

수직관에서 중력에 의한 고체하강속도

류호정^{*,†} · 박재현 · 선도원 · 이승용

한국에너지기술연구원 온실가스연구단
305-343 대전시 유성구 장동 71-2
(2011년 11월 23일 접수, 2011년 12월 30일 채택)

Solid Descending Velocity by Gravity in a Vertical Downcomer

Ho-Jung Ryu^{*,†}, Jaehyeon Park, Do-won Shun and Seung-Yong Lee

Greenhouse Gas Department, Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea
(Received 23 November 2011; accepted 30 December 2011)

요 약

수직 고체하강관에서 고체하강속도를 측정할 수 있는 편리한 실험방법을 제시하였으며 Geldart 분류 A, B, D 입자를 사용하여 수직관의 직경 및 입자특성 변화에 따른 고체하강속도를 측정 및 고찰하였다. 초기 입자 장입량 변화에 따른 고체하강속도의 변화는 크지 않았으며 고체하강관 직경이 증가함에 따라 고체흐름속도, 고체순환속도 및 고체하강속도가 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 고체하강속도의 경우 모든 입자에 대해 하강관의 직경이 증가함에 따라 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, Geldart 분류 A 및 B 입자와 Geldart 분류 D 입자의 결과가 확실하게 구별되는 경향을 나타내었다. 측정된 고체하강속도를 바탕으로 Geldart 분류 A 및 B 입자계와 D 입자계에 대한 고체하강속도 상관식을 제시하였으며 측정값과 유사한 값을 예측할 수 있었다.

Abstract – New experimental method to measure solid descending velocity in a vertical downcomer was presented and effects of downcomer diameter and particle properties on descending velocities for Geldart group A, B, and D particle have been measured and investigated. The effect of initial solid inventory on solid descending velocity was negligible. However, solid flow rate, solid circulation rate and solid descending velocity increased as the downcomer diameter increased. Moreover, solid descending velocity increased linearly as the downcomer diameter increased and showed distinguishable trend for Geldart group D particle from Geldart group A and B particles. Empirical correlations of solid descending velocity for Geldart group D and Geldart group A and B particles have been derived based on the measured values. The correlations could predict well the solid descending velocities.

Key words: Downcomer, Solid Circulation, Solid Descending Velocity, Fluidized Bed

1. 서 론

유동층 반응기에서 고체하강관(수직관 및 경사관)은 호퍼(hopper)에서의 고체배출, 사이클론에서 포집된 고체의 재순환, 2탑 유동층 반응기에서의 고체순환 등을 위해 널리 사용되고 있다. 일반적으로 고체하강관에서는 원활한 고체흐름을 위해 추가적인 기체를 주입하기도 하지만 기체주입에 의한 생성물의 회석, 추가적인 기체주입에 필요한 설비의 절감 등을 위해 중력에 의해 고체를 하강시키는 경우도 사용되고 있다.

고체하강관에서 고체하강속도(고체순환속도)에 관한 정보는 고체하강관의 적절한 직경 선정에 매우 중요한 인자이다. 원하는 고체순환속도를 얻을 수 있는 직경보다 작은 직경을 선정할 경우 고체

하강관에서 고체순환속도가 제한되며 고체순환 루프의 한 지점에서 정체가 일어나 고체순환 유치가 어려워지게 된다. 또한 적정 직경보다 큰 직경을 선정할 경우 전체 시스템의 고체 충전량(solid inventory)이 과도하게 증가하여 초기 고체 필요량 증가, 입자 마모 손실 증가, 온도유지를 위한 에너지비용 증가 등에 의해 공정의 경제성이 저하되는 단점이 있다.

유동화기체가 주입되지 않는 고체하강관에서 고체순환속도에 대한 기존 연구들은 매우 제한적인 실정이다. Knowlton[1]은 0.038 m의 직경을 갖는 호퍼 하부에 연결된 수직관에서 모래입자에 대해 관의 길이 변화에 따른 고체하강속도의 변화를 측정 및 고찰하였으며 관의 길이가 증가함에 따라 고체하강속도가 증가하고, 입자크기가 큰 입자들(173, 523 μm)의 경우 관의 길이가 증가함에 따라 고체하강속도가 증가한 후 증가경향이 둔화되는 것으로 보고하였다. 한편 유동화 기체가 주입되는 고체하강관의 경우 Geldart 분류 A 입자계에 대해서는 수직 고체하강관의 직경변화에 따른 고체순환속도의 변

