

순환유동층에서의 축방향 고체체류량 분포

남궁원 · 조용준 · 김상돈

한국과학기술원 화학공학과
(1993년 8월 31일 접수, 1993년 11월 26일 채택)

Axial Solid Holdup Distribution in a Circulating Fluidized Bed

Won Namkung, Yong Jun Cho and Sang Done Kim

Dept. of Chem. Eng., Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea
(Received 31 August 1993; accepted 26 November 1993)

요 약

순환유동층(내경 0.1 m, 높이 5.3 m)에서 충물질로 FCC 입자를 사용하여 기상유속(1.5-3.5 m/s)과 고체순환속도(10-50 kg/m²s)가 축방향 고체체류량 분포에 미치는 영향을 연구하였다. 상승관내의 고체체류량은 고체순환속도가 증가할수록 증가하였고, 기상유속이 증가함에 따라 감소하였다. 상승관내의 축방향 고체체류량 분포는 하부에 고체체류량이 높은 농후상 영역에서 상부에 고체체류량값이 거의 일정하고 낮은 희박상영역으로 높이에 따라 감소하는 형태를 나타내었다. 희박상내의 고체체류량은 기상유속, 고체순환속도와 slip factor를 이용하여 예측이 가능하였고, slip factor가 2-4의 범위내에서 실험값과 예측된 값이 잘 일치하였다. 상승관내의 축방향 고체체류량 분포에 대한 상관식을 무차원군을 이용하여 제시하였다.

Abstract—The effects of gas velocity(1.5-3.5 m/s) and solid circulation rate(10-50 kg/m²s) on the axial solid holdup distribution have been determined in a 0.1 m-I.D.×5.3 m-high circulating fluidized bed. Solid holdup in the riser increases with an increase in solid circulation rate, but decreases with increasing gas velocity. The solid holdup decreases from the dense phase at the bottom to the dilute phase at the top section of the riser. The solid holdup in the dilute phase can be predicted from the ratio of solid to gas velocities and slip factor in the range of 2-4. The axial solid holdup distribution in a circulating fluidized bed has been correlated with the pertinent dimensionless groups.

1. 서 론

순환유동층이란 상승관(riser)내에 기체를 고속으로 주입하여 비말동반되는 고체입자를 집진기에서 포집하여 층내에 재주입하는 유동층을 이르는 것으로, 난류유동층(turbulent fluidized bed), 고속유동층(fast fluidized bed), 희박상유동(dilute phase flow)의 유동영역에서 조업이 이루어 진다[1]. 순환유동층은 높은 기상유속에서 조업이 되기 때문에 고체입자의 재순환이 격렬하게 이루어 지고, 기체흐름이 plug flow로 유지되

기 때문에 기포유동층에서처럼 기포에 의한 기체의 by-passing이 없어 기-고체간의 접촉효율이 높고, 층내 전체에 걸쳐서 기-고체의 접촉이 균일한 등 여러 가지 장점이 있어서 여러 기-고 반응기에 적용이 확대되고 있으며 [2], 특히 최근에는 강화된 환경배출 규제에 대처하기 위한 방안의 하나로 기존의 기포유동층 석탄연소로에 비해 우수한 연소효율과 낮은 SO_x, NO_x 배출 특성을 갖는 순환유동층 연소로에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[3].

순환유동층의 성공적인 조업 및 설계를 위해서는 총

내 고체입자의 체류량 분포에 대한 정보가 매우 중요하다. 층내 입자의 체류량 분포는 상승관내의 압력 강하와 고체입자의 평균체류시간 등과 직접적 관계가 있으며, 이것에 따라 단위부피당의 기-고 접촉 면적이 결정되고, 기-고간의 물질 전달 및 반응속도가 결정된다 [4]. 또한, 순환유동층으로부터 열의 회수(또는 공급)는 대개 상승관의 벽면을 통해 이루어 지는데 벽면에서의 열전달 계수는 상승관에서의 고체체류량에 따라 크게 달라지는 것으로 알려져 있다.

