

## 순환유동층에서 입자의 크기변화에 따른 총밀도의 변화특성

안귀룡 · 한귀영<sup>†</sup>

성균관대학교 화학공학과  
(1996년 2월 23일 접수, 1996년 7월 10일 채택)

## The Effect of Particle Size on the Suspension Density in a Circulating Fluidized Bed

Gui Ryong Ahn and Gui Young Han<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, SungKyunKwan University  
(Received 23 February 1996; accepted 10 July 1996)

### 요 약

순환유동층의 조업에 중요한 영향을 미치는 고체입자의 농도분포에 대한 고체입자 크기의 영향을 살펴보았다. 본 연구에 사용된 순환유동층은 직경 50 mm, 높이 2500 mm였다. 사용된 입자는 크기가 다른 모래였으며 각각의 평균 직경은 147, 280  $\mu\text{m}$ 이었다. 기체의 유속범위는 3.0-5.5 m/s, 입자순환량은 10-100  $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 이었으며 이때 압력강하로부터 측정된 suspension density는 10-80  $\text{kg}/\text{m}^3$ 이었다. 입자의 크기변화 및 기체유속의 변화에 따른 고체입자의 국부적 그리고 평균 농도분포의 변화를 관찰할 수 있었으며, 순환유동층의 조업변수들로부터 평균 입자농도를 예측할 수 있는 상관관계식을 제시하였다.

**Abstract**—An experimental investigation was carried out to determine the effect of particle size and gas velocity on the suspension density in a circulating fluidized bed. The experimental test section has the dimension of 50 mm ID  $\times$  2500 mm height and two different sizes of sand (147, 280  $\mu\text{m}$ ) were employed as the bed material. The operating conditions of gas velocity and solid circulation rate were in the ranges of 3.0-5.5 m/s and 10-100  $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ , respectively and the corresponding suspension density determined from the pressure drop was 10-80  $\text{kg}/\text{m}^3$ . The effects of gas velocity and solid circulation rate on the suspension density with different size of sand particle was observed. A correlation was proposed to predict the cross-sectional averaged suspension density with the operating variables.

**Key words:** Circulating Fluidized Bed, Suspension Density, Axial Profile, Particle Size Effect

### 1. 서 론

순환유동층(Circulating Fluidized Bed: CFB)은 고속의 기체와 크기가 비교적 작은 고체입자간의 긴밀한 접촉을 통하여 대규모의 여러 가지 화학적, 물리적 작업을 수행하는 유동층 기술의 한 분야이다. 순환유동층은 1940년경부터 원유로부터 촉매(Fluid Cracking Catalyst: FCC)에 의한 가솔린의 생산 등 석유정제공업에 이용되어 왔으며[1], 비촉매 반응에 있어서의 공업적 응용은 1970년 독일 Lurgi 사의 CFB Calciner를 첫 번째로 들 수 있으며[2] 현재는 석탄의 연소 및 가스화에 상업적 규모로 이용되고 있다. 이러한 순환유동층의 폭넓은 응용범위의 확대는 기존의 기포유동층에 비하여 조업 유속의 범위가 넓고 기체의 유속이 빨라 고체의 처리능력이 크며, 기체가 plug flow로 유지되므로 기체의 backmixing이 적고, 기체-고체간의 접촉효율이 높아서 유동층 전체에 걸쳐서 높은 반응전화율을 가지며 반응기 온도조절에도 용이하기 때문이다. 또한, 기체유속이 높아 입자분포가 넓거나 부착성이 강한 고체입자에도 사용이 가능하다는 이점이 있다[3]. 순환유동층의 공업적 응용이 1940년대부터 확

발히 진행되었음에도 불구하고 순환유동층의 수력학적 특성에 관한 연구는 1970년대 중반 Yersulmi와 Squares[4]가 “fast fluidization”이라는 새로운 유동화 영역을 소개함으로써 시작되었다. 순환유동층에서 고체입자와 기체의 접촉에 따른 수력학적 특성을 이해하기 위해서는 먼저 유동층내에서의 각기 다른 flow regime에 관한 이해가 필요하다. Fig. 1은 기체의 유속변화에 따른 유동층내의 flow regime을 보여준다. 순환유동층은 fast fluidization regime을 가지며 기체에 의하여 유동층밖으로 비산된 입자들은 사이클론에 의하여 포집되어 유동층내로 재주입되어서 순환유동층이라 불린다. 이러한 순환유동층의 독특한 유동특성은 유동층 중앙부(core)는 고체입자의 농도가 아주 희박한 상태에서 upflow를 가지며, 유동층 벽면근처에서는 고체입자의 농도가 농후한 downflow를 갖는다. 이러한 현상 때문에 순환유동층의 유동특성을 core-annulus flow라 부른다. 또한, 축방향으로 보았을 때 순환유동층은 일반적으로 하부의 농후상(dense phase)과 상부의 희박상(lean phase)으로 나누어 볼 수 있다. 순환유동층내에서 축방향 고체입자의 농도분포는 유동층 반응기의 온도분포, 반응온도 제어, 그리고 석탄연소기의 열회수량 결정 등 주

