

순환유동층 내 출구효과를 갖는 상승관에서 고체체류량 분포의 예측

김성원, 안정렬, 김상돈
한국과학기술원 화학공학과 및 에너지·환경 연구 센터

Prediction of solid holdup distribution in a riser with exit effect of 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

서론

순환유동층은 기-고체간의 접촉효율이 높고, 층 내 전체에 걸쳐서 균일한 기-고체의 접촉을 갖는 등 많은 장점이 있어 석탄연소로, 촉매반응기와 같은 여러 기-고 반응기에 적용이 확대되고 있다. 순환유동층은 크게 상승관과 사이클론, downcomer 및 입자들을 상승관으로 재주입시키는 고체재주입 밸브 등으로 구성되어 있다 [1]. 순환유동층의 조업형태는 상승관 내 높은 유속의 기체 주입을 통해 내부 고체입자들을 비산시키고, 이들은 사이클론에서 기체와 분리, 포집되어 고체재순환부를 통해 상승관 내로 재주입된다.

상승관은 순환유동층에서 주요 반응이 일어나는 영역으로, 이에 대한 설계 및 원활한 조업을 위해, 내부 고체흐름 및 고체체류량의 분포에 대한 측정 및 이를 예측하고자 하는 많은 연구들이 진행되어 오고 있다. 상승관 내부의 고체 입자의 분포 및 흐름은 내부 기체 유속, 고체순환속도, 상승관의 형태 및 입자의 물성등에 의해 크게 영향을 받는데 [2], 특히 상승관 내의 출구 (exit) 의 구조는 상승관의 상부 뿐만아니라, 중간영역까지의 고체흐름 및 고체의 역혼합 (backmixing) 에 크게 영향을 미친다는 결과들이 보고되고 있다 [2-7]. 이러한 출구효과는 상승관의 흐름에 직각으로 적인 abrupt exit 를 갖는 순환유동층 연소로 및 모래와 같은 Geldart B group 입자의 경우 크게 나타난다 [6]. 따라서, 출구효과를 갖는 상승관에 대해 정확한 흐름 예측 및 적절한 설계를 위한 흐름 모델링을 위해 고체체류량 분포에 대한 출구 구조의 영향을 정의하는 것은 매우 중요하다.

그러므로, 본 연구에서는 abrupt exit 를 갖는 순환유동층의 상승관에서 조업변수 변화에 따른 고체체류량의 변화를 조사하였고, 얻어진 실험결과와 문헌자료를 토대로 조업변수 및 입자물성, 출구 구조의 변화에 따른 상승관 내 고체체류량 분포를 예측할 수 있는 상관식을 제시하고자 하였다.

실험

본 연구에서 사용한 상온 순환 유동층 연소로 개략도는 Fig. 1 과 같다. 전체 장치는 상승관 (riser), 사이클론 (cyclone), downcomer, loop-seal 과 유동층 열교환기 (Fluidized bed heat exchanger: FBHE) 로 구성되어 있다. 상승관의 직경은 0.1 m 이고, 분산판으로부터 상승관 상단까지의 높이는 7.6 m 이다. 상승관내에서의 흐름현상을 관찰하기 위하여 상승관

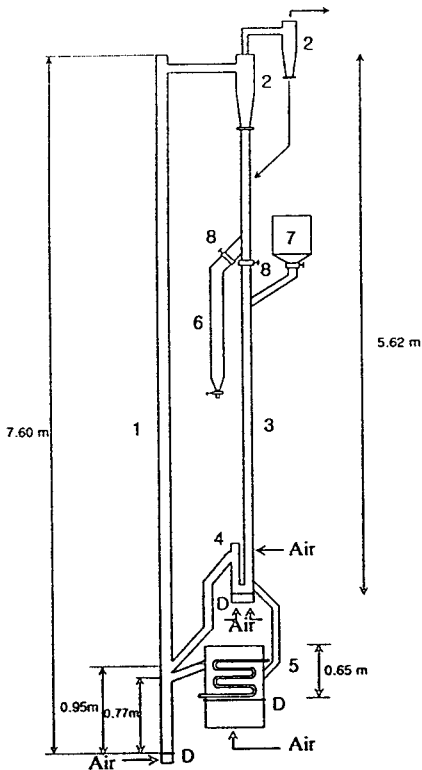


Fig. 1 Schematic diagram of CFB cold model (solids recycle system)
 1. Riser, 2. Cyclone, 3. Downcomer,
 4. Loop-seal, 5. FBHE 6. Sampling - bottle, 7. Solids supply tank, 8. Butterfly valve D. Distributor

내 회박상 영역은 마노미터를 와 압력요동이 심한 농후상영역은 pressure transducer (valdyne, USA) 와 A/D converter 를 사용하였고, 여기서 나오는 신호는 IBM-PC 를 사용하여 저장하였다.