따라서 순환유동층에서의 측방향 고체체류량 분포에 대한 연구는 여러 연구자들에 의해 수행되어 왔으나[5-7] 아직까지 주어진 조업 조건에 대해 측방향 고체체류량 분포의 예측을 위해 적용할 수 있는 상관식이나 모델식이 미흡한 실정이다. 그러므로, 본 연구에서는 기상유속 및 고체순환속도 등에 따른 순환유동층내의 측방향 고체체류량 분포의 변화에 대해 고찰하고, 얻어진 실험결과를 토대로 측방향 고체체류량 분포를 예측할 수 있는 상관식을 제시하고자 한다.

2. 실험

2-1. 실험장치

본 연구에서 사용된 상순환유동층의 개략도는 Fig. 1과 같다. 장치는 상승관(riser), 사이클론(cyclone), 호퍼(hopper)와 rotary valve로 구성되어 있다. 상승관의 직경은 0.1 m이고, 분산판으로부터 상승관의 상단까지의 높이는 5.3 m이다. 상승관내에서의 흐름현상을 관찰하기 위하여 상승관은 Plexiglas column으로 제작되었으며, 상승관에서 싸이클론으로 연결되는 출구 부분은 90도의 각을 갖는 직각 형태로 제작되었다. 비산유출되는 고체입자를 포집하여 재순환시키기 위하여 상승관 출구에 직경 0.20 m인 1차 사이클론과 직경 0.14 m인 2차 사이클론을 설치하였고, 싸이클론에 잡히지 않는 입자는 bag filter를 사용하여 포집하였다. 싸이클론에 의해 포집된 입자를 저장하기 위하여 호퍼를 설치하였고, 가변속 모터(variable speed motor)에 의해 회전속도가 제어되는 rotary valve를 사용하여 상승관내로 재주입되는 고체의 순환속도를 조절하였다. 재순환되는 고체는 분산판 위 0.3 m 지점에서 상승관으로 주입된다. 분산판은 6 mm의 구멍이 triangular pitch로 19개가 뚫려 있는 다공판(perforated plate) 형태의 steel로 제작되었고, 입자의 weeping을 방지하기 위하여 250 mesh screen을 분산판 위에 설치하였다. 기상으로는 공기를 사용하였는데, 공기는 air filter와 pressure regulator를 거쳐 globe valve로 유량이 조절되어 상승관내로 주입되었으며, 주입되는 유량은 rotameter를 사용하여 확인하

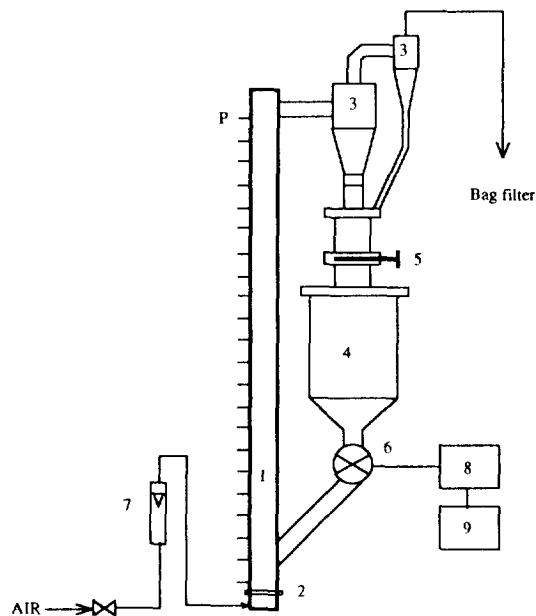


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

- | | |
|----------------|---------------------|
| 1. Riser | 6. Rotary valve |
| 2. Distributor | 7. Rotameter |
| 3. Cyclone | 8. DC motor |
| 4. Hopper | 9. Speed controller |
| 5. Slide valve | |

였다.

상승관내의 압력분포를 측정하기 위하여 상승관의 벽면에는 0.1 m 간격으로 pressure tap을 설치하여 pressure transducer 및 manometer로 연결하였으며, pressure transducer 및 manometer로의 입자의 유입을 막기 위하여 tap의 내면에 filter를 부착하였다. 압력을 측정하기 위하여 manometer와 pressure transducer, data acquisition을 사용하였고, 여기서 나오는 신호는 IBM-PC를 사용하여 저장하였다.

2-2. 시료물성 및 실험변수

실험에 사용된 시료는 Fluid Cracking Catalyst(FCC) 입자로 평균직경은 $65 \mu\text{m}$, 겉보기밀도는 1720 kg/m^3 이다.

