

기-고 순환유동층에서 seal-pot을 이용한 고체순환량 조절

이현석, 박상순¹, 채호정¹, 정순용¹, 이 용, 이동현*
 성균관대학교 화학공학과, ¹한국화학연구원
 (dhlee@skku.edu*)

Solid Mass Flux Control using a Seal-pot in a Circulating Fluidized Bed

Hyun Suk Lee, Sang Soon Park¹, Ho Jeong Chae¹, Soon Yong Jeong¹, Yoong Lee,
 Dong Hyun Lee*

Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University

¹Alternative Chemicals / Fuel Research Centre, Korea Research Institute of Chemical
 Technology
 (dhlee@skku.edu*)

서론

기-고 순환유동층은 고속의 기체와 크기가 작은 고체입자간의 긴밀한 접촉을 통하여 대규모의 여러 가지 화학적, 물리적 작업을 수행하는 유동층 기술의 한 분야이다[1].

기-고 순환유동층은 유동층 내부의 기상 유속을 증가시킴으로써 고체입자들이 riser 내부를 통하여 격렬하게 상승하도록 하고 riser 상부를 통해 비말동반 된 고체입자들을 cyclone과 같은 집진장치를 통하여 포집하여, 다시 층 내로 재 주입되는 장치로서 기체-고체간의 혼합 및 접촉 효과가 우수하여 FCC 공정, coal combustion, MTO(Methanol to Olefin) 공정과 같은 다양한 촉매반응에 이용된다[2]. 순환유동층 반응기에 주입되는 기체와 생성되는 기체의 혼합방지 및 고체입자의 순환량을 조절하기 위해 seal-pot과 같은 비기계적 밸브가 사용되고 있다.

본 연구에서는 9 mm-ID 순환유동층 반응기에서 seal-pot을 이용하여 공기주입량과 공기주입위치 그리고 촉매 주입량에 따른 최대 고체순환량을 파악하였고, 이를 바탕으로 1in-ID 순환유동층 장치와 기존문헌에서의 기체유속에 따른 고체순환량을 비교하였다.

실험

Fig. 1은 본 실험에 사용된 순환유동층 장치를 개략적으로 나타낸 그림이다. 순환유동층은 고체입자의 흐름을 관찰하기 위하여 acrylic column으로 제작되었으며, riser의 내경은 9mm이고 높이는 1.9m로 구성되어 있다. 실험에 사용된 고체 입자는 FCC (Fluid Cracking Catalyst) 입자가 사용되었으며, Table 1에 사용된 고체입자의 물리적 성질을 나타내었다. 본 실험에 사용된 기체는 air를 사용하였으며, pore사이즈가 40 μ m, 두께 3mm인 sintered plate를 통해 riser, seal-pot, bubbling bed에 공급된다. Bubbling bed에 고체입자(0.15~0.2kg)를 넣고 air에 의해 유동화 된 촉매입자는 seal-pot과 riser를 거쳐 비말 동반된다. 이러한 입자들이 cyclone에 포집된 후, bubbling bed와 seal-pot을 거쳐 riser로 재순환하게 된다. 그리고 cyclone과 bubbling bed 사이에 설치된 ball valve를 이용하여 순환유동층이 정상상태

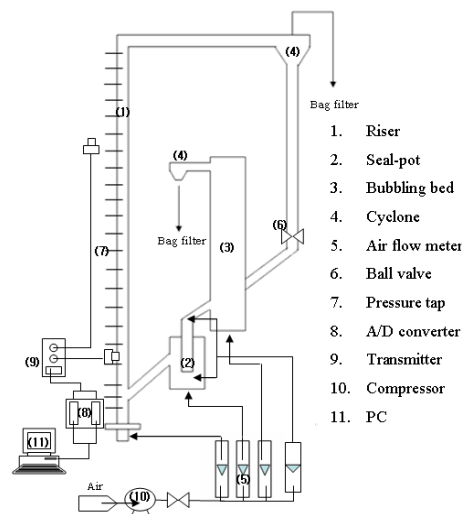


Fig. 1. Schematic diagram of 9mm-ID cold-bed circulating fluidized bed.