실험은 상승관 내 기체-고체 흐름이 정상상태에 이른 후, 고체순환속도와 압력을 측정하였다. 상승관 내 기상유속은 4.5 m/s 로 일정하게 유지시켰다. 예측의 검증을 위해 실험에 사용한 입자는 silica sand 입자로 평균입경은 240 μm 이고 겉보기 밀도는 2582 kg/m^3 이다.

이론 및 결과

최근에 Kunii and Levenspiel [5] 은 비산모델 (entrainment model) 을 바탕으로 출구효과를 고려한 고체체류량 분포 예측 모델을 제시하였고, 출구효과가 없을 때와 출구효과가 존재할 때의 고체체류량 값의 차는 식 (1) 에 의한다고 하였다.

$$\Delta \epsilon = \epsilon_s - \epsilon_{s, \text{without reflux}} = C_e \epsilon_{sc} \exp[-a_c(H_r - z)] \quad (1)$$

여기서 C_e 는 출구효과에 의해 벽면을 타고 하강하는 reflux 효율상수이고, a_c 는 출구로부터 상승관 하부 방향으로 고체체류량의 decay constant 이다. 또한, $\epsilon_{sc} = G_s / \rho_s (U_g - U_t)$ 이며, H_r 은 상승관 출구까지의 높이이다. 그러나, 그들은 C_e 와 a_c 에 대한 관계식은 제시

은 아크릴로 제작하였으며, 상승관에서 싸이클론으로 연결되는 출구부분은 90 도의 각을 갖는 abrupt 형태로 제작되었다. 출구의 자세한 형태는 Table 1 에 나타내었다. 비산유출되는 고체 입자를 포집하여 재순환 시키기 위하여 상승관 출구에 직경 0.20 m 인 1차 사이클론과 직경 0.14 m 인 2차 사이클론을 설치하였다. 싸이클론에서 포집된 입자는 하부에 위치한 downcomer 로 하강하였고, 이들은 연속적으로 loop-seal 로 주입되었으며, 이들은 loop-seal 에서 공기주입 (aeration) 으로 순환되는 양이 조절되어 상승관내로 재주입되었다. 순환되는 고체속도는 downcomer 쪽에 있는 sampling bottle 에서 butterfly 밸브를 이용 흐름경로를 막은 후, bottle 내 주어진 길이에 대해 고체입자가 하강하는 시간을 측정하는 time of descent 방법에 의하여 측정하였다. 또한, 고체순환속도 측정 시, downcomer 내 고체량을 유지하기 위하여 측정과 동시에 고체 공급탱크를 이용하여 bottle 내로 주입되는 양만큼 주입시켰다. 재순환되는 고체는 분산판위 0.95 m 지점에서 상승관으로 주입되며, 분산판은 다공판 (perforated plate) 형태의 steel 로 제작되었다. 상승관 내의 압력분포를 측정하기 위하여 상승관의 벽면에는 0.1 m 간격으로 pressure tap 을 설치하였다. 이때 pressure transducer 및 manometer 로의 입자 유입을 막기 위하여 tap 의 내면에 400 mesh 철망을 부착하였다. 압력을 측정하기 위하여 상승관

하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 실험결과 및 Table 1 에 나타난 문헌결과를 바탕으로 C_e 와 a_e 에 대해 식 (2) 와 (3) 과 같이 상관관계식을 제시하였다.

$$C_e = 0.046 \left[\frac{(U_g - U_t)^2}{gD_r} \right]^{0.46} \left[\frac{G_s}{\rho_s(U_g - U_t)} \right]^{-0.31} \left[\frac{H_e}{d_p} \right]^{0.38} \left[\frac{D_e}{D_r} \right]^{-0.72} \quad (2)$$

도출된 상관식의 상관계수는 0.89 이고, 표준오차는 1.73 이다.

$$a_e D_r = 1.27 \left[\frac{(U_g - U_t)^2}{gD_r} \right]^{0.49} \left[\frac{G_s}{\rho_s(U_g - U_t)} \right]^{-0.54} \left[\frac{D_e}{D_r} \right]^{-0.55} \left[\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \right]^{-1.00} \quad (3)$$

도출된 상관식의 상관계수는 0.92 이고, 표준오차는 0.012 이다.