그리고, 실험변수는 기상유속과 고체순환속도로서, 기상유속은 1.5에서 3.5 m/s로, 고체순환속도는 10에서 50 $\text{kg/m}^2\text{s}$ 로 각각 변화시키면서 실험을 수행하였다.

2-3. 실험방법 및 data 해석

2-3-1. 실험방법

먼저 재순환 설비의 호퍼에 충물질인 FCC 입자를

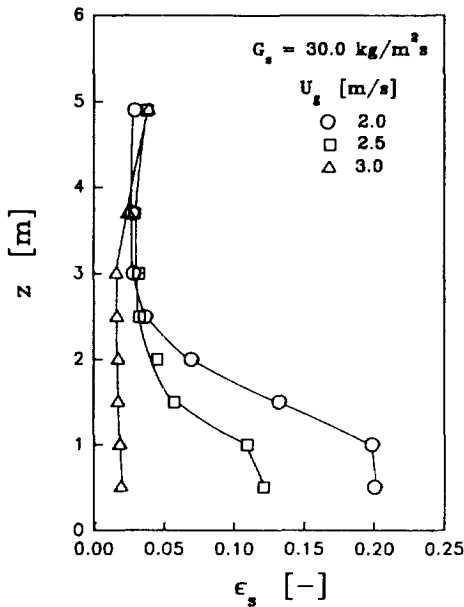


Fig. 2. Effect of gas velocity on axial solid holdup distribution.

가득 채운후 상승관이 비어 있는 상태에서 공기를 원하는 기상유속으로 상승관내로 공급하였다. 이 상태에서 calibrated rotary valve를 사용하여 원하는 속도로 고체입자를 상승관내로 주입하면서 상승관내의 측방향 압력분포를 측정하였다. 일정시간이 경과된 후 상승관내의 압력분포가 일정한 상태에 이르면 이를 정상상태로 간주하여 측정지점 사이의 압력강하($\Delta P/\Delta L$)를 측정하였다. 한편, 압력변동이 큰 상승관의 하부에서는 pressure transducer와 마노미터를 동시에 사용하여 압력을 비교하면서 측정하였고, 압력변동이 상대적으로 작은 상승관의 상부에서의 압력은 liquid paraffin manometer를 사용하여 측정하였다.

2-3-2. Data 해석

상승관내의 측방향 고체체류량은 측방향 압력강하를 측정하여 구할 수 있다. 상승관내의 총 압력강하는 마찰에 의한 손실, 입자의 가속 및 중력의 합으로 나타내어지며, 순환유동층에서는 마찰 및 가속에 의한 손실을 무시할 수 있으므로[5, 8, 9], 압력강하는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = (\rho_g \varepsilon + \rho_s \varepsilon_s) \cdot g \quad (1)$$

여기서 $\varepsilon = 1 - \varepsilon_s$ 이다.

(1) 식에서 기체밀도는 고체밀도에 비해 무시할 수 있으므로

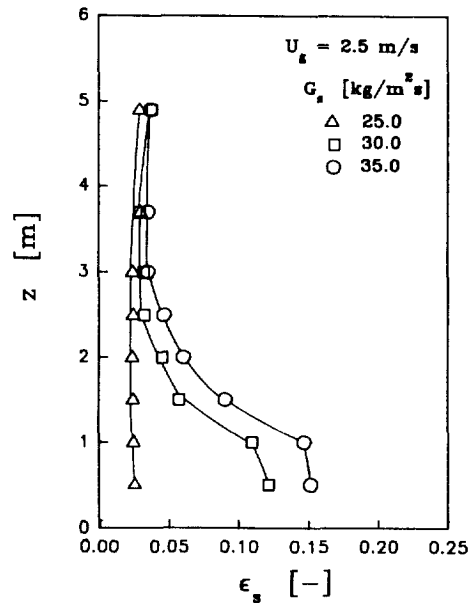


Fig. 3. Effect of solid circulation rate on axial solid holdup distribution.

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \rho_s \varepsilon_s g \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다.

그러므로, 주어진 조업조건하에서 $\Delta P/\Delta L$ 를 구한후 식 (2)에 의해 단면적에 대한 평균 고체체류량을 구하였다.