로 조업될 때 밸브를 닫고 column에 채워진 입자량을 측정하여 고체순환량을 결정하였다.

Fig. 2는 한국화학연구원에 설치된 1 in-ID cold-bed 순환 유동층 장치를 나타낸 그림이다. 장치는 acrylic column으로 제작되었으며 riser의 내경은 1 in이고 높이는 4 m로 구성되어 있다. 장치에 사용된 기체, sintered plate, 고체입자는 Fig. 1의 것과 동일한 것으로 사용되었다.

Fig. 3은 seal-pot의 공기주입 위치를 나타낸 개략도이다. Bubbling bed에서 seal-pot으로 내려오는 고체입자를 원활히 수송시키기 위해 standpipe에 공기가 주입되었으며, seal-pot 하부 sintered plate에서 3cm 높이에 수직 방향으로 공기를 주입시켜 공기 주입량, 주입위치에 따른 고체순환량 변화를 고찰하였다.

Table 2 에는 본 실험에 사용된 실험변수와 범위를 나타내었다.



Fig. 2. 1in-ID cold-bed circulating Fluidized Bed.

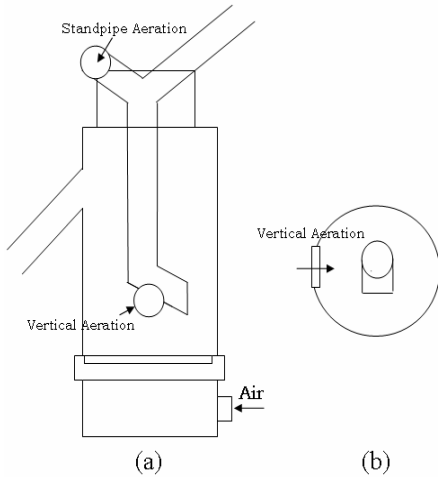


Fig. 3. Schematic diagram of seal-pot aeration part.
; (a) Front view of seal-pot
(b) Upper view of seal-pot

Table 1. Physical properties of FCC(Engelhard)

Material	FCC (Engelhard)
d_p , (μm)	82.36
ρ_s , (kg/m^3)	2436.3
U_{mf} , (cm/s)	0.501
U_t , (cm/s)	37.7
Geldart's group	A

Table 2. Experimental variables and ranges

Experimental variables	Range
U_r (m/s)	2.18~3.93
U_{sea}/U_{mf} (-)	2.44~7.09 U_{mf}
U_A (cc/min)	15~225
Solid inventory (kg)	0.15~0.2

결과 및 토론

Fig. 4는 seal-pot에서의 공기주입량과 위치에 따른 고체순환량을 나타낸 그림이다.

일정기체유속($U_r:3.06\text{m}/\text{s}; U_{sea}/U_{mf}:3.99U_{mf}$)에서 seal-pot 상부의 standpipe에 만 공기를 주입할 경우 기체유량에 따라 증가하다가 최대유량 (47.5cc/min) 이후에는 고체순환량이 급격히 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과는 기체유량이 증가함에 따라 bubbling bed로 올라가는 기포의 수가 증가하고, 커짐에 따라 bubbling bed에서 내려오는 고체입자의 흐름을 방해하는

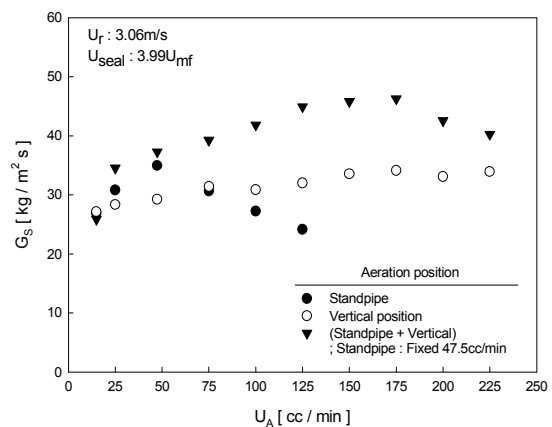


Fig. 4. Variation of the solid mass flux with U_A .

slugging 현상이 일어나 고체순환량의 급격한 감소가 일어난 것으로 판단된다.