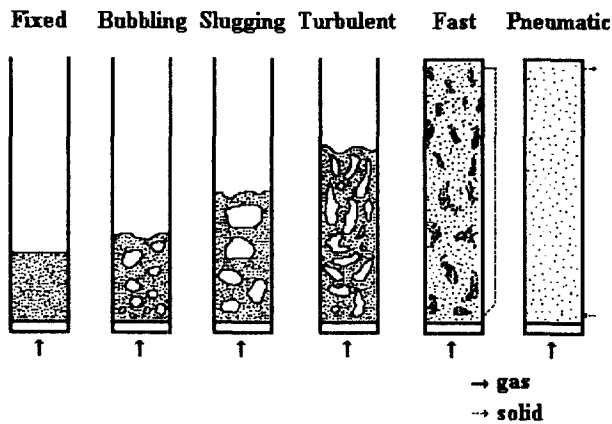


Fig. 1. Flow regimes in fluidization.

요한 정보를 제공하므로 상업화 규모의 순환유동층을 설계하는데 필수적인 공학적 자료가 된다.

본 연구에서는 상업적 규모의 순환유동층 설계와 조업조건을 결정하는데 기본적 자료가 되는 촉방향의 고체입자의 국부적, 그리고 평균 농도분포에 대한 조업조건의 영향과 입자크기의 영향을 주로 살펴보았다.

## 2. 실험

본 실험에 사용된 순환유동층의 개략도는 Fig. 2에 나타내었다. 순환유동층은 고체입자의 흐름을 관찰할 수 있도록 직경 50 mm, 높이 2500 mm인 acryl column으로 제작하였고, 크게 공기공급장치, riser, cyclone, 그리고 입자 재순환용 유동층으로 구성되어 있다. Blower에서 나오는 공기는 유량계를 통하여 riser로 공급되며 riser 하부에는 porous plate를 분산판으로 사용하여 입자의 유동이 균일하도록 하였다. Riser의 벽면에는 압력강하를 측정하기 위해 pressure tap을 500 mm 간격으로 4개를 설치하였고, 입자의 유출을 막기 위해 filter를 설치하였다. Pressure tap은 manometer와 연결되어 있고, 이로부터 입자의 농도를 측정하였다. 유동층 밖으로 비산된 입자를 포집하기 위해 사이클론을 riser 출구쪽에 설치하였다. 사이클론에서 포집된 입자를 riser로 재주입하기 위해 사이클론 하단부와 riser 하단부 사이는 직경 75 mm의 column을 설치하고 유동층 상태로 유지하여 입자의 원활한 주입을 가능하게 하였다. 또한 riser와 연결된 하단부에는 ball valve를 설치하여 riser로 재주입되는 입자의 양을 조절하였다. 한편, 순환유동층 조업의 주요변수인 solid circulation rate를 측정하기 위하여 사이클론 하단부에 직경 75 mm, 길이 300 mm인 column을 설치하고 분산판이 설치된 butterfly valve를 이용하여 순환유동층이 정상상태로 조업할 때 밸브를 닫고 column에서의 입자의 축적속도를 측정하여 solid circulation rate를 결정하였다.

본 연구에 사용된 입자는 Geldart의 분류에 의한 type B의 sand를 사용하였고, 입자크기에 따른 유동상태의 변화를 관찰하기 위해 크기가 다른 두 종류의 입자를 사용하였다. Table 1과 2에 입자크기 분포와 물리적 성질을 표시하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. Cross-sectional Averaged Suspension Density의 결정

어떤 수직관 내부로 기/고체 혼합물이 suspension을 이루며 up-flow를 유지할 때 발생하는 압력강하는 friction, acceleration 그리고

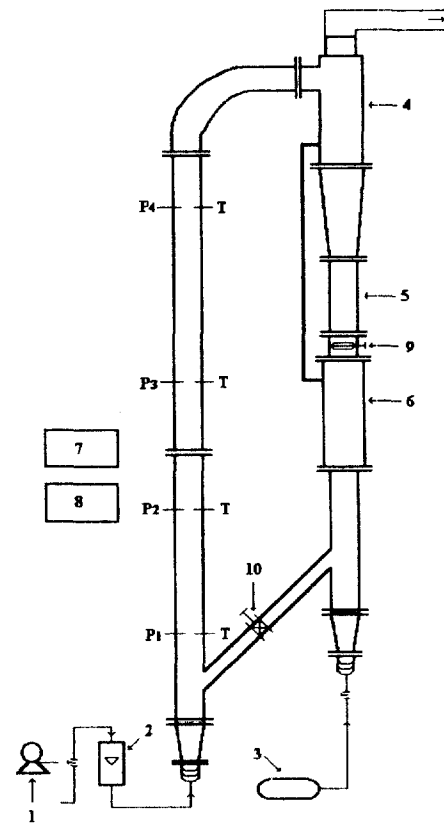


Fig. 2. Schematic diagram of the CFB test facility.