3. 결과 및 검토

3-1. 기상 유속의 영향

Fig. 2는 고체순환속도를 일정하게 유지하면서 기상 유속의 변화에 대한 측방향 고체체류량 분포의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 일정한 고체순환속도 하에서 상승관내의 고체체류량은 기상유속이 증가될수록 감소하는 경향을 나타내었다. 주어진 고체순환속도에서 기상유속이 낮은 경우에는 입자 비산속도가 낮게 되어, 전체적으로 고체체류량은 상대적으로 높은 값을 나타낸다. 이 상태에서 기상유속을 증가시키면 입자 비산속도가 증가하여 상승관내의 고체체류량은 감소하는 경향을 나타내며, 기상유속이 더욱 증가되면 상승관내의 고체체류량은 거의 일정한 낮은 값을 갖게 된다. 즉, 상승관 전체가 희박상 수송영역(dilute pneumatic transport)에서 조업이 이루어진다. 한편 이 경우에도 벽면근처에 입자들의 하강 흐름(reflux)이 존재하여 고체체류량이 대개 1% 미만에서 조업이 이루어 지는

cocurrent pneumatic transport에 비하여 고체체류량은 높게 나타난다.

3-2. 고체순환속도의 영향

Fig. 3은 일정한 기상유속하에서 고체순환속도의 변화에 대한 축방향 고체체류량 분포의 변화를 나타낸 것이다. 주어진 기상유속하에서 고체순환속도가 증가함에 따라 고체체류량은 증가하였다.

일정한 기상유속에서 고체순환속도가 낮은 경우 총 내로 재주입되는 입자는 모두 빠른 속도로 상승하며, 상승관 전체는 고체체류량이 낮고 일정한 값을 갖는 희박상 수송영역에서 조업하게 된다. 그러나, 고체순환속도가 증가됨에 따라 입자들의 평균 상승속도가 감소하게 되어 고체체류량은 증가하게 되며, 고체순환속도의 증가에 대해 상승관은 희박상 수송영역을 유지할 수 있는 최대 고체순환속도에 이르게 된다. 이 때의 상태를 Zenz와 Weil[10]은 "saturation carrying capacity"라 정의하였다. 이 상태에서 기상유속을 일정하게 유지시키면서 고체순환속도를 더욱 증가시키면 상승관에 주입되는 입자가 모두 즉시 비산되지 못하여 일부가 밑부분에 축적되기 시작한다. 이 때, 고체순환속도를 더욱 증가시키면 상승관의 하부에서부터 농후상이 생성되기 시작하고 농후상 영역은 상승관 윗쪽으로 상승한다.

Fig. 2, 3에서 볼 수 있듯이 상승관의 하부에는 상대적으로 고체체류량이 높게 유지되는 농후상이 존재하며, 상승관의 상단부근에 end effect에 의한 ϵ_s 가 높은 값을 보이는 영역을 제외한다면 상부의 희박상($Z \geq 3.0$ m)에서는 fully developed flow가 되므로 고체입자의 평균 상승속도는 일정하게 되고, 따라서 ϵ_s 는 거의 일정한 값을 갖는다. 그리고, 축방향 고체체류량 분포는 상승관 하부의 농후상영역에서 상부의 희박상영역까지 높이에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

3-3. 희박상의 고체체류량

희박상내에서 기-고 흐름은 fully developed flow 형태를 나타내므로, 고체체류량은 거의 일정한 값을 가진다. 희박상내의 고체체류량은 다음과 같이 물질수지식을 이용하여 예측할 수가 있다. 물질수지식으로부터

$$G_s = G_{s,sc} = \rho_s \epsilon_{s,sc} U_{s,sc} \quad (3)$$

이다. 여기서 $U_{s,sc}$ 는 희박상영역내의 평균 고체속도이다. 기상과 고체입자의 상대속도인 slip velocity의 정의를 도입하여 고체속도를 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$U_{s,sc} = \frac{U_g}{1 - \epsilon_{s,sc}} - U_{slip} \quad (4)$$

기상유속이 높은 미세입자의 경우 고체체류량은 상당히 낮은 값을 가지므로($\epsilon_{s,sc} \ll 1$) 식 (3)과 (4)를 이용하여 고체체류량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} G_s &= G_{s,sc} = \rho_s \epsilon_{s,sc} \left[\frac{U_g}{1 - \epsilon_{s,sc}} - U_{slip} \right] \\ &\cong \rho_s \epsilon_{s,sc} [U_g - U_{slip}] \end{aligned}$$

또는

$$\epsilon_{s,sc} \cong \frac{G_s}{\rho_s (U_g - U_{slip})} \quad (5)$$

만약, 미세입자가 기상흐름내에 완전히 분산되어 있다면, $U_{slip} \cong U_i$, $U_i \ll U_g$ 로 가정할 수 있으므로[11], 식 (5)는

$$\epsilon_{s,sc} \cong \frac{G_s}{\rho_s \cdot U_g} \quad (6)$$

이 된다.