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hjryu@kier.re.kr

^{*}이 논문은 서울과학기술대학교 손재익 교수의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

화범위에 대해 보고된 바 있으며[2], Geldart 분류 B 입자에 대해서는 경사진 고체하강관에 대해 직경변화에 따른 고체순환속도의 변화 범위에 대해 보고된 바 있다. 기존의 연구결과를 종합적으로 고려하면, 유동화기체가 주입되지 않는 standpipe 또는 downcomer에서 직경 변화에 따른 고체순환속도 변화에 대한 보고는 제한적인 실정이다. 또한 고체하강관에서의 고체하강속도의 정확한 측정을 위해서는 반복실험에 의한 확인이 필요하며, 이를 위해서는 하루로 이동된 고체를 고체하강관 상부로 다시 이동시켜야 하므로 실험이 어려운 단점이 있다. 따라서, 관심의 대상이 되는 입자에 대해 수직관에서 고체하강속도를 측정할 수 있는 편리한 실험방법의 제시와 함께 수직관의 직경 및 입자특성 변화에 따른 고체하강속도를 측정하여 적절한 직경을 선정할 수 있는 방법의 제시가 필요하다. 본 연구에서는 수직 고체하강관에서 고체하강속도를 측정할 수 있는 편리한 실험방법을 제시하였으며 Geldart 분류 A, B, D 입자에 대한 하강속도를 측정 및 고찰하였고, 이를 바탕으로 고체하강속도에 대한 상관식을 제시하였다.

2. 실험

2-1. 입자

본 연구에서는 Geldart 분류 A, B, D 입자계를 모두 실험해보기 위해 CO₂ 흡수제(CO₂ absorbent, KX35T5)[3], 유리구슬(glass bead), 모래, 산소공여입자(oxygen carrier, Co₃O₃/CoAl₂O₄)[4,5], Polypropylene 등 다섯 종류의 입자를 사용하였다. Table 1에는 각 입자의 평균입경, 벌크밀도 및 겉보기밀도를 나타내었으며 Fig. 1에는 본 연구에 사용된 입자들의 Geldart 분류[6]를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 CO₂ 흡수제의 경우 Geldart 분류 A 입자계에 속하는 것으로 나타났으며, 유리구슬의 경우 A 입자계와 B 입자계의 경계에 속하고, 모래입자와 산소공여입자의 경우 B 입자계, polypropylene의 경우 D 입자계에 속하는 것으로 나타났다. Polypropylene 입자의 경우 실린더 모양을 갖고 있으며 양쪽의 직경이 다르다. Fig. 1에서 polypropylene 입자를 도시하기 위한 입자크기는 상당직경(equivalent diameter)을 계산하여 나타내었다.

2-2. 실험장치

Fig. 2와 3에는 고체하강속도 측정에 사용된 실험장치의 사진과 내부 장치의 상세도면을 나타내었다. 그림과 같이 실험장치는 모래시계 형태로 아크릴을 이용하여 제작되었으며 모래시계 모양의 중앙에 내경을 알고 있는 수직관을 두고, 원뿔기둥 모양의 고체장입부가 양쪽에 설치된 형태로 제작하였다. 양측의 고체장입부는 동일하게 사용하되, 가운데의 수직관 부분을 교체하여 사용할 수 있도록 하였으며 수직관의 내경을 0.0127, 0.0254, 0.0508, 0.0762, 0.1016 m (0.5, 1, 2, 3, 4 inch)로 변경할 수 있도록 제작하였다. 원뿔기둥 모양의 고체장입부에서 수직관으로 연결되는 부분의 각도는 15°로 동일하게

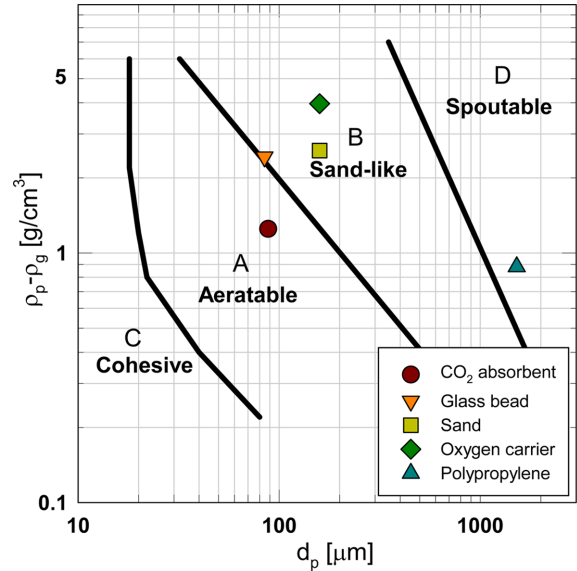


Fig. 1. Geldart's classification of five particles (adapted from Geldart [6]).



