

## 순환유동층에서 고체 투입량 및 상승관 유속에 따른 고체순환속도 측정 및 유동모사

임종훈<sup>1</sup>, 이동현<sup>1\*</sup>, 박상순<sup>1,2</sup>, 채호정<sup>2</sup>, 정순용<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>성균관대학교 화학공학과  
<sup>2</sup>한국화학연구원  
 (dhlee@skku.edu\*)

**Experimental Measurement and CFD Simulation on Solid Circulation Rate in Circulating Fluidized Beds by Solid Inventory and Riser Velocity**

Jong Hun Lim<sup>1</sup>, Dong Hyun Lee<sup>1\*</sup>, Sang Soon Park<sup>1,2</sup>, Ho Jeong Chae<sup>2</sup>, Soon Yong Jeong<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University  
<sup>2</sup>Korea Research Institute of Chemical Technology  
 (dhlee@skku.edu\*)

### 서론

순환유동층(circulating fluidized bed, CFB)은 기포유동층에 비해 높은 유속에서 조업이 되는 반응기로서 고속의 기체와 미립자 간의 긴밀한 접촉을 통해 대규모의 화학적, 물리적 작업을 수행하는 유동층 기술의 한 분야이다. 순환유동층은 높은 유속에서 반응이 진행되므로, 고속유동층(high velocity fluidized bed)이라고 불리기도 하며, 이는 조업 유속의 범위가 넓고 기체 주입속도가 빨라서 고체처리 능력이 크며 기체가 plug flow 상태로 유지되기 때문에 기체의 back mixing이 적고, 기-고상 간의 접촉 효율이 높고 접촉이 균일하게 되기 때문에 높은 반응 전환율 및 열전달 속도를 얻을 수 있다[1].

한편, 급속도로 발전하게 된 산업화와 인구의 증가로 인하여 발생하는 환경오염, 원유가의 불안정성 그리고 대체에너지원 개발을 위해 효율적이고 경제적인 공정 개발이 필요하였으며, 이에 따라서 순환유동층 반응기가 주목을 받게 되었다[2]. 또한 화석연료 고갈 및 가격상승으로 인해 메탄올을 이용하여 국가 석유화학산업의 기초 원료가 되는 올레핀을 직접적으로 생산하기 위해 순환유동층 장치를 이용한 MTO (Methanol to Olefins) 공정이 개발에 관한 연구가 이루어지고 있는 실정이다. 순환유동층 장치를 이용한 MTO 공정의 수율을 높이기 위해서는 반응기 내 촉매의 체류량을 높이는 것이 중요하며, 반응기 내의 기체 속도, 압력, 고체의 투입량, 밸브 등의 조업조건 및 장치 구성에 따라 변화한다.

또한, 실험을 통한 유동특성의 파악은 실험장치의 제작 및 시간에 따른 비용이 소요되므로 전산유체역학을 이용한 유동모사를 수행함으로써 실험에 드는 비용을 절감하고 조업조건 및 장치 구성의 변화에 따른 다양한 유동특성을 예측할 수 있다.

본 연구에서는 lab-scale 수준의 순환유동층 장치에서 고체의 투입량 및 상승관의 유속의 변화에 따른 고체 체류량 분포 및 순환량의 변화를 실험을 통해 살펴보았다. 향후 전산유체역학을 이용하여 실험조건과 동일한 case의 유동모사를 수행하여 본 실험의 결과와 비교하고, 나아가 조업조건 및 장치 구성의 변화에 따른 경우에 대해 순환유동층에 대한 유동특성을 폭넓게 연구하고자 한다.

### 실험 방법

Fig.1은 본 연구에 사용된 순환유동층 장치의 모습을 나타내고 있다. 반응기 전체 높이는 2.6m로, 9mm의 상승관이 설치되어 있다. 고체 흐름의 제어는, downcomer의 하단에서 재생기로 투입되는 고체는 seal-pot을 통해 제어되며, 재생기로부터 상승관으로 유입되는

