

## 순환유동층에서의 고체순환 특성 파악을 위한 실험 및 CPFD 시뮬레이션

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

Experiment and CPFD Simulation for Prediction of Solid Circulation Behavior in  
 Circulating Fluidized Beds

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

### 서론

순환유동층(circulating fluidized bed, CFB)은 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, 대체에너지원 개발을 위해 효율적이고 경제적인 공정 개발이 필요하였으며, 이에 따라서 순환유동층 반응기가 주목을 받게 되었다[2]. 그에 따라 메탄올을 이용하여 올레핀을 직접적으로 생산하는 MTO (Methanol to Olefins) 공정에 적용하기 위한 순환유동층 장치의 개발에 관한 연구를 수행하게 되었다. 순환유동층 장치를 이용한 MTO 공정의 수율을 높이기 위해서는 반응기 내 촉매의 체류량을 높이는 것이 중요하며, 이를 위해서는 밸브의 조업조건에 따른 고체순환량의 제어특성을 파악할 필요가 있다.

한편, MTO 공정을 위해 만들어진 Geldart group A의 Granular-KR40 입자를 L-valve의 aeration을 이용하여 고체순환량을 제어하였을 때 입자의 최소유동화 속도 전후로 고체순환량이 급격히 변화하는 현상을 관찰한 바 있다[3]. L-valve에서의 고체순환량은 압력강하와 밀접한 관련이 있으므로[4] 이들 간의 관계가 어떻게 나타나는지 살펴볼 필요가 있다.

본 연구에서는 MTO 공정에 적용하기 위해 개발된 촉매의 순환유동층에서의 고체순환량 제어에 대해 L-valve에서의 압력강하 측정실험을 수행하였다. Geldart A 입자의 고체순환량이 급격히 증가하는 현상과 L-valve에서의 압력강하 변화와의 관계를 살펴보았다.

또한 본 연구에서는 MP-PIC model[5]에 기반을 두고 제작된 Barracuda CPFD(Computational Particle-Fluid Dynamics) software를 이용하여 순환유동층 장치 내부의 고체 흐름에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

### 실험 방법

Fig.1은 본 연구에 사용된 순환유동층 장치 구성을 나타내고 있다. 반응기 전체 높이는 2.6m로, 직경 9mm의 상승관이 설치되어 있다. 고체순환량은 직경 16mm의 L-valve에서 aeration rate에 의해 제어된다. 장치 내에 투입된 고체 입자는 MTO 공정에 적용하기 위해 개발된 Granular-KR40 촉매이며, 기체는 air가 사용되었다. 고체 입자 및 기체의 물성은 Table 1에 나타난 바와 같으며 입자의 입도분포는 Fig. 2에 나타난 것과 같다. L-valve의 고

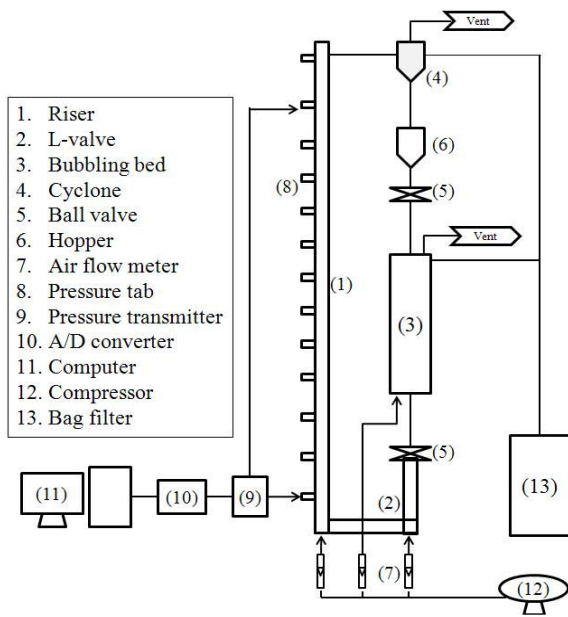


Fig. 1. Schematic diagram of circulating fluidized bed

체순환량 변화와 L-valve 내에서의 압력강하와의 관계를 살펴보기 위해 bubbling bed에서 L-valve 사이의 downcomer, L-valve의 aeration point, horizontal pipe와 riser의 연결부에서 압력을 측정하여 각 point간의 압력변화를 살펴 보았다.