본 연구에서 출구효과를 받지 않는 상승관 하부에서의 고체체류량 분포를 구하기 위해 기존 smooth exit 를 갖는 상승관에서 제안된 식 (4) 를 사용하였다 [5].

$$\epsilon_s = \epsilon_{s,\infty} + (\epsilon_{sd} - \epsilon_{s,\infty}) \exp[-a(z - z_d)] \quad (4)$$

식 (4)에서 decay constant a 는 Lei and Horio [8] 가 제시한 식 (5) 를 사용하였다.

$$a D_r = 0.019 \left[\frac{U_g}{\sqrt{gD_r}} \right]^{-0.32} \left[\frac{G_s}{\rho_g U_g} \right]^{-0.22} \left[\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \right]^{0.47} \quad (5)$$

또한, ϵ_{sd} 와 $\epsilon_{s,\infty}$ 를 구하기 위해 최근에 Bai 와 Kato [9] 가 제시한 식 (6) 과 (7) 을 사용하였다.

$$\frac{\epsilon_{s,d}}{\epsilon_{se}} = 1 + 6.14 \times 10^{-3} \left[\frac{U_g}{G_s/\rho_s} \right]^{-0.23} \left[\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \right]^{1.21} \left[\frac{U_g}{\sqrt{gD_r}} \right]^{-0.383} \quad (6)$$

$$\epsilon_{s,\infty} = 4.04 \epsilon_{se}^{1.214} \quad (7)$$

Fig. 2 에 상승관 내 고체체류량 분포의 한 예와 고체체류량 분포를 예측하는 과정을 나타내었다. 그림에서 보듯이 abrupt exit 를 갖는 상승관에서의 고체체류량은 Lei and Horio [8] 가 제시한 smooth exit 를 갖는 상승관에서의 고체체류량 분포 예측과 비교해 볼 때, 출구에 가까울수록 고체체류량이 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 출구영향에 의한 벽면 내 reflux 증가에 의한 것으로, 이러한 상승관의 구조에서 기존 smooth exit 를 갖는 상승관에서 적용 가능한 Lei and Horio [8] 의 예측은 약 1.5 m 이하의 농후상 및 그 이상의 splash 영역 일부에서는 어느 정도 잘 일치하지만, 그 이상의 영역은 큰 오차를 나타내고 있다. 따라서, 본 연구에서 제시한 상관관계식을 식 (1) 에 적용하고, 이를 이용하여 식 (4) 에서 얻

Table 1 Summary of experimental studies on CFB riser exit effect

| Author | Riser | | | | Particle properties | | | Operating variables | |
|----------------------------|------------|----------------------|----------|---------------|---------------------|------------------|-------------------------------------|---------------------|--|
| | Height [m] | Projected height [m] | dia. [m] | Exit dia. [m] | Type | d_p [μ m] | ρ_p [kg/m^3] | U_g [m/s] | G_s [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$] |
| Zheng and Zhang (1994) | 5.25 | 0 | 0.10 | 0.05 | Resin | 500 | 1400 | 5.20 | 4.16 - 31.6 |
| | | 0.15 | | 0.06 | | | | 6.24 | |
| | | 0.45 | | 0.07 | | | | | |
| Brereton and Gracc (1994) | 9.3 | 0 | 0.152 | 0.10 | Sand | 148 | 2650 | 3.7 - 9.2 | 9 - 89 |
| | | 0.46 | | | | | | | |
| Schoenfelder et al. (1996) | 15.6 | 0.09 | 0.40 | 0.32 | caualyst | 50 | 1420 | 3 - 4.5 | 17 - 39 |
| Pugsley et al. (1997) | 6.0 | 0 | 0.10 | 0.10 | Sand | 220 | 2500 | 5.0 - 5.5 | 26 - 46 |
| | 12.0 | 0.10 | 0.20 | 0.20 | | 230 | 2600 | | |
| This study | 7.6 | 0.10 | 0.10 | | Sand | 240 | 2582 | 4.5 | 5 - 46 |

은 고체체류량 값을 보정한 후 고체체류량 분포를 예측할 때, Fig. 3 과 같이 상승관 전영역에서의 고체체류량 변이를 잘 예측하는 결과를 얻을 수 있다.