- |                       |                          |
|-----------------------|--------------------------|
| 1. Blower             | 7. Temperature indicator |
| 2. flow meter         | 8. Manometer             |
| 3. Compressor         | 9. Butterfly valve       |
| 4. Cyclone            | 10. Valve                |
| 5. Return column      | T: Thermocouple          |
| 6. Particle reservoir | P: Pressure tap          |

Table 1. Size distribution of sand particles

| Sand 2            |                               | Sand 3            |                               |
|-------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------------------|
| Range (μm)        | Cumulative weight fraction(%) | Range (μm)        | Cumulative weight fraction(%) |
| - 75              | 5.98                          | - 150             | 0.54                          |
| - 106             | 40.58                         | - 180             | 18.41                         |
| - 150             | 90.25                         | - 250             | 49.44                         |
| - 180             | 100.00                        | - 300             | 100.00                        |
| Mean size: 147 μm |                               | Mean size: 280 μm |                               |

Table 2. Properties of sand particles

| Properties                           | Sand 2 | Sand 3 |
|--------------------------------------|--------|--------|
| Mean diameter(μm)                    | 147    | 280    |
| Bulk density(kg/m <sup>3</sup> )     | 1720   | 1850   |
| Apparent density(kg/m <sup>3</sup> ) | 2450   | 2500   |
| Minimum fluidization velocity(m/s)   | 0.027  | 0.098  |
| Terminal velocity(m/s)               | 0.730* | 1.448* |

\*: Calculated by Haider & Levenspiel(1989)'s method.

gravitation에 의한 압력강하의 합으로 나타난다. 그러나 순환유동층에서의 압력강하는 gravitational pressure drop에 의한 압력강하가 다른 두 가지 형태의 압력강하보다 크기 때문에 일반적으로 전체 압력

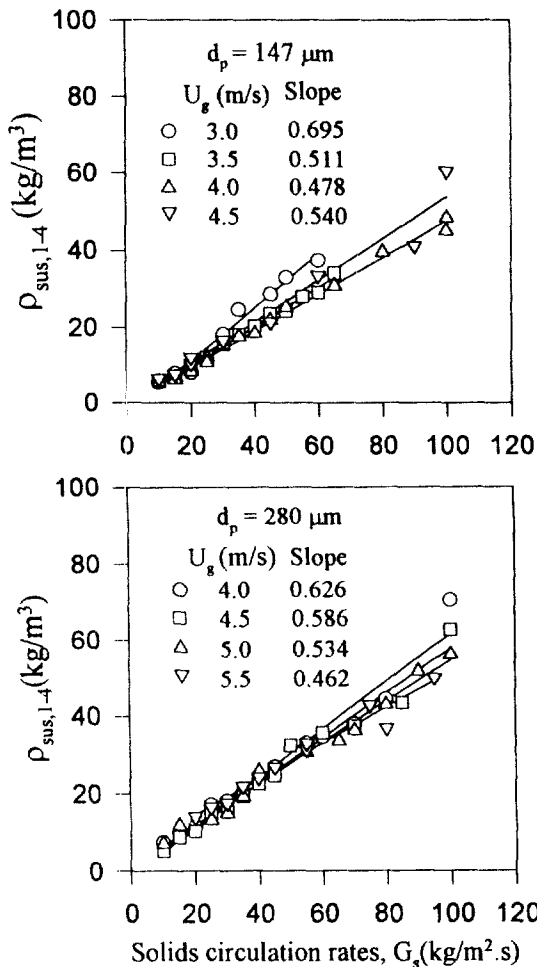


Fig. 3. Effect of solid circulation rate on the average suspension density.

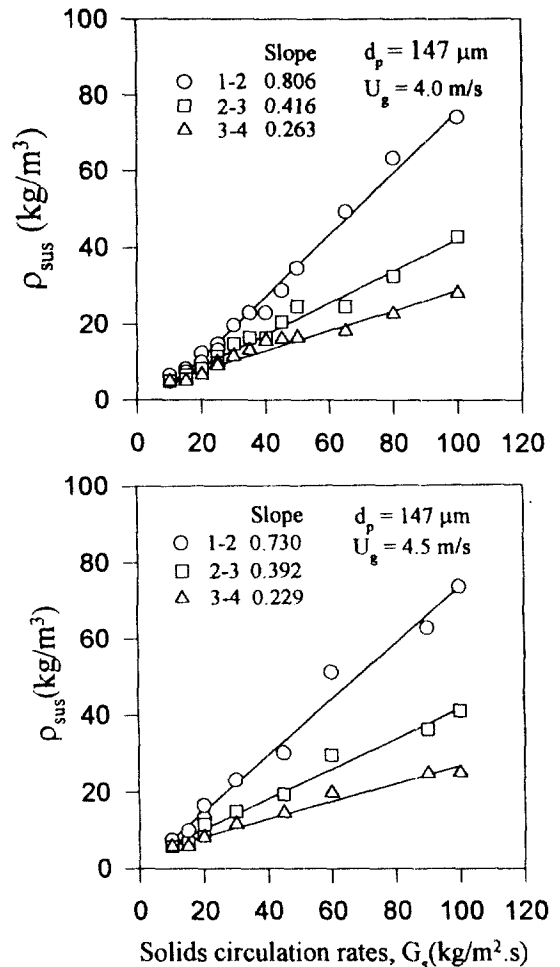


Fig. 4. Effect of solid circulation rate on the local suspension density with  $147 \mu\text{m}$  sand.