Seal-pot 하부 분산판 위로 3cm지점에 수직방향의 공기주입(Vertical aeration)만 시켰을 경우 유입되는 공기의 유량이 증가함에 따라 고체순환량이 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 기-고의 상대속도의 차이로 인해 입자의 견인력(drag force)이 발생하여 고체순환량의 증가가 나타난 것으로 보인다[2]. Standpipe aeration의 최대순환량 조건인 기체유량을 47.5cc/min로 고정시킨 후 수직방향으로 공기주입에 따른 고체순환량을 측정하였다. 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 종전의 standpipe만 주입하였을 경우와 비교해 보면 고체순환량이 최대 1.9배까지 증가함을 알 수 있다.

Fig 5 는 riser의 유속에 따른 고체순환량을 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 riser의 유속이 증가함에 따라 기체의 모멘텀이 증가하므로 seal pot에서 riser로 주입된 고체량이 좀 더 빨리 층 밖으로 유출되므로 고체순환량이 증가함을 알 수 있다. 또한 solid inventory의 증가에 따라서도 고체순환량이 증가함을 알 수 있다.

그림 6은 seal-pot유속에 따른 고체순환량 분포를 나타낸 그림이다. Seal-pot유속이 증가함에 따라 고체순환량은 증가하였으며 최대점을 지난 이후에서는 최대 10kg/m²s의 고체순환량이 감소하였다. 또한 고체주입량 (solid inventory)이 증가함에 따라 고체순환량이 증가하였으며 최대 1.7배까지 증가하였다. 그림 5와 6을 비교하면 고체순환량의 감소폭은 riser 유속변화에 의한 것보다 seal-pot유속변화에 의한 것이 더 컸다.

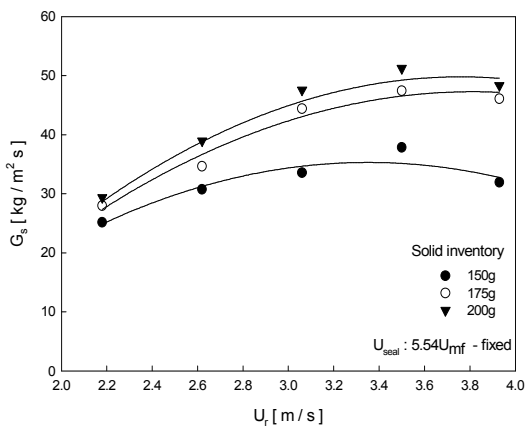


Fig. 5. Effect of U_r and solid inventory on solid mass flux distribution.

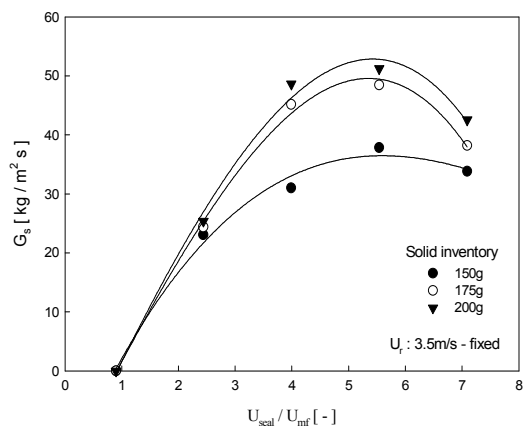


Fig. 6. Effect of U_{seal}/U_{mf} and solid inventory on solid mass flux distribution.

