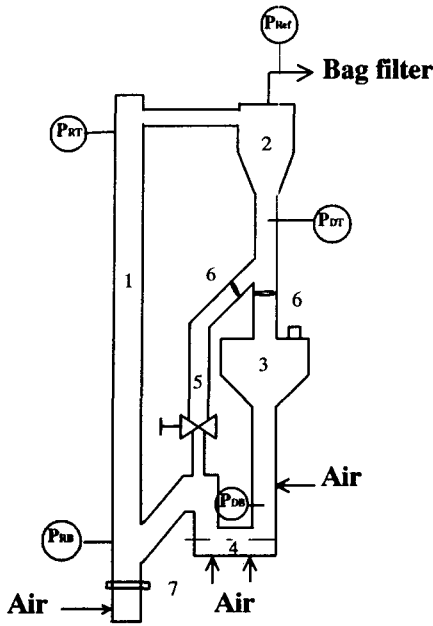


Fig. 1 Schematic diagram of apparatus
 1. riser, 2. cyclone, 3. hopper, 4. loop-seal
 5. sampling bottle, 6. butterfly valve
 7. distributor, p: pressure taps

고체입자를 포집하여 재순환 시키기 위하여 상승관 출구에 싸이클론을 설치하였고, 싸이클론에 잡히지 않는 입자는 bag filter를 사용하여 포집하였다. 싸이클론에서 포집한 입자를 저장하기 위하여 호퍼를 설치하였고, 저장된 입자는 downcomer 와 loop-seal 을 통하여 공기량 조절을 통해 고체의 양이 조절되어 상승관내로 재주입된다. Downcomer 와 loop-seal 은 아크릴로 제작되었고 내경은 0.08 m 이다. 고체재순환부에 대한 내용은 기존의 발표된 문헌 [2]에 자세히 나타나 있다. 순환유동층내 loop 의 압력분포를 측정하기 위해서 압력탭을 설치하였다. 압력을 측정하기 위하여 마노미터와 pressure transducer 를 사용하였다. 입자의 순환속도는 sampling bottle 을 사용하여 측정하였다.

실험은 상승관에 공기를 주입하면서 downcomer 와 loop-seal 내로 공기를 주입한후, 흐름이 정상상태에 이르면, 고체순환속도와 압력을 측정하였다. 순환유동층내 고체량은 35 kg, 상승관내 기상유속은 4.5 m/s 로 일정하게 유지시켰다. loop-seal 내 수직 공기주입위치는 Kim et al. [1] 이 제시한 최적의 공기주입위치인 loop-seal 수평관 직경에 대한 높이의 비가 2.5 인 지점에서 주입시켰다. 실험에 사용된 입자는 FCC 와 silica sand 입자로 물성을 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Physical properties of silica sand particles

	FCC	silica sand I	silica sand II	silica sand III	silica sand IV
Mean diameter, d_p [μm]	65	78	101	157	239
Apparent density, ρ_s [kg/m^3]	1720	3120	3120	3120	3120
U_{mf} [m/s]	0.0027	0.0067	0.0108	0.0225	0.0468
ϵ_{mf} [-]	0.496	0.493	0.476	0.461	0.439

결과 및 고찰

Fig. 2 에 loop-seal 의 수직공기 주입부에 주입된 공기유속에 대한 고체순환속도의 변화를 각각의 입자에 대해 나타내었다. 본 연구의 상승관내 유속은 4.5 m/s 로 일정하게 유지시켰고 loop-seal 하부의 유동화를 위한 수평하부의 공기주입속도는 loop-seal 의 직경을 기준으로 $1U_{mf}$ 를 각각 두 곳에서 주입시켰다. 수직공기주입부에서의 공기주입위치는 직경에 대한 높이의 비가 2.5 인 지점인 0.2 m 지점이다 [2]. Fig. 2 (a) 에서 보듯이 고체순환속도는 각각의 입자에 대해 공기주입량이 증가할수록 선형적으로 증가하였고, 일정량 이상에서 최대값에 도달 후 공기주입량의 증가에 관계없이 일정한 값을 유지하는 결과를 보였다. 공기유량 증가에 따른 고체순환속도의 증가는 입자의 크기가 작을수록 더욱 급격하게 증가하였다. Loop-seal 의 고체흐름은 주입된 공기의 입자사이 공극을 통한 흐름에서 오는 마찰력 생성과 항력의 고체입자 흐름에 대한 저항의 극복을 통해 이루어진다. 따라서 입자 크기의 증가는 흐름에 대한 저항이 더 크음을 의미하므로, 입자의 크기가 증가할수록 더 많은 공기량을 요구하게 된다. 그러나 최대고체순환속도는 입자의 크기에 관계없이 일정한 값을 나타내었다. 이러한 결과는 L-valve를 사용하여 입자크기에 대한 영향을 보인 Arena et al.