강하는 입자의 무게에 의한 static head로 간주한다[5]. 본 수력학적 특성연구에서 riser에 설치된 pressure tap으로부터 얻어진 압력강하로부터 다음과 같은 수식전개에 의하여 순환유동층의 유동상태, 열전달 및 반응전화율에 영향을 미치는 cross-sectional averaged suspension density( $\rho_{sus}$ )를 결정하였다.

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \rho_{sus} \cdot g \quad (1)$$

한편, 기체와 고체의 혼합물인 suspension에서 순환유동층 단위체적당 고체입자의 분율인 solid fraction( $\epsilon_s$ )은

$$\rho_{sus} = (\epsilon_s) \rho_p + (1 - \epsilon_s) \rho_g \quad (2)$$

의 관계식에서 구하였다.

### 3-2. 입자 순환량의 영향

순환유동층에서 유동특성에 영향을 미치는 가장 중요한 변수 중의 하나인 입자의 순환량( $G_s$ )에 따른 유동층의 평균 suspension density의 변화는 Fig. 3에 나타내었다. 그림 Y축의 소첨자 1-4는 pressure tap의 번호로서 이는 유동층 전체에 대한 압력강하의 측정으로 계산된 suspension density임을 의미한다. 순환유동층의 수력학적 특성에 관한 많은 연구에서 이미 보고되었듯이[6, 7] 본 연구결과에서도 사용된 입자의 크기에 상관없이 입자의 순환량이 증가할수록 각

기 다른 기체유속에서 선형적으로 suspension density가 증가함을 알 수 있다. 즉, 입자의 순환량 증가는 유동층 단위체적당 고체입자의 체류량 증가를 가져오며 이것이 suspension density의 증가로 나타난다. 또한, 기체의 유속증가에 따라서 drag force가 증가하여 입자의 체류시간이 짧아지므로 suspension density가 감소함을 알 수 있다. 한편, 유동층 높이에 따른 local suspension density의 변화를 입자의 순환량을 변수로 하여 각기 다른 입자에 대하여 Fig. 4, 5에 나타내었다. 그림에서 표시된 1-2는 pressure tap 1번(유동층의 분산판 바로 위)과 2번 사이의 압력강하로부터 계산된 suspension density임을 의미하며 번호가 클수록 유동층 상부에서 측정된 suspension density를 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 입자의 순환량이 증가함에 따라 suspension density가 증가하는 것은 유동층내에 입자의 수가 증가함에 따른 것이고 여기서 주목할 것은 입자의 순환량에 따른 suspension density의 증가율이 유동층의 높이에 따라 다르다는 것이다. 즉, 순환유동층의 하부에서의 suspension density의 증가율이 상부에서의 증가율보다 크다는 것이다. 이와 같은 현상은 유동층 하부에서는 입자의 가속현상이 일어나며 입자의 축방향 속도가 종말속도에 이르지 못한 상태이며, 결국 fully developed flow를 가지지 못하고 있다고 볼 수 있다. 또한, 유속변화에 따른 suspension density의 증가 경향을 보면, 유속이 증가할수록 그 기울기가 적어짐을 알 수 있으며, 이것은 높은 유속에서는 기체에 의한 drag force가 증가하여 입자는 쉽게 가속이 되어 fully developed flow에 접근해 감을 알 수 있

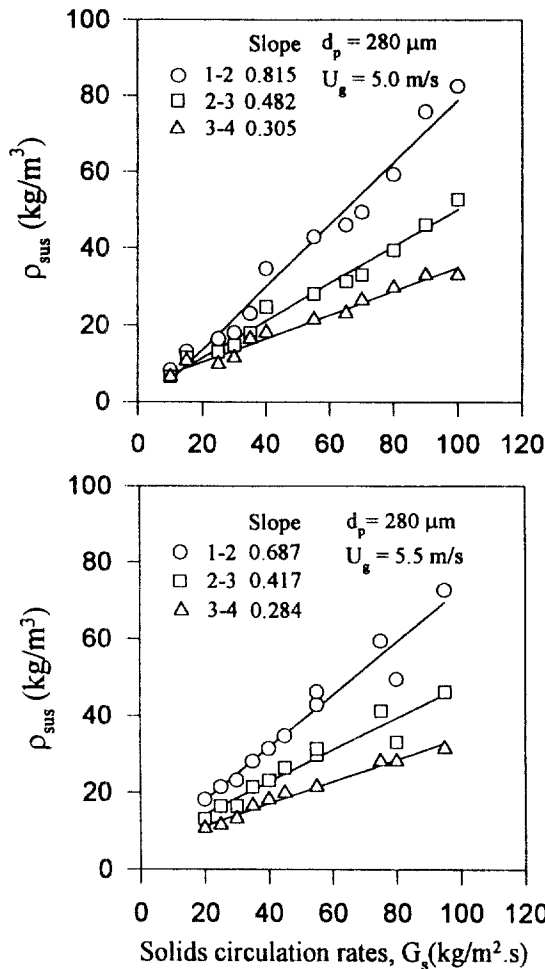


Fig. 5. Effect of solid circulation rate on the local suspension density with 280  $\mu m$  sand.