Fig. 7은 seal-pot 유속에 따른 고체순환량 분포를 1in-ID 순환유동층 반응기와 기존문헌과의 비교를 나타낸 그림이다. 본 결과는 화학연구원에 설치된 1in-ID 순환유동층 반응기와 Kim et al. [3] 이 실험한 결과를 비교하였다. 9mm-ID, 1in-ID 순환유동층 반응기는 seal-pot 하부의 bottom aeration을 시켰으며, Kim et al. [3]은 loop-seal 하부의 bottom aeration을 일정하게 유지시킨 뒤 loop-seal 특정 높이에 vertical aeration 유속에 따라 고체순환량을 측정된 결과이다. Fig. 7을 보면 seal-pot의 유속이 증가함에 따라 고체순환량은 증가했으며 특정 유속 이후에서는 고체순환량이 일정한 경향을 나타내었다. 그러나 9mm-ID 순환유동층 반응기에서는 $5.54U_{mf}$ 이후에서는 고체순환량의 감소를 나타내었다. 이는 seal-pot에서 riser로 고체입자를 이송시키는 관의 내경이 9mm로 매우 작기 때문에 벽효과 (wall effect)에 의하여 seal-pot 유속이 증가함에 따라 seal-pot 내부에서 고체입자의 불규칙적인 fluctuation 현상이 발생하여 고체입자의 양이 급격히 감소한 것으로 보인다.

결론

본 연구에서는 내경이 9 mm이고 높이가 1.9 m인 기-고 순환유동층에서 비기계적 밸브의 한 종류인 seal-pot을 이용하여 공기주입위치, 공기주입량 그리고 촉매 주입량에 따른 고체 입자 순환량의 변화를 살펴보았다.

Seal-pot 상부의 standpipe와 seal-pot하부에 설치된 분산관 위로 3cm 지점에 수직방향으로 공기를 동시에 주입시켰을 때의 고체순환량은 단일 주입 시 보다 최대 1.9배 증가하였다. 이러한 조건을 토대로 순환유동층 내 고체주입량과 기체 유속 변화에 따른 고체순환량을 고찰한 결과 고체주입량이 증가함에 따라 고체순환량은 최대 1.7배까지 증가하였으며 기체의 유속이 증가함에 따라 고체순환량은 증가하지만 특정 유속 이후에는 최대 $10\text{kg/m}^2\text{s}$ 의 고체순환량이 감소하였다. 이는 1in-ID x 4m 순환유동층 장치와 기존문헌의 결과와는 다른 결과를 나타내었다.

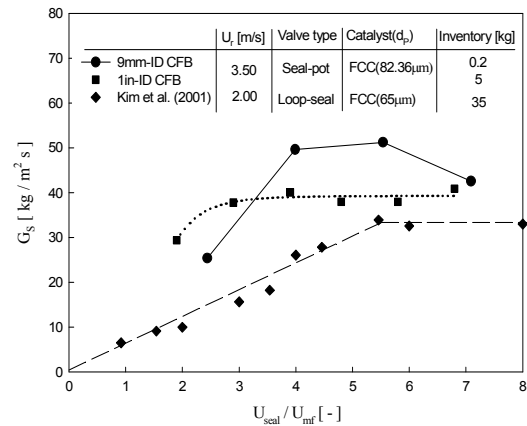


Fig. 7. Effect of $U_{\text{seal}}/U_{\text{mf}}$ on solid mass flux distribution in comparison with data of 1in-CFB and previous study.

기호설명

- d_p Mean diameter of particle (μm)
- G_s Solid mass flux ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
- U_b Bubbling bed inlet velocity (cm/s)
- U_{mf} Minimum fluidization velocity (cm/s)
- U_r Riser inlet velocity (m/s)
- $U_{\text{seal}}/U_{\text{mf}}$ Seal-pot inlet velocity (-)
- U_t Terminal velocity (m/s)
- ρ_s Particle density (kg/m^3)

참고문헌

- Ahn, G. R. and Han, G. Y, *HWAHAK KONGHAK*, **34**, 735 (1996).
- Cho, Y. J, *Journal of Korea Society of Environmental Administration*, 12(1), 53 (2006).
- Kim, S. W., Namkung, W. and Kim, S. D, *Chem. Eng. Technol*, 24(8), 843 (2001).