그러므로, 식 (6)으로부터 주어진 U_g , G_s , ρ_s 에 대해 희박상의 고체체류량값을 예측할 수가 있다. Fig. 4는 희박상내의 고체체류량과 고체 대 기상유속비($G_s/\rho_s U_g$) 사이의 관계를 나타낸 것으로, 식 (6)을 실선으로 나타내었다. 그림에서 보듯이 계산된 값과 실험값 사이에 상당한 차이를 발견할 수 있는데, 이것은 입자들의 거동이 완전히 분산된(dispersed) 단일 입자의 형태로 거동하는 것이 아니라 여러 입자들이 cluster를 형성하여 거동하기 때문이다. 그러므로, 이 cluster 거동에 대한 고려가 필요하며, 이것은 slip factor(ϕ)의 개념을 도입하여[12] 설명할 수 있다.

Slip factor는 다음과 같이 정의된다[12].

$$\phi = \left[\frac{U_g}{(1 - \epsilon_{s,sc})} / \frac{G_s}{\rho_s \epsilon_{s,sc}} \right] \quad (7)$$

식 (7)을 $\epsilon_{s,sc}$ 의 항에 대해 정리하면,

$$\epsilon_{s,sc} = \phi / [\phi + 1 / (G_s / \rho_s U_g)] \quad (8)$$

이다.

Fig. 4에 보인 것처럼 희박상내의 고체체류량은 Patience 등[12]이 제시한 slip factor가 2인 경우보다 다소 높은 slip factor의 값이 2-4의 범위내에서 예측된 값이 실험치와 잘 일치하였다.

3-4. 상승관 출구 효과

Fig. 5는 출구 효과가 축방향 고체체류량 분포에 미치는 영향을 기상유속의 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 출구에서의 고체체류량의 증가($\Delta \epsilon_s$)는 출구

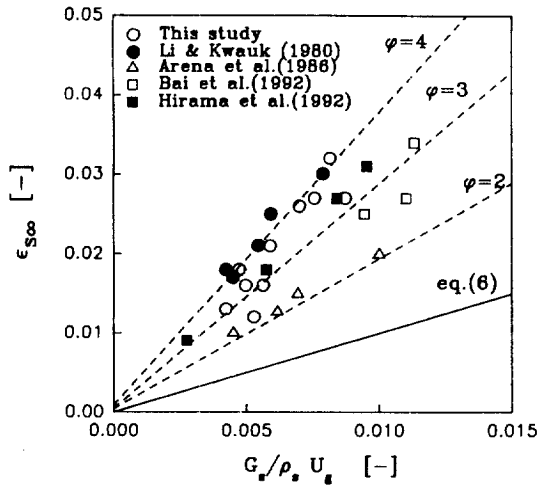


Fig. 4. Solid holdup in the upper dilute region of the riser.

근처(4.7 m 지점)에서의 고체체류량이 회박상에서의 고체체류량(ϵ_{ss})에 비해 증가된 정도를 백분율로 나타낸 것으로 기상유속이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다.