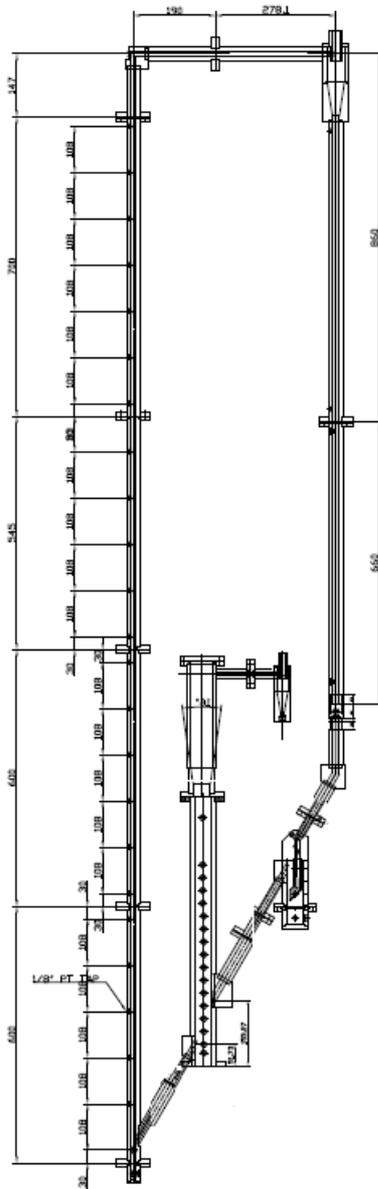


Fig. 1 실험에 사용된 순환유동층 장치의 개략도

고체는 pinch-valve를 통해 제어되었다. 장치 내에 투입된 고체는 FCC 촉매이며, 기체는 air가 사용되었다. 물성은 Table 1과 같다.

Table 1 실험에 사용된 물질의 물성

Solid	FCC
평균입도 ( $\mu\text{m}$ )	82.37
Particle Density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1885.65
Bulk Density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	781
Terminal Velocity (m/s)	0.282
Geldart classification	Group A
Fluidizing gas	Air
Density [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	1.2
Viscosity [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]	$1.95 \times 10^{-5}$

FCC 촉매의 투입량은 300, 400, 500, 600 g이며, 상승관에서의 기체유속은 각각의 조건에 대해 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5m/s로 하였다.

상승관 내의 고체 체류량 분포의 측정은 높이에 따른 압력강하의 측정을 통해 이루어졌으며 아래의 식을 통해 고체의 fraction을 구하였다.

$$-\frac{\Delta P}{\Delta L} = (\rho_s \epsilon_s + \rho_g \epsilon_g)g$$

여기에서 기체의 밀도는 고체의 밀도에 비해 매우 작기 때문에 기체의 밀도를 무시하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$-\frac{\Delta P}{\Delta L} = \rho_s \epsilon_s g$$

고체순환량은 downcomer를 통해 측정하였으며, 실제 고체순환량은 상승관에서의 값을 구해야 하므로 downcomer에서 구해진 값에 관의 직경을 고려하여 다음과 같이 계산하였다.

$$G_s = \frac{\rho_b \Delta Z}{t} \times \frac{A_{Down}}{A_{Riser}}$$

**결과 및 토의**

Fig. 2는 고체 투입량 300g에서 상승관의 기체 유속을 변화시켰을 때의 고체 체류량 분포를 나타낸 그림이다. 상승관 하단의 dense한 부분에서의 고체체류량은 0.06~0.21을 나타내고 있으며, 중단에서는 약 0.02, 그리고 상단에서의 체류량은 0.01을 나타내고 있으며 이는 fast fluidization 영역에 해당한다[3]. 상승관 유속에 따라 고체체류량이 낮은 쪽으로 변화하며 전체적으로 유속이 증가함에 따라 상승관 내의 고체체류량이 증가한 모습을 보이고 있다.

Fig. 3은 상승관 유속 2.0m/s에서 고체 투입량의 변화시켰을 때의 체류량 분포를 나타낸 그림이다. 체류량 분포는 고체 투입량에 따라서 명확하게 증가한 모습을 나타내고 있다. 300g을 투입하였을 때 고체체류량  $\epsilon_s$ 는 약 0.01 정도의 값을 보였으나, 600g까지 증량

하여 투입하였을 경우  $\epsilon_s$ 는 약 0.07까지 증가하는 모습을 나타내었다. Fig. 3과 Fig. 4를 비교하였을 때 고체투입량의 증가가 반응기 내 고체체류량 분포에 직접적으로 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