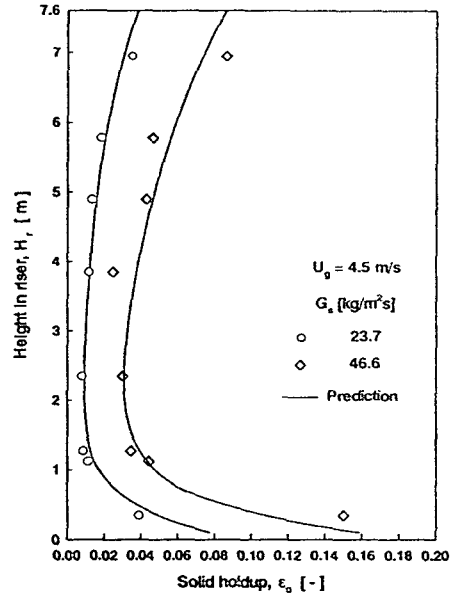
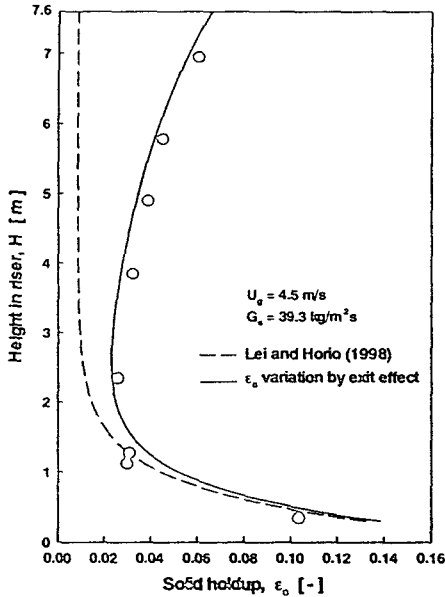


Fig. 2 Prediction of solid holdup distribution

Fig. 3 Comparison of solid holdup profiles predicted from this study with experimental values

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. Senior, R. and Brereton, C.: "Modeling of Circulating Fluidized Bed Solids Flow and Distribution", *Chem Eng. Sci.*, 47, 281 (1992)
3. Zheng, Q. Y. and Zhang, H.: "Experimental Study of the Effect of Bed Exits with Different geometric Structure on Internal Recycling of Bed Material in CFB Boilers", in *CFB Technol. IV*, eds. by A. A. Avidan, AIChE, New York, NY 145 (1994)
4. Brereton, C. M. H. and Grace, J. R.: "End Effect in Circulating Fluidized Bed Hydrodynamics", *CFB Technol. IV*, eds. by A. A. Avidan, AIChE, New York, 137 (1994)
5. Kunii, D. and Levenspiel, O.: "Effect of Exit Geometry on the Vertical Distribution of Solids in Circulating Fluidized Beds. Part I: Solution of Fundamental Equations; Part II: Analysis of reported Data and Prediction", *Powder Technol.*, 84, 83 (1995)
6. Pugsley, T., Lapointe, D., Hirschberg, B. and Werther, J.: "Exit Effects in Circulating Fluidized Bed Risers", *Can J. Chem. Eng.*, 75, 1001 (1997)
7. Schoenfelder, H., Kruse, M. and Werther, J.: "Two-Dimensional Model for Circulating Fluidized-Bed Reactors", *AIChE J.*, 42, 1875 (1996)
8. Lei, H. and Horio, M.: "A Comprehensive Pressure Balance Model of Circulating Fluidized Beds", *J. Chem. Eng. Japan*, 31, 83 (1998)
9. Bai, D. and Kato, K.: "Quantitative Estimation of Solids Holdups at Dense and Dilute Regions of Circulating Fluidized Beds", *Powder Technol.*, 101, 183 (1999)