

## 기-고 순환유동층에서 실험변수에 따른 감쇄상수 분포

이현석, 박상순<sup>1</sup>, 채호정<sup>1</sup>, 정순용<sup>1</sup>, 이동현\*  
 성균관대학교 화학공학과, <sup>1</sup>한국화학연구원  
 (dhlee@skku.edu\*)

Decay Coefficient Distribution with Experimental Variables  
in a Gas-Solid Circulating Fluidized Bed

Hyun Suk Lee, Sang Soon Park<sup>1</sup>, Ho Jeong Chae<sup>1</sup>, Soon Yong Jeong<sup>1</sup>, Dong Hyun Lee\*  
 Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University  
<sup>1</sup>Alternative Chemicals / Fuel Research Centre, Korea Research Institute of Chemical  
 Technology  
 (dhlee@skku.edu\*)

## 서론

국제 유가의 불안정성과 대체에너지 기술 개발의 일환으로 기존 공정에 새로운 기술을 접목시키는 연구가 수행 중이다. 최근 들어 각광을 받고 있는 기술은 유동층을 이용한 신기술개발인데, 이 중 순환 유동층을 응용한 수많은 새로운 공정들이 개발되고 있다.

본 연구에서는 비기계적 밸브의 한 종류인 seal-pot이 채택된, 내경이 9 mm이고 높이가 1.9m 인 순환유동층 반응기를 이용하여 실험변수에 따른 상승관에서의 고체체류량 분포를 확인하고, 이 분포를 이용하여 평균 고체체류량을 구해 상승관 내 고체체류시간 분포 및 감쇄상수를 파악하였다.

## 이론

## 1. 상승관 내에서의 수력학적 특성

상승관 내 축방향 고체체류량 분포는 상승관 높이에 따른 압력을 측정하여 계산하며, 식(1)과 같이 나타낸다. 기체밀도는 고체밀도에 비해 무시할 수 있을 정도로 작으므로 식(2)와 같이 나타낸다. 상승관 내의 고체체류량 분포는 일반적으로 Fig. 1과 같으며, 측정된 고체체류량의 평균값은 식(3)을 이용하여 나타낸다. 또한 측정된 상승관 입/출구의 체류량을 바탕으로 식(4)를 이용하여 감쇄상수(decay coefficient)를 구한다[1].

$$-\frac{\Delta P}{\Delta Z} = (\rho_s \epsilon_s + \rho_g (1 - \epsilon_s))g \quad (1)$$

$$-\frac{\Delta P}{\Delta Z} = \rho_s \epsilon_s g \quad (2)$$

$$\bar{\epsilon}_s = \frac{1}{Z_1} \int_0^{Z_1} \epsilon_s dZ \quad (3)$$

$$\bar{\epsilon}_s = \epsilon_s^* + \frac{\epsilon_{sd} - \epsilon_{se}}{\alpha Z_1} \quad (4)$$

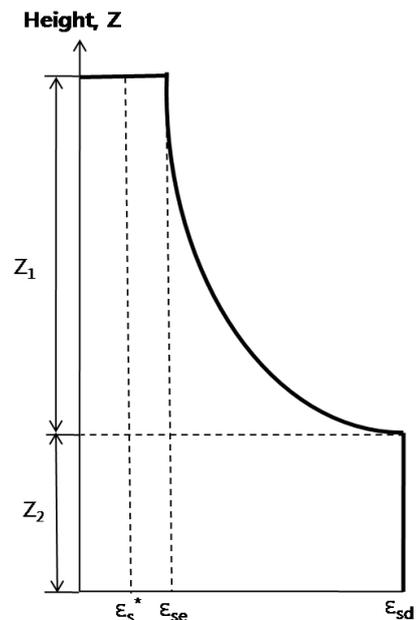


Fig. 1. Solid hold-up distribution in fast fluidization[1].