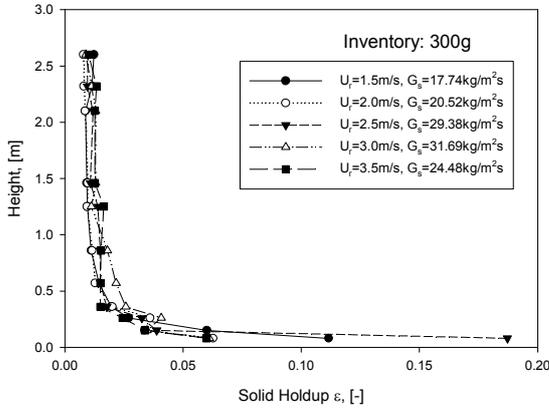


Fig. 2 고체투입량 300g에서 상승관 유속에 따른 관 내 고체체류량 분포

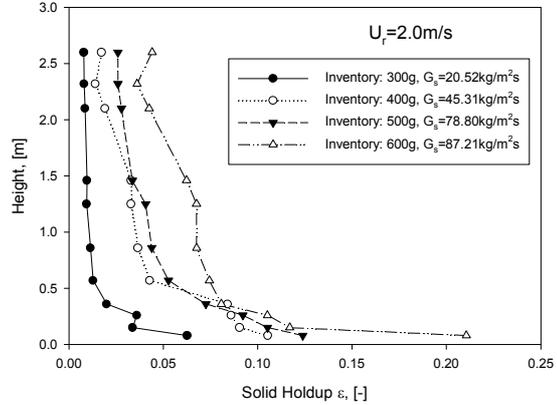


Fig. 3 상승관 유속 2.0m/s에서 고체 투입량 변화에 따른 관 내 고체체류량 분포

Fig. 4는 고체 투입량이 300~600g인 조건에서 상승관 유속  $U_r$ 이 1.5~3.5m/s로 변화함에 따른 고체순환량  $G_s$ 의 변화를 나타내고 있다. 고체 투입량이 증가함에 따라 순환량이 증가하는 모습을 보이며, 이는 고체 투입량이 증가함으로써 재생기 내 고체의 head의 증가의 영향을 받는 것으로 볼 수 있다. 상승관 유속에 따른 변화를 살펴보면, 유속이 증가함에 따라 고체순환량이 증가하다가 일정 유속에서 최대값을 나타낸 후 감소하는 모습을 나타내고 있다. 이는 상승관 유속이 증가함에 따라 하단부의 압력이 낮아지고, 이로 인하여 재생기 내부와의 압력차가 커짐으로 인하여 고체의 순환량이 증가를 하다가, 유속이 더 크게 증가하면 상승관 기체의 일부가 stand-pipe로 역류함으로 인하여 재생기로부터 상승관으로의 고체 흐름을 방해하기 때문인 것으로 추측된다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 조건에서 고체의 평균 체류량의 변화를 나타내고 있다. Fig. 4에서의 고체 순환량과 마찬가지로 고체투입량이 증가할수록 체류량이 증가하며, 유속에 따른 변화는 고체 순환량과 동일한 경향을 나타내고 있다. 이를 통해 상승관의 고체 체류량은 고체 순환량과 비례하는 관계를 가짐을 알 수 있다.

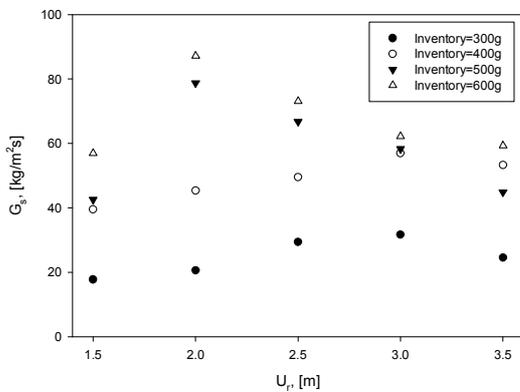


그림 4 고체투입량 및 상승관 유속에 따른 고체순환량 변화

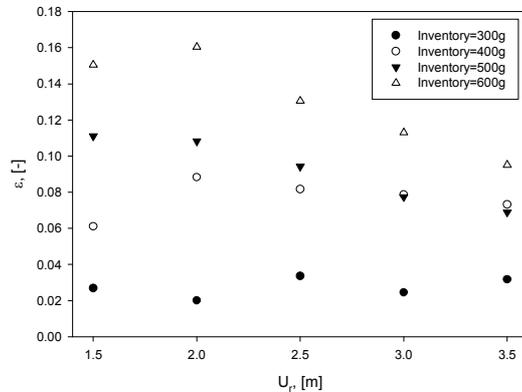


Fig. 5 고체투입량 및 상승관 유속에 따른 관 내 평균 고체체류량 변화

### 결론

순환유동층에서 고체의 투입량 및 상승관 유속의 변화에 따른 고체 체류량 및 순환량의 변화를 살펴보았다. 고체의 순환량은 투입된 고체의 head의 증가에 따라 같이 증가하는 모습을 나타내었으며, 상승관 내의 고체 체류량 분포는 고체 순환량의 변화에 따라 동일한 경향성을 나타내었다. 본 연구에서 수행된 결과를 바탕으로 CFD 시뮬레이션을 수행하여 고체 체류량 및 순환량을 실험 결과와 비교할 것이며, 각 부분에서의 고체 속도 및 압력 분포 등의 수력학적 특성을 살펴봄으로써 순환유동층의 특성 파악할 예정이다.

### 참고문헌

1. Yerushalmi, J., "Circulating Fluidized Bed Tech-nol.", Ed. by P. Basu, Pergamon Press, New York (1986).
2. Reh, L., Chemical Engineering Science, 54, 5359~5368 (1999).
3. Kunni, D., Levenspiel, O., "Fluidization Engineering", 2nd Ed. (1990)