Fig. 2, 3에서도 보였듯이 기상유속이 높은 경우에는 상승관의 출구 근처에서 고체체류량이 상승관의 높이에 대해 다시 증가하는 경향을 나타냈는데, 이것은 본 연구에서 사용한 직각 형태의 출구 구조에 의한 출구 효과에 기인한다[13-15]. 기체와 고체의 혼합 흐름이 직각 형태의 출구를 통해 빠져 나갈 때, 기체는 급격히 흐름의 방향이 바뀌어 배출되지만 고체 입자들은 관성(inertia) 때문에 상승관 상부의 정체지역(dead zone)과 충돌하게 되고 하강하는데 이 때 일부는 기체 흐름에 동반되어 출구를 빠져 나가게 되지만 나머지는 관벽을 따라 하강하면서 관의 중심부에서 상승하는 입자들과 격렬하게 운동량을 교환하게 된다. 이러한 경향은 유속이 높고 고체순환속도가 높아 회박상에서의 고체체류량이 높은 경우에 더욱 증가하는 경향을 보인다. 이 때 상승관의 벽에서 하강하는 입자의 상당한 내부순환(internal reflux)이 일어나므로 주어진 net flux에서 부가적인 고체체류량의 증가를 가져온다[14]. 이와 같은 직각 형태의 출구는 입자의 체류시간을 증가시킬 때 사용되며, 순환유동층 연소로는 대개 이 형태의 출구 구조를 갖는다[14]. Bai 등[13]은 유속이 매우 높은 경우에는 출구에서의 고체체류량이 현저하게 증가하여 전체적인 축방향 고체체류량 분포는 C curve 형태를 갖는다고 하였다.

3-5. 상관식

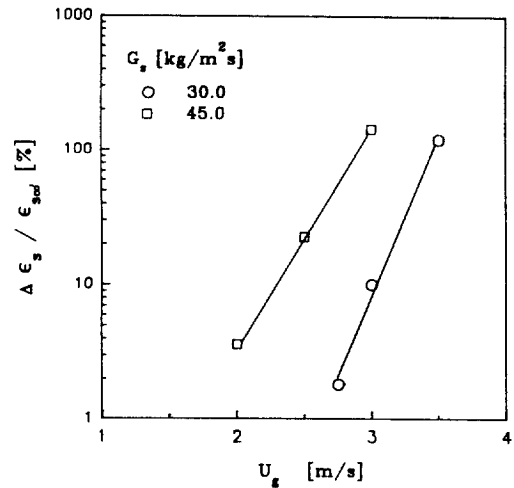


Fig. 5. End effect of exit structure on solid holdup in dilute phase.

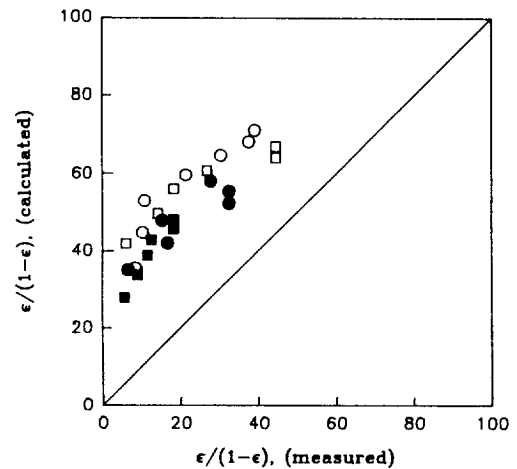


Fig. 6. Comparison between the measured and calculated values of solid holdup(Kato's correlation).

	○	●	□	■
U_g [m/s]	2.5	2.5	2.75	2.75
G_s [kg/m ² s]	30.0	35.0	35.0	45.0

순환유동층내의 고체체류량 분포에 대한 정보는 앞에서 기술하였듯이 매우 중요하며, 주어진 계의 형태, 조업 조건 등에 따라 이를 예측할 수 있는 상관식 및 모델들이 여러 연구자들에 의해 제안되었다[11,16-18]. 그러나, 제시된 모델 및 상관식내에 실험적으로 미리 결정해야 하는 변수들이 포함되어 있어서 실제로 적용하는데에는 어려움이 있으며, 예측된 값도 실제로 측정된 결과와는 상당한 차이를 보이는 것으로 보고되고 있다[15,19].

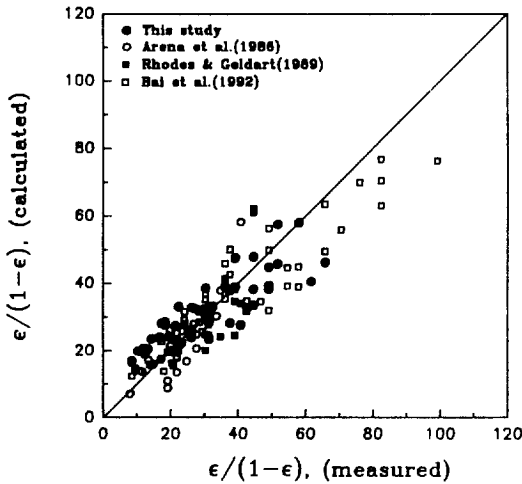


Fig. 7. Comparison between the measured and calculated values of solid holdup.