다. 또한, 입자의 순환량의 변화에 따른 suspension density의 변화율을 각기 다른 입자에 대하여 관찰한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)에서 알 수 있듯이 큰 입자의 경우가 작은 입자의 경우보다 입자의 순환량의 변화에 따른 suspension density의 변화율이 큰 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 주어진 기체유속하에서 입자의 크기가 클수록 입자를 terminal velocity 이상으로 가속하는데 어렵고 developing flow region의 길이가 길다는 것을 의미한다. 그러나 Fig. 6(b)에서 보듯이 유속이 증가한 경우에는 입자의 크기변화에 따른 suspension density의 변화율에 큰 차이를 보이지 않는다. 이것은 유속이 증가함에 따라 입자들의 fully developed flow region의 출발점이 유동층 하부로 옮겨간 것으로 여겨진다.

### 3.3. 축방향 고체입자 농도분포

순환유동층에서 유동층 높이변화에 따른 고체입자의 농도분포를 여러 가지 조업조건에 따라서 예측하는 것은 순환유동층의 공업적 응용에 있어서 매우 유용한 자료가 된다. 그러나 순환유동층에서 입자의 축방향 농도분포는 순환유동층의 구조 즉, 높이, 직경, 출구형태, 재순환장치의 모양 등에 따라 변하기 때문에 이에 대한 일반적인 이론식을 유도하기는 어려운 실정이다. 두 종류의 크기가 다른 모래를 사용하여 여러 가지 다른 유속과 입자의 순환량에 따른 축방향 고체입자분포의 실험적 측정결과를 Fig. 7, 8에 나타내었다. 작은 입자의 경우 입자의 순환량에 따라 suspension density가 증가하였

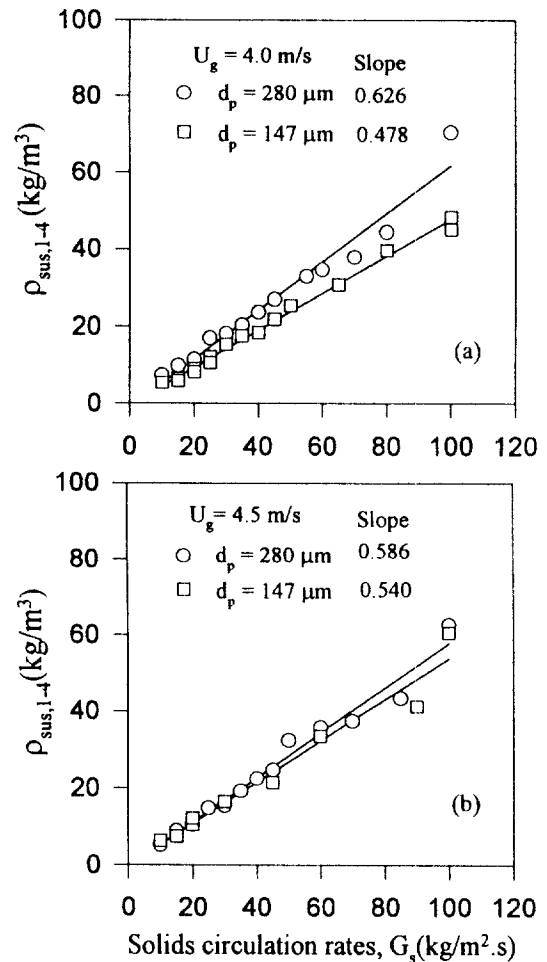


Fig. 6. Effect of particle size on the average suspension density.

고, 입자의 순환량이 증가할수록 유동층 상부와 하부사이의 suspension density의 차이가 커짐을 알 수 있었다. 즉, 입자의 순환량을 클 경우 dense bed와 lean bed간의 경계가 뚜렷해지며 그 경계면이 상승함을 알 수 있다. 한편, 큰 입자를 사용한 경우에는 작은 입자의 경우보다 높이에 따른 고체입자 농도의 변화가 완만한 것을 관찰할 수 있었다.