## 2. 고체순환량 분포

순환유동층 장치에서의 고체순환량 측정은 정상상태 조업이 이루어졌을 때 cyclone과 bubbling bed 사이에 위치한 ball valve를 이용해 관에 일정시간 동안 쌓은 입자의 높이를 통해 구할 수 있으며 이때 고체순환량을 구하는 식은 다음과 같이 나타낸다.

$$G_s = \frac{\rho_b \times \Delta h}{t} \quad (5)$$

## 3. 상승관 내의 고체체류시간 분포

순환유동층 장치에서의 고체체류시간 분포는 입자의 물성과 수력학적 특성결과의 변수로 나타내며, 식(3)을 통한 결과값을 식(6)에 대입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다[2].

$$\overline{t_{res}} = \frac{\overline{\epsilon_s} \times \rho_p \times \Delta Z}{G_s} = \frac{\Delta P}{G_s \times g} \quad (6)$$

## 실 험

Fig. 2는 본 실험에 사용된 순환유동층 장치를 개략적으로 나타낸 그림이다. 순환유동층은 고체입자의 흐름을 관찰하기 위하여 아크릴로 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 유동화 기체는 air를 사용하였으며 장치 순환에서 발생하는 정전기를 방지하기 위해 장치 전체에 접지를 실시하였다. 본 연구에 사용된 분산판은 pore사이즈가 40 $\mu$ m, 두께 3mm인 sintered plate를 사용하였으며, 이를 통해 riser, seal-pot, bubbling bed에 유동화 기체가 균일하게 공급될 수 있도록 하였다. Bubbling bed에 고체입자(0.15 / 0.2kg)를 넣고 air에 의해 유동화 된 촉매입자는 seal-pot과 riser를 거쳐 비말 동반되어 cyclone을 통해 포집된 후, 다시 bubbling bed와 seal-pot을 거쳐 riser로 재순환하게 된다. 상승관에서의 압력을 측정하기 위하여 압력탭이 설치되었으며, 입자의 유출을 방지하기 위해 필터가 설치되었다. 그리고 pressure transmitter와 A/D converter를 이용하여 1분에 60개의 데이터를 총 3분간 컴퓨터를 통해 받아 통계적으로 처리하였다. 그리고 cyclone과 bubbling bed 사이에 설치된 ball valve를 이용하여 순환유동층이 정상상태로 조업될 때 밸브를 닫고 column에 채워진 입자량을 측정하여 고체순환량을 결정하였다. Table 2 에는 본 실험에 사용된 실험변수와 범위를 나타내었다.

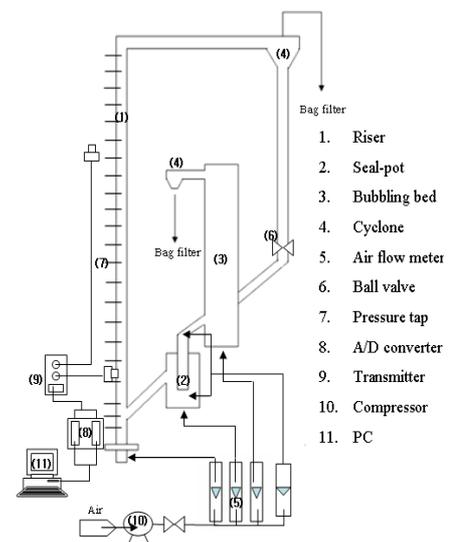


Fig. 2. Schematic diagram of 9mm-ID X 1.9m-high cold-bed circulating fluidized bed reactor.

Table 1. Physical properties of inert particle.

Material	FCC
$d_p$ , ( $\mu$ m)	82.36
$\rho_s$ , ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1885.65
$U_{mf}$ , (cm/s)	0.501
$U_t$ , (cm/s)	28.2
Geldart's group	A

Table 2. Experimental variables and ranges.