Table 1. Material properties of particle and fluidizing gas

Solid	Granular-KR40
Mean Diameter ( $\mu\text{m}$ )	70
Particle Density ( $\text{kg/m}^3$ )	1730
Bulk Density ( $\text{kg/m}^3$ )	650
$U_{mf}$ (cm/s)	0.33
Geldart classification	Group A
Inventory (kg)	1.2
Fluidizing gas	Air
Density ( $\text{kg/m}^3$ )	1.2
Viscosity (Pa·s)	$1.95 \times 10^{-5}$

Barracuda를 이용한 CPFД 시뮬레이션은 실험장치 전체를 실제와 동일하게 모델링하여 수행하였다. L-valve의 aeration은 Granular-KR40의  $U_{mf}$ 보다 낮은 0.3cm/s와,  $U_{mf}$ 보다 높은 0.6cm/s의 조건 하에서 시뮬레이션을 수행하였다.

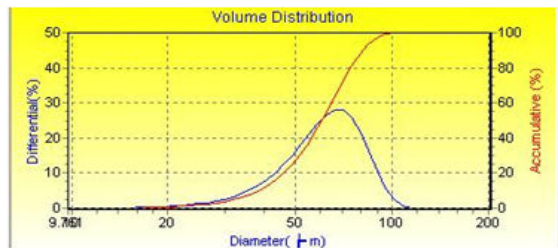


Fig. 2. Particle size distribution of Granular-KR40 particle

**결과 및 토의**

이전의 연구[3]을 통하여 Fig. 3에서와 같이 L-valve의 aeration rate가  $U_{mf}$  부근인 지점에서 Geldart group A 입자의 고체순환량이 급격히 증가하는 현상을 확인한 바 있다. Fig. 4

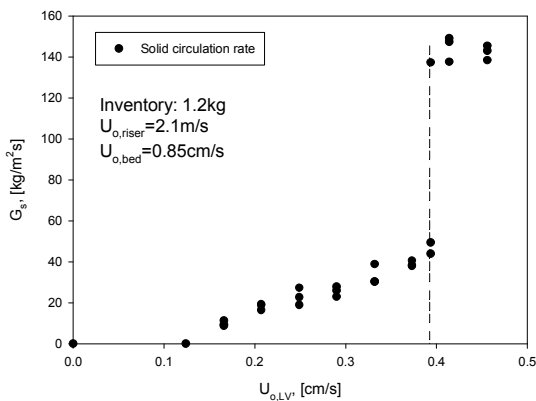


Fig. 3. Solid circulation control of Granular-KR40 in L-valve[3]

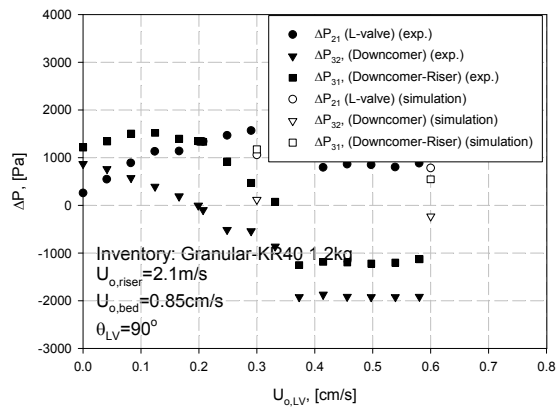


Fig. 4. Variation of pressure difference in L-valve system

는 고체순환량의 급격한 변화와 L-valve system 내부의 압력강하와의 관계를 보여주고 있다. Downcomer 내의 압력강하 변화를 살펴보면 고체순환이 이루어지기 이전의 aeration rate에서는 downcomer의 위쪽에서 더 높은 압력을 나타내었으며, 고체순환량이  $20\text{kg/m}^2\text{s}$  이상 이루어지는 지점에서 압력의 분포가 역전되어 아래쪽이 더 높은 압력을 나타내었다. 한편 고체순환량이 급격하게 변화한  $U_{mf}$  부근에서는 압력변화가 급격히 변화하는 모습을 나타내었다. 이는 L-valve와 riser 사이에서의 압력강하 및 downcomer 중단부와 riser 출구에서의 압력강하에서도 마찬가지로 급격히 변화한 모습을 나타내었다. 특히 downcomer와 riser 입구 사이에서의 압력강하의 부호가 바뀌는 지점에서 고체순환량이 급격히 증가하는 모습을 나타내었다.