### 3.4. 기체유속의 영향

순환유동층의 조업조건에서 유동특성에 영향을 미치는 주요한 변수 중의 하나는 기체유속이다. 이러한 기체유속은 유동층내의 입자 운동을 결정하는 주요 변수라 할 수 있다. 따라서, 기체유속의 변화에 따른 suspension density의 영향을 입자의 순환량을 매개변수로 하여 각기 다른 크기의 입자에 대하여 살펴보고 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 보듯이 일정한 입자의 순환량  $G_s$ 에서 유속이 증가하면 suspension density가 서서히 감소함을 알 수 있으며, 이것은 앞에서 언급한대로 기체에 의한 drag force의 증가로 입자의 축방향 속도가 증가하기 때문으로 볼 수 있다. 한편, 그림에서 보듯이 suspension density가 기체유속에 따라 감소하다가 높은 유속에서 다소 증가하는 경향을 보이며 이것은 압력강하로부터 suspension density를 결정할 때 무시하였던 기체와 유동층 벽면과의 마찰에 의한 frictional pressure drop이 어느정도 영향을 미친 것으로 여겨진다. 입자의 크기변화에 따른 기체유속의 suspension density에 대한 영향은 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 일정한 값으로

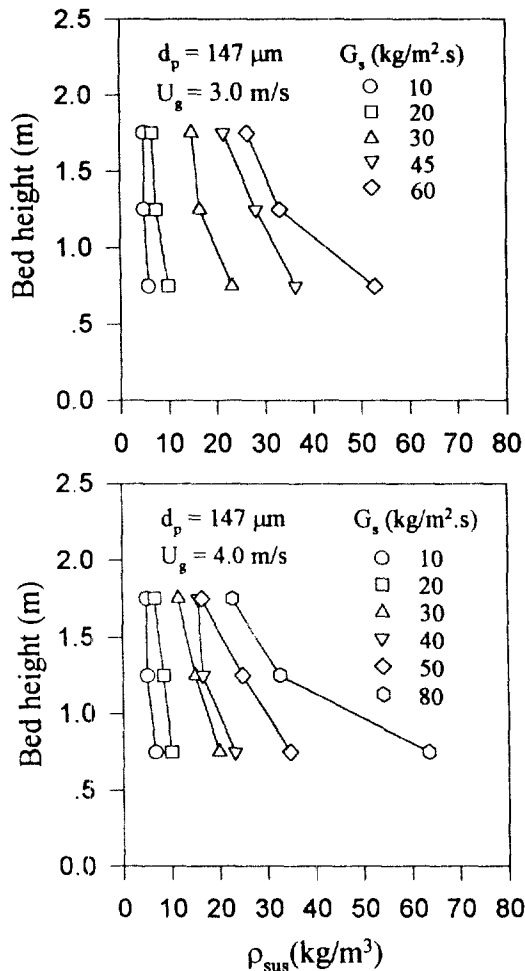


Fig. 7. Axial variation of suspension density with 147  $\mu\text{m}$  sand particle.

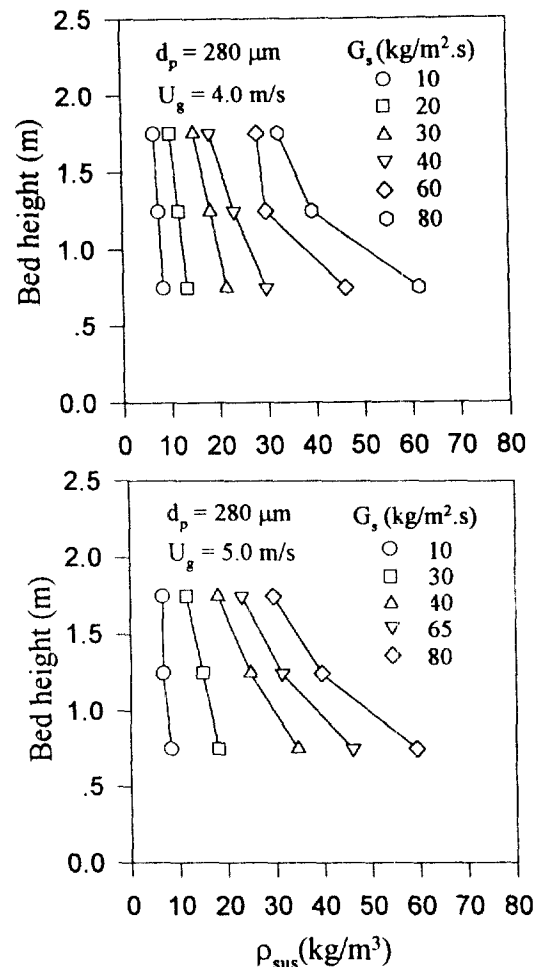


Fig. 8. Axial variation of suspension density with 280  $\mu\text{m}$  sand particle.

주어진  $G_s$ 의 조건에서 작은 입자보다는 큰 입자가 유속에 대하여 좀더 민감하게 suspension density에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 앞에서 언급하였듯이 작은 입자가 큰 입자보다 주어진 유속범위내에서 보다 짧은 시간내에 fully developed flow에 접근함에 비하여 큰 입자의 경우에는 좀더 충분한 거리의 developing region이 필요하다는 것을 의미한다고 여겨진다.

### 3-5. 상관관계식

순환유동층에서 조업조건에 따른 고체입자의 농도분포에 대한 정량적인 상관관계식은 순환유동층의 설계 및 조업변수의 최적화를 위한 기본적인 자료를 제공할 수 있다. 이러한 이유 때문에 이제까지 순환유동층의 수력학적 특성에 관한 활발한 연구와 함께 조업변수에 따른 suspension density의 변화를 정량적으로 표현하려는 많은 노력이 진행되어왔다[8-10]. 그러나 순환유동층의 크기 및 형태의 변화 때문에 측방향 및 반경방향의 입자농도 분포를 일반화된 상관관계식으로 표현하기에는 적지 않은 어려움이 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 순환유동층의 설계에 있어서 가장 기초가 되는 cross-sectional average suspension density를 결정하는 상관관계식을 제시하고자 한다.