Fig. 6에는 본 연구에서 측정된 축방향 void ratio $[\epsilon/(1-\epsilon)]$ 분포 data를 Kato 등[16]이 제시한 실험적 상관식을 사용하여 계산한 결과와 비교하여 나타낸 것이다. Kato 등[16]의 상관식은 다음과 같다.

$$\frac{\epsilon}{(1-\epsilon)} = 0.048 \frac{\exp(Z-Z_i)}{[\exp(Z-Z_i) + 1]} \left(\frac{U_a - U_i}{U_i} \right)^{1.35} \left(\frac{G_s}{\rho_p U_i} \right)^{-1.28} (Re_p)^{0.23} (D_i)^{-1.28} \quad (9)$$

여기서 Z_i 는 식 (10)의 상관식을 이용하여 구할 수 있다.

$$Z_i = 360 \left(\frac{G_s}{\rho_p U_i} \right)^{1.2} \left(\frac{U_a - U_i}{U_i} \right)^{-1.45} (Re_p)^{-0.29} \quad (10)$$

그림에서 보듯이 Kato 등[16]의 상관식으로부터 계산된 값은 제안된 적용 범위내의 조업 조건에서 얻은 자료들만 사용하여 비교하였음에도 불구하고 전반적으로 overestimate되는 결과를 보인다. 이것은 Grewal 등[15]의 실험결과와도 일치한다.

한편, 순환유동층에서의 연속식 및 운동 방정식에 대한 차원해석에 의하면 상승관내의 수력학적 특성을 지배하는 무차원수로는 Froude number, $G_s/\rho_p U_g$, D_i/d_p , particle Reynolds number(Re_p), Archimedes number (Ar) 등이 있다[19, 20].

따라서, 본 연구에서는 이들 무차원군으로 본 연구에서의 실험결과와 타 연구자들의 실험자료를 사용하여 다음과 같은 상관식을 구하였다.

$$\frac{\epsilon}{1-\epsilon} = 0.0467 \left(\frac{U_g}{g \cdot d_p} \right)^{0.407} \left(\frac{G_s}{\rho_p \cdot U_g} \right)^{-1.182} \left(\frac{D_i}{d_p} \right)^{-0.528} \exp \left[1.82 \left(\frac{Z}{H_i} \right) \right] \quad (11)$$

위의 상관식의 상관계수는 0.86이고 상대표준편차는 0.26이며, 적용범위는 다음과 같다.

$$1.5 < U_g [\text{m/s}] < 7.0, \quad 10 < G_s [\text{kg/m}^2\text{s}] < 600, \\ 0.04 < D_i [\text{m}] < 0.15, \quad 54 < d_p [\mu\text{m}] < 88, \\ 1550 < \rho_p [\text{kg/m}^3] < 2600$$

Fig. 7에는 본 연구에서 제시한 상관식을 사용하여 계산한 결과와 실험결과를 비교하여 나타내었다. 그림에서 보듯이 전반적으로 상관식으로 예측된 값과 실험값과 잘 일치함을 볼 수 있다.

4. 결 론

이상의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 상승관내의 축방향 고체체류량 분포는 하부의 고체체류량이 높은 농후상으로부터 상부의 고체체류량이 낮고 거의 일정한 희박상영역으로 높이에 따라 고체체류량이 감소하는 형태를 나타내었다.

(2) 희박상의 고체체류량은 silp factor와 기상유속과 고체순환속도를 사용하여 예측할 수 있고, slip factor가 2에서 4의 범위내에서 예측된 값과 실험치와 잘 일치하였다.

(3) 출구에서의 고체체류량은 직각 형태의 출구 구조의 영향을 받아 기상유속의 증가에 대해 증가하였다.

(4) 상승관내의 축방향 고체체류량 분포에 대한 상관식을 다음과 같은 무차원군으로 나타내었다.

$$\frac{\epsilon}{1-\epsilon} = 0.047 \left(\frac{U_g}{g \cdot d_p} \right)^{0.407} \left(\frac{G_s}{\rho_p \cdot U_g} \right)^{-1.182} \left(\frac{D_i}{d_p} \right)^{-0.528} \exp \left[1.72 \left(\frac{Z}{H_i} \right) \right]$$

감 사

본 연구에 연구비를 지원해 준 삼성중공업(주)에 감사드립니다.