Fig.5는 Barracuda CPFDP를 이용하여 순환유동층 장치 운전 초기의 L-valve 및 downcomer에서의 고체흐름 거동을 모사한 결과이다. Downcomer에 설치된 valve를 개방하였을 때 고체가 아래로 하강하는 모습과 downcomer에 존재하는 air가 위로 상승하면서 downcomer와 L-valve에 고체가 채워지는 현상을 사실적으로 보여주고 있다.

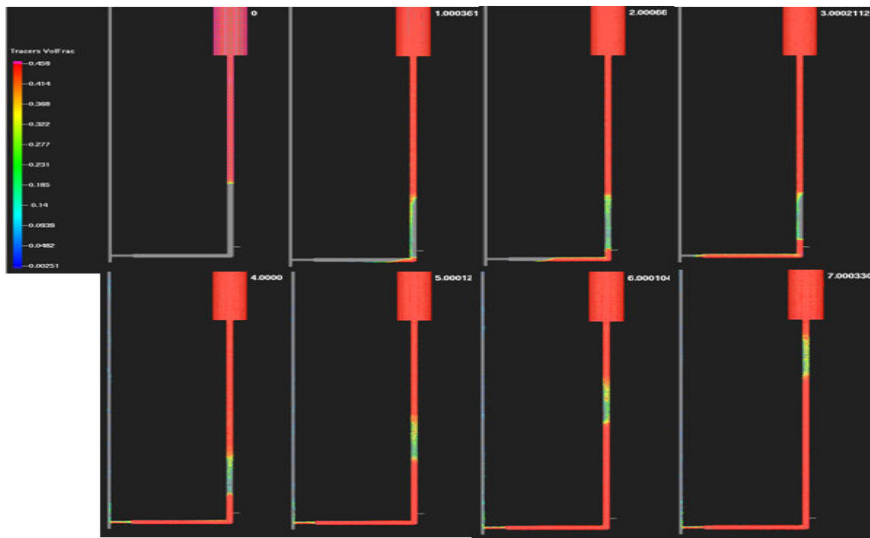


Fig. 5. Behavior of solids in L-valve system at starting operation ( $U_o=2.1\text{m/s}$ ,  $U_{LV}=0.6\text{cm/s}$ ,  $G_s=125\text{kg/m}^2\text{s}$ )

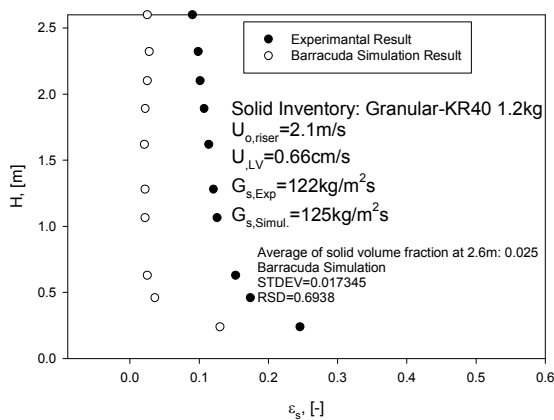


Fig. 6. Predicted axial solid holdup in riser compared to experimental result

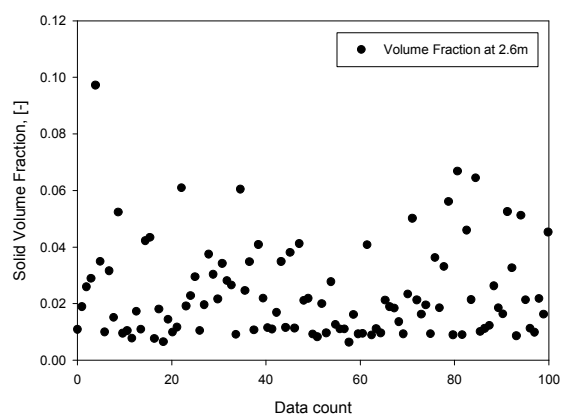


Fig. 7. Deviation of solid holdup at the top of riser

Fig.6은 Barracuda CPFDP를 이용하여 예측된 수직고체체류량 분포를 실험결과와 비교한 것이며, Fig.7은 CPFDP에서 예측된 riser 최상부에서의 고체체류량 예측값의 분산을 나타내고 있다. CPFDP 예측결과와 data를 평균하여 구한 수직고체체류량 분포값이 실험결과보다 낮은 값으로 예측이 되었으며, time step에 따른 고체체류량 분포의 분산 정도는 상대표준편차가 70%에 가까운 정도로 크게 나타났다.