순환유동층의 평균 입자농도에 영향을 미치는 주요 변수들은 다음과 같은 조업 및 설계변수들이며, 이것들을 이용하여 상관관계식을 유도하였다.

$$f(\rho_{\text{sus}}) = f(U_g, G_s, d_p, \rho_s, D_r) \quad (3)$$

순환유동층의 수력학적 특성은 각각의 변수들의 상호 조합에 의해 표현될 수 있으며 다음과 같은 무차원 변수가 이용되고 있다[11]. 즉, Reynolds numbers( $d_p U_g \rho_s / \mu_g$ ), Froude number( $U_g^2 / g d_p$ ), 고체입자 순환량( $G_s / \rho_s U_g$ ), 고체입자와 유동화기체 밀도의 비( $\rho_s / \rho_g$ ), 고체입자의 물리적 성질( $\Phi_s, d_p$ ), 그리고 유동층의 길이 및 반경들이 포함된다. 고속의 유동화기체에 의하여 비교적 Reynolds number의 값은 큰 영향을 미치지 않음을 예측할 수 있고, 실질적인 고체입자의 체류시간을 결정하는 Froude number와 고체입자 순환량, 그 외의 조업변수를 사용하여 순환유동층에서 고체입자의 농도를 예측할 수 있는 상관관계식을 얻었다.

$$\epsilon_s = 28.75 \left( \frac{U_g^2}{g d_p} \right)^{-0.48} \left( \frac{G_s}{\rho_s U_g} \right)^{0.86} \left( \frac{D_r}{d_p} \right)^{0.24} \quad (4)$$

이 상관관계식은 0.91의 correlation coefficient를 가지며 다음의 조업변수 범위에서 결정되었다( $3.0 < U_g [\text{m/s}] < 9.7$ ,  $10 < G_s [\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}] < 600$ ,  $50 < d_p [\mu\text{m}] < 350$ ,  $10 < \rho_{\text{sus}} [\text{kg/m}^3] < 150$ ). 식 (4)의 형태로 얻어진 상관관계식을 기존의 연구결과들[5, 9, 12-14]과 비교한 그림을 Fig. 11에 나타내었으며 약 30%의 오차범위내에서 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 위에 제시된 상관관계식에서 알 수 있듯이 고체입자의 평균농도

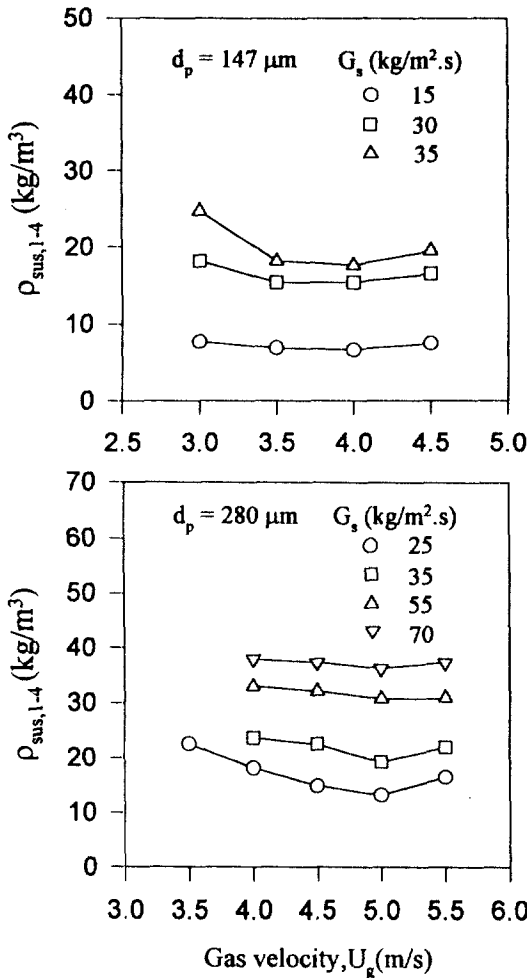


Fig. 9. Effect of gas velocity on the average suspension density.