Experimental variables	Range
$U_r$ (m/s)	2.62~3.50
$U_{seal} / U_{mf}$ (-)	2.44~5.54 $U_{mf}$
$U_b$ (-)	3 $U_{mf}$
Solid inventory (kg)	0.15 / 0.20

### 결과 및 토론

Fig. 3은 고체주입량과 기상유속에 따른 고체순환량 분포를 나타낸 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 상승관 유속이 증가할수록 기-고상대속도 차이로 인하여 입자의 견인력(drag force)이 발생하여 고체순환량은 증가하는 경향을 나타냈으며, Seal-pot의 유속이 증가함에 따라 고체순환량은 증가하다 특정 유속 범위를 지나면 고체순환량은 일정한 경향을 나타냈다. 또한 고체주입량이 증가할수록 bubbling bed 내부에 static head의 상승으로 인한 압력이 증가하여 seal-pot으로 넘기는 고체의 양이 증가하여 고체순환량은 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 4는 고체순환량과 고체주입량에 따른 상승관 내 평균고체체류시간을 나타낸 그래프이다. 이것은 상승관 내의 압력강하를 측정하여 실험변수에 따라 Fig. 1과 같은 형태의 그래프로 나타낼 수 있으며(내경이 9mm로 매우 작아,  $Z_2$  높이만큼의 일정한 고체체류량을 유지할 수 없으며, 높이  $Z_1$ 만큼의 체류량 분포를 나타냄), 이러한 결과를 토대로 식(1)~(6)을 이용하여 나타냈다. 그림에서 볼 수 있듯이 고체주입량이 증가할수록 상승관 내 고체체류시간은 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 고체주입량 증가로 인해 버블링베드 static head의 상승으로 인하여, seal-pot으로의 공급량이 증가하여, 상승관 내부에 고체체류량이 증가하게 되고 이에 따라서 평균 고체체류량의 증가가 생겨 상승관 내 고체체류시간이 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 고체순환량이 증가할수록 식(6)과 같이 평균 고체체류시간은 감소하는 경향을 나타냈다.

Fig. 5는 식(3)을 이용하여 상승관 입/출구에서의 고체체류량을 이용하여 본 실험조건에서의 감쇄상수(decay coefficient)를 나타낸 그래프이다. 일반적으로 내경이 5cm이상에서의 데이터가 대부분이며 기존장치(내경: 9mm)에서 감쇄상수를 예측할 수 있는 데이터가 없는 실정이다. 따라서 본 실험 조건을 토대로 Fig. 5에 나타냈으며 대략  $\alpha U_r = 3$ 이상에서 결과가 나타났다. 일반적으로 관의 내경이 작을수록 상승관을 통해 상승되는 입자들의 멍침 현상으로 인해 감쇄상수는 증가하는 경향을 나타낸다고 하였으며[1], 이러한 결과를 기존문헌의 결과의 물성들과 비교하였다. 기존 문헌의 장치 내경에 비해 매우 작기 때문에 감쇄상수의 값은 비슷한 조건의 기존 문헌의 결과 보다 큰 결과를 얻었다.

### 결론

본 연구에서는 내경이 9 mm이고 높이가 1.9 m인 기-고 순환유동층에서 비기계적 밸브의 한 종류인 seal-pot을 이용하여 실험변수에 따른 고체순환량 분포, 실험변수에 따른 평균고체체류시간 분포 그리고 이러한 변수들을 통해 계산된 감쇄상수(decay coefficient)에

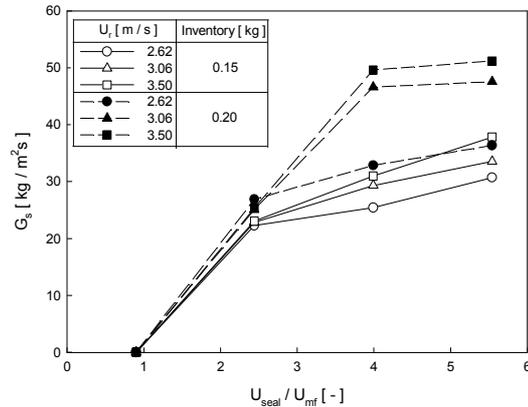


Fig. 3. Effect of gas velocity and solid inventory on solid mass flux.

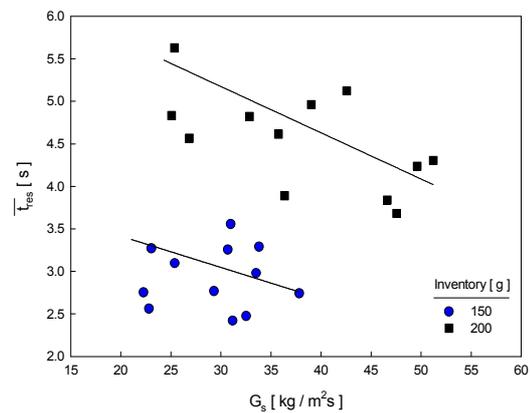


Fig. 4. Effect of solid inventory and solid circulation rate on solid residence time distribution in a riser.