Fig.8은 Barracuda CPFDP를 이용하여 예측된 순환유동층 장치 내의 압력분포를 나타내고 있다. 전체적으로 전형적인 순환유동층의 압력분포를 나타내고 있다. 본 결과에서 가장 큰 차이를 나타내는 부분은 고체순환량이  $30\text{kg/m}^2\text{s}$ 인 경우와  $125\text{kg/m}^2\text{s}$ 인 경우에서 bubbling bed 하단과 L-valve 사이의 압력분포가 역전되는 현상이 발견된 것이다. 실험에서도 유사한 현상이 나타났으나, 압력강하의 값이 역전되는 부분 및 압력강하의 절대값에서 차이를 나타내었다.

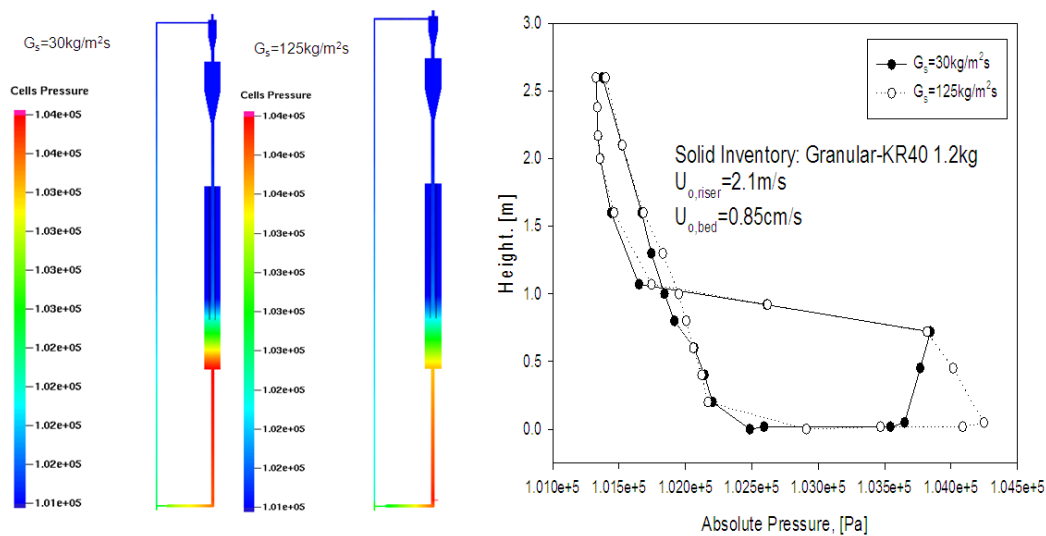


Fig. 8. Predicted pressure balance in Circulating Fluidized Bed

## 결론

L-valve에서 Geldart group A 입자의 고체순환량이  $U_{mf}$  부근에서 급격히 증가하는 현상이 L-valve 및 downcomer에서의 압력강하와 밀접한 관련이 있음을 확인하였다. 또한 Barracuda CPFDP를 이용하여 장치 내에서의 고체 거동을 살펴보았으며, 고체체류량 분포와 압력분포를 살펴보았다. CPFDP를 이용한 시뮬레이션에서 내부 현상 및 경향성은 실험결과와 유사하게 나타났으나 시뮬레이션 결과와 실험 결과값의 차이가 큰 모습을 나타내었다. 보다 실험결과에 가까운 시뮬레이션 결과를 얻기 위해 추가적인 연구가 필요한 것으로 생각된다.

## 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. Lim, J.H., Lee, D.H., Chae, H.J., Jeong, S.Y., Theories and Applications of Chemical Engineering, 17(1), 659 (2011)
4. Arena, U., Langelib, C.B., Cammarotaa, A., Powder Technology, 98(3), 231-240 (1998)
5. Snider, D.M., Journal of Computational Physics, 170, 523~549 (2001)