는 기체의 유속에 반비례하고 입자의 순환량에 비례하고 입자의 크기가 클수록 높은 값을 갖는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

크기가 다른 두 가지의 sand particle를 사용하여 순환유동층(0.05 m ID×2.5 m height)에서 순환유동층의 공업적 응용에 기초가 되는 수력학적 특성을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 고체의 순환량이 증가함에 따라 suspension density는 증가하였고, 높이에 따라 증가율의 차이가 존재함을 알 수 있었다.
- (2) 기체유속의 변화에 따른 suspension density의 변화는 입자가 큰 경우에 더욱 민감하게 변화하는 것을 알 수 있었다.
- (3) 순환유동층에서 유동층의 평균 고체입자 농도는 조업변수에 따라 다음과 같은 상관관계식을 가짐을 알 수 있었다.

$$\epsilon_s = 28.75 \left( \frac{U_g^2}{gd_p} \right)^{-0.48} \left( \frac{G_s}{\rho_g U_g} \right)^{0.86} \left( \frac{D_t}{d_p} \right)^{0.24}$$

#### 감 사

본 연구는 에너지자원기술개발센터의 주관하에 통상산업부의 청

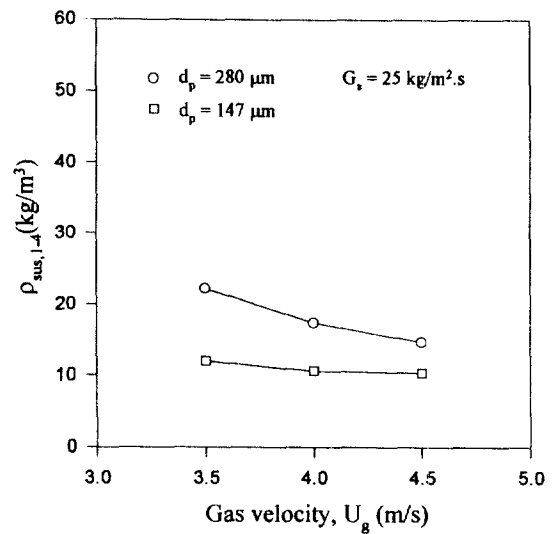


Fig. 10. Effect of particle size on the suspension density at different gas velocity.

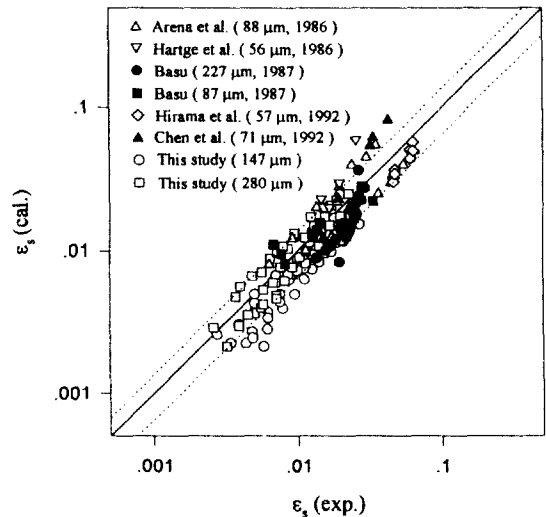


Fig. 11. Comparison of the experimental data with the proposed correlation.

정에너지사업 연구결과의 일부이며 연구비를 지원하여 준 삼성중공업에 감사를 드립니다.

#### 사용기호

- $D_t$  : bed diameter [m]
- $d_p$  : particle diameter [m]
- $G_s$  : solid circulation rates [ $kg/m^2.s$ ]
- $U_g$  : superficial gas velocity [m/s]

#### 그리스 문자

- $\epsilon_s$  : solid fraction
- $\rho_g$  : gas density [ $kg/m^3$ ]
- $\rho_p$  : solid density [ $kg/m^3$ ]
- $\rho_{sus}$  : solid suspension density [ $kg/m^3$ ]
- $\Phi_s$  : sphericity of particle

## 참고문헌

1. Square, A.M.: Proc. 1st Int. Conf. on CFB, Halifax, Canada, 1(1986).
2. Reh, L.: *Chem. Ing. Prog.*, **67**, 58(1970).
3. Kunii, D. and Levenspiel, O.: "Fluidization Engineering", 2nd ed., Butterworth-Heinemann(1991).
4. Yerusalmi, J., Tuner, D.H. and Squires, A.M.: *I & EC Proc. Des. Dev.*, **15**, 47(1976).
5. Hartge, E.U., Li, Y. and Werther, J.: Proc. 1st Int. Conf. on CFB, Halifax, Canada, 153(1986).
6. Cho, Y.J., Namkung, W., Kim, S.D. and Park, S.: *J. Chem. Eng. Japan*, **27**, 158(1994).
7. Rhode, M.J. and Geldart, D.: *Powder Tech.*, **53**, 155(1987).
8. Kato, K. and Shibasaki, H.: *J. Chem. Eng.*, **22**, 205(1989).
9. Arena, U., Cammaroto, A. and Pistone, L.: Proc. 1st Int'l Conf. on CFB, Halifax, Canada, 119(1986).
10. Bai, D.R., Jin, Y., Yu, Z. Q. and Zhu, J.X.: *Powder Tech.*, **71**, 51(1992).
11. Glicksman, L.R.: *Chem. Eng. Sci.*, **39**, 1373(1984).
12. Basu, P. and Nag, P.K.: *Int. Heat Mass Transfer*, **30**, 2397 (1987).
13. Chen, C.C. and Chen, C.L.: *Chem. Eng. Sci.*, **47**, 1017(1992).
14. Hiram, T., Takeuchi, H. and Chib, T.: *Powder Tech.*, **70**, 207 (1992).