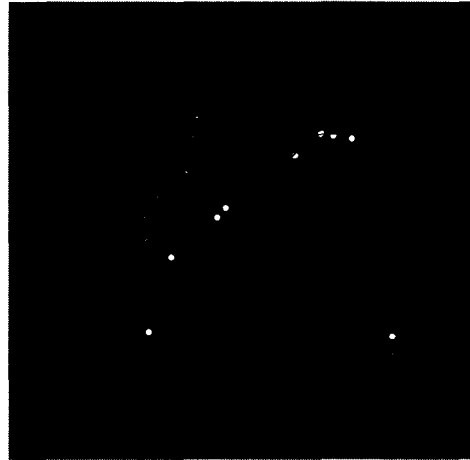
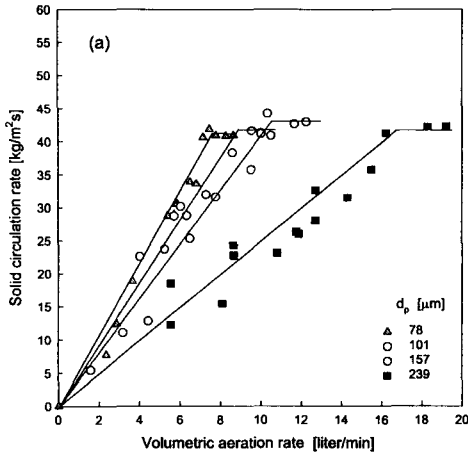


Fig. 2 (a) Effect of volumetric aeration rate on solid circulation rate
 (b) Effect of fluidizing number on solid circulation rate
 ($U_g=4.5$ m/s; Bottom aeration = $1.5 U_{mf}$; different particle size)

[2]의 결과와는 다른 것으로, 그들은 입자크기가 증가될수록 얻을 수 있는 최대고체순환속도의 값은 감소한다고 하였고, 이는 입자들의 크기가 증가할수록 downcomer 내 일정한 고체량 (inventory)에 대해 상대적으로 감소된 부피 또는 높이를 갖기 때문에 downcomer에서 얻을 수 있는 압력강하가 작기 때문이라고 하였다. 그러나, 본 연구에서는 downcomer 내에서 압력강하를 얻기 위한 입자층의 높이를 일정하게 하기 위하여 hopper를 설치하였고, 입자들이 hopper 배출구 이상으로 일정하게 유지시켰으므로 downcomer 내 압력강하는 모든 종류의 입자 경우에 downcomer의 높이에 해당하는 압력강하가 유지되었으므로 최대고체순환속도는 거의 일정해지는 결과를 얻은 것이다.

Fig. 2 (b)는 수직공기주입량을 fluidizing number의 관점에서 나타낸 것이다. Fluidizing number는 최소 유동화속도에 대한 수직공기주입속도의 비로서 층물질의 유동화 정도를 나타낸 것이다 [3]. 그림에서 보듯이 입자가 작을수록 상대적으로 높은 fluidizing number에서 최대고체순환속도에 도달하였다. 이는 입자크기가 클수록 주입된 공기가 상대적으로 낮은 fluidizing number에서 downcomer 내 고체입자와 기체의 속도차이인 slip velocity가 최소유동화속도 (U_{mf}) 또는 그 근처에 도달했다는 것을 의미하는 것이다. 입자크기가 가장 작은 $78 \mu\text{m}$ 모래의 경우 상대적으로 가장 높은 fluidizing number에서 최대고체순환속도에 도달하는데, 이는 Geldart A 입자의 흐름특성인 기체를 품고 하강하는 성질에 기인되는 것으로 판단된다 [4]. 즉, Geldart A 입자의 경우, 주입된 공기를 끌고 하강하는 성질로 인해 주입된 기체가 downcomer 내 충분한 압력강하를 형성시키지 못하는 특성을 갖는다. 따라서 입자의 크기가 작을수록 Geldart A 입자에 가까운 성질을 갖게되어 상대적으로 높은 fluidizing number에서 최대고체순환속도에 도달되는 것이다.