사용기호

Ar : Archimedes number, $d_p^3 \rho_p (\rho_s - \rho_g) g / \mu^2$ [-]
 D_i : riser diameter [m]

d_p : particle diameter [m]
 Fr : Froude number, $U_g^2/g \cdot d_p$ [-]
 g : gravitational acceleration [m/s^2]
 G_s : solids circulation rate [kg/m^2s]
 G_{sc} : solids circulation rate in dilute phase [kg/m^2s]
 H_t : total riser height [m]
 Re_p : particle Reynolds number, $\rho U_g d_p / \mu$ [-]
 U_g : gas superficial velocity [m/s]
 U_{sc} : solid velocity in dilute phase [m/s]
 U_{slip} : slip velocity [m/s]
 U_t : particle terminal velocity [m/s]
 Z : height above distributor [m]
 Z_i : inflection point [m]

그리스 문자

ϵ : gas holdup [-]
 ϵ_s : solid holdup [-]
 ϵ_{sc} : solids holdup in dilute phase [-]
 μ : air viscosity [$kg/m \cdot s$]
 ρ_g : density of gas [kg/m^3]
 ρ_s : density of particle [kg/m^3]
 ϕ : slip factor [-]
 $\Delta P / \Delta L$: pressure drop [kg/m^2s^2]

참고문헌

1. 김상돈, 이근성 : 화학공업과 기술, **5**(3), 68(1987).
2. Yerushalmi, J.: in "Circulating Fluidized Bed Technol.", eds. by P. Basu, Pergamon Press, New York, 97(1986).
3. Dry, R. J. and La Nauze, R. D.: *Chem. Eng. Progress*, **86**(7), 31(1990).
4. Kobro, H. and Brereton, C.: in "Circulating Fluidized Bed Technol.", eds. by P. Basu, Pergamon Press, New York, 263(1986).
5. Li, Y. and Kwauk, M.: in "Fluidization", eds. by J. R. Grace and J. M. Masten, Plenum Press, New York, 537(1980).
6. Arena, U., Cammarota, A. and Piston, L.: in "Circulating Fluidized Bed Technol.", eds. by P. Basu, Pergamon Press, New York, 119(1986).
7. Choi, J. H., Yi, C. K. and Son, J. E.: *Korean J. of Chem. Eng.*, **7**(4), 306(1990).
8. Yerushalmi, J. and Cankurt, N. T.: *Powder Technol.*, **24**, 187(1979).
9. Weinstein, H., Graft, R. A., Meller, M. and Shao, M.: in "Fluidization", eds. by D. Kunni and R. Toei, Engineering Foundation, 299(1983).
10. Zenz, F. A. and Weil, F. A.: *AIChE J.*, **52**(1), 472(1958).
11. Kunii, D. and Levenspiel, O.: *Powder Technol.*, **61**, 193(1990).
12. Patience, G. S., Chaouki, J., Beruti, F. and Wong, R.: *Powder Technol.*, **72**, 31(1992).
13. Bai, D. R., Jin, Y., Yu, Z. Q. and Zhu, J. X.: *Powder Technol.*, **71**, 51(1992).
14. Grace, J. R.: *Chem. Eng. Sci.*, **45**, 1953(1990).
15. Grewal, N. S., Maurer, R. D. and Fox, W.: Proc. of the 1991 Int. Conf. on FBC, eds. by E. J. Anthony, 317(1991).
16. Kato, K., Shibasaki, H., Tamura, K., Arita, S., Wang, C. and Takarada, T.: *J. Chem. Eng. Japan*, **22**, 205(1989).
17. Rhodes, M. J. and Geldart, D.: *Chem. Eng. Res. Des.*, **67**, 20(1989).
18. Kwauk, M., Wang, N., Li, Y., Chen, B. and Shen, Z.: in "Circulating Fluidized Bed Technol.", ed. by P. Basu, Pergamon Press, New York, 33(1986).
19. Chang, H. and Louge, M.: *Powder Technol.*, **70**, 259(1992).
20. Glicksman, L. R.: *Chem. Eng. Sci.*, **39**(9), 1373(1984).