대해 알아보았다. 일반적으로 상승관에서의 고체체류시간 분포는 상승관의 유속과 고체순환량을 변수로 사용하지만, seal-pot에 의해 고체순환량이 조절되는 경우 장치 내 주입되는 고체주입량과 seal-pot의 유속에 따라 고체체류시간이 결정된다. 본 실험결과 고체주입량이 증가할수록 static head의 상승으로 인하여 상승관에 주입되는 고체의 양이 증가하여 장치 내에 걸리는 압력이 증가한다. 이것은 상승관 내 고체체류량이 증가함을 의미하며, 이에 따라서 상승관 내 고체의 체류시간 또는 길어지며, 고체순환량이 증가할수록 평균 체류시간은 감소하게 된다. 또한 감쇄상수를 파악함으로써 상승관 내 입/출구의 체류량 분포 및 상승관 entry zone과 free-board zone을 사전에 파악이 가능하며 관의 내경이 작기 때문에 감쇄상수는 기존문헌에 비해 다소 큰 결과를 얻었다.

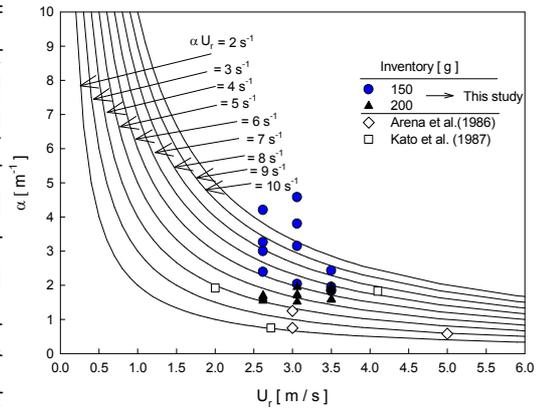


Fig. 5. Decay coefficient in the entrainment region experimental compared with previous study.

Table. 3 Experimental conditions for data of Fig. 5

	$d_t$ (cm)	Solid type	$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$U_r$ (m/s)	$G_s$ ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ )
Arena et al. 1988 [3]	4.1 / 12	FCC/glass	70	2.5~5	49, 120
Kato et al. 1987 [4]	6.6 / 9.7	FCC	61	2~4.4	48~50

## 기호설명

$d_p$	Mean diameter of particle ( $\mu\text{m}$ )
$d_t$	Column diameter in a riser (cm)
$G_s$	Solid mass flux ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ )
$g$	Gravitational acceleration ( $\text{m}/\text{s}^2$ )
$\rho_s$	Particle density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$t$	Time (sec)
$\bar{t}_{res}$	Average solid residence time (sec)
$U_b$	Bubbling bed inlet velocity (cm/s)
$U_{mf}$	Minimum fluidization velocity (cm/s)
$U_r$	Riser inlet velocity (m/s)
$U_{seal}/U_{mf}$	Seal-pot inlet velocity (-)
$U_t$	Terminal velocity (m/s)
$\Delta Z$	Height of riser (m)
$Z_1$	Free-board height in a riser
$Z_2$	Entry zone height in a riser
$\epsilon_s$	Solid hold-up in a riser (-)
$\alpha$	Decay coefficient ( $\text{m}^{-1}$ )

## 참고문헌

1. Kunii, D. and Levenspiel, O. Fluidization Engineering, Butter-worth-Heinemann (1991).
2. Smolders, K. and Baeyens, J. Chemical Engineering Science, 55, 4101~4116, (2000).
3. Arena, U., Cammarota, A. and Piston, L., in circulating fluidized bed technology, P. Basu, ed., p. 119, Pergamon, New York, (1986).
4. Kato et al. paper delivered at Soc. Chem. Eng. Japan annual meeting, April (1987).