Fig. 3에 서로 다른 밀도를 갖고 비슷한 크기를 갖는 FCC와 silica sand에 대해 고체순환속도에 대한 주입된 공기유량과 fluidizing number의 영향을 나타내었다. 그림에서 보듯이 주입된 공기유량에 대해 두 입자는 유사한 고체순환속도의 변화를 나타내었다. 이는 입자들의 흐름정도가 입자의 밀도보다는 입자크기에 민감함을 나타내는 것으로, 고체입자의 흐름이 기체에 의한 항력에 의하므로, 항력의 정도에 직접적인 영향을 주는 입자의 투영면적 또는 입자의 크기가 흐름정도에 크게 영향을 미침을 의미한다. 또한, 이러한 결과는 밀도가 클수록 더 많은 공기량이 요구되는 L-valve에서의 결과[3]와는 다른 결과로 loop-seal의 경우 하부에서 최소유동화 속도 이상의 공기를 주입함으로써 하부의 입자들이

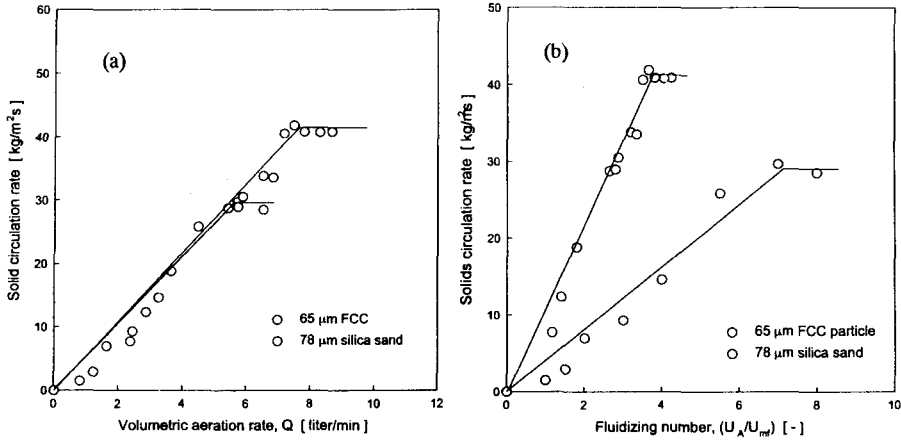


Fig. 3 (a) Effect of volumetric aeration rate on solid circulation rate
 (b) Effect of fluidizing number on solid circulation rate
 (Bottom aeration = 1.5 U_{mf}; different particle density)

이미 유동에 필요한 최소이상을 항력을 받고 있기 때문으로 판단된다.

본 연구에서는 loop-seal 조업특성을 고려하여, 조업에 따른 loop-seal 에서의 압력강하를 예측할 수 있는 상관관계식을 다음과 같이 제안하였다. 우선 loop-seal 의 조업 및 흐름형태는 크게 하부 수평관을 포함한 수직공기주입부와 weir 부에서의 거동으로 나누어질 수 있으므로 loop-seal 에서의 압력강하는 식 (1) 과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\Delta P_{ls}}{L_{ls}} = \frac{\Delta P_w}{L_w} + \frac{\Delta P_{va}}{L_{va}} \quad (1)$$

여기서 첨자 'w' 는 weir 부를 'va' 는 수직공기주입부를 각각 나타내며, L 은 해당 영역의 길이를 나타낸다. Wier 부의 경우, 유동층 상태이므로 고체체류량에 의해 압력강하가 영향을 받으므로, 내부 공극 (voidage) 을 최소유동화 이상의 상태로 가정하여, 최소유동화상태에서의 입자들의 bulk density 에 대해 다음의 상관식을 구하였다.

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{weir} = 0.965 \rho_{bulk, mf} \quad (2)$$

위의 상관식의 상관계수는 0.972 이고, 표준오차는 811.7 이다. 또한, 수평하부를 포함한 수직공기주입부의 경우 입자크기와 밀도, 고체순환속도에 큰 영향을 받으므로 [2,3] 다음과 같은 상관식을 구하였다.

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{va} = 0.00262 G_{s,d}^{0.432} \rho_s^{2.104} d_p^{-0.759} \quad (3)$$

식의 상관계수는 0.971 이고, 표준오차는 675.6 이다.

참고문헌

1. Kim, S.W., Namkung, W. and Kim, S.D.: "Solids flow characteristics in loop-seal of a circulating fluidized bed", *Korean J. Chem. Eng.*, **16**(1), 82 (1999)
2. Arena, U., Langeli, C. B. and cammarota, A.: "L-valve Behaviour with Solids of Different Size and Density", *Powder Technol.*, **98**, 231 (1998)
3. Cheng, L. and Basu, P.: "Effect of Pressure on Loop seal operation for a pressurized Circulating Fluidized Bed", *Powder Technol.*, **103**, 203 (1999)
4. Knowlton, T. M.: "Non Mechanical Solid feed and Recycle Devices for Circulating Fluidized Bed", in *CFB Technol. II*, eds. by P. Basu and J. F. Large, Pergamon Press, New York, 31 (1986)