Fig. 2. Photos of experimental apparatus.

제작하였으며 수직관의 길이는 모두 0.3 m가 되도록 제작하였다. 장치의 중앙부에는 모래시계 양측의 고체장입부 플랜지를 지지하기 위한 서포트(support)가 설치되었으며, 서포트에 축을 설치하여 회전할 수 있도록 하였고, 180° 씩 회전한 후 정지할 수 있도록 stopper를 설치하였다. 또한 실험장치가 회전한 후 수직으로 정지되어 있는지를 확인하기 위해 서포트에 수평수직계를 설치하여 각도를 확인하였다.

Table 1. Physical properties of five particles

Particles	Size or dimension [μm]	Bulk density [kg/m ³]	Apparent density [kg/m ³]
CO ₂ absorbent (KX35T5)	88.2	1002	1251
Glass bead	84.5	1456	2427
Sand	159	1224	2575
Oxygen carrier (Co ₃ O ₃ /CoAl ₂ O ₄)	159	1026	3970
Polypropylene	D ₁ 910, D ₂ 1140, H 1520	514	883

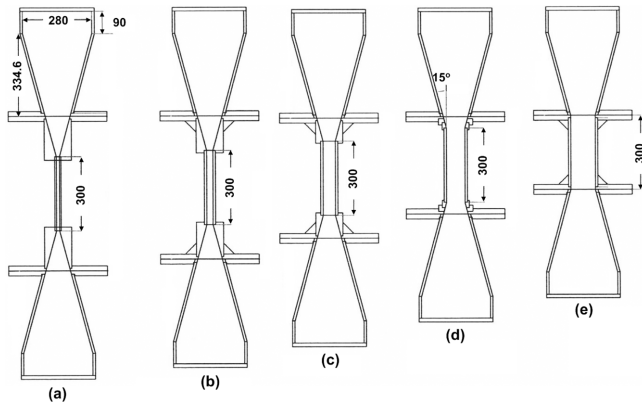


Fig. 3. Detail dimension of experimental apparatus.

이와 같이 모래시계 형태의 실험장치를 사용함으로써 반복실험을 용이하게 진행할 수 있었다.

2-3. 실험 및 해석 방법

각 실험조건에서 먼저 고체입자의 무게를 측정 한 후, 모래시계 형태의 고체장입부 한쪽에 고체입자를 충전하였다. 고체입자가 충전된 고체장입부를 모래시계의 하부에 장착하고, 상부에는 비어있는 고체장입부를 장착한 후 실험장치 중앙에 설치된 손잡이를 180° 회전시켜 하부의 입자를 상부로 이동시켰다. 상부로 이동한 고체장입부 내부의 입자가 수직관을 통과하여 하부의 고체장입부로 모두 이동하여 비워지는 시간을 측정하는 방법(emptying time method)을 사용하였으며 각 실험조건에서 10회 반복실험 후 평균 값을 계산하였다.

주어진 입자무게와 고체가 비워지는 시간(t)을 이용하여 고체흐름 속도(solid flow rate, W_s)를 다음 식 (1)과 같이 계산하였으며, 각 고체하강관의 단면적을 적용하여 식 (2)와 같이 고체순환속도(solid circulation rate, G_s)를 계산하였고, 고체하강관의 단면적과 벌크밀도를 적용하여 식 (3)과 같이 고체하강속도(solid descending velocity, V_s)를 각각 계산하였다[7].

$$W_s = \frac{\text{initial solid inventory}}{\text{emptying time}} = \frac{W_0}{t} \text{ [kg/s]} \quad (1)$$

$$G_s = \frac{W_s}{A} \text{ [kg/m}^2\text{s]} \quad (2)$$

$$V_s = \frac{W_s}{\rho_b \cdot A} \text{ [m/s]} \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 초기 입자무게의 영향

본 실험에서 사용한 다섯 가지 입자들 중 유리구슬의 경우 충분한 양을 보유하고 있었으나 다른 입자들의 경우 고체장입부의 일부분만을 채울 수 있는 양을 확보하고 있는 경우가 있었다. 따라서 본 연구에서는 고체장입부에 채워지는 입자량(무게)의 변화에 따른 고체하강속도의 변화를 측정하였으며, 이를 통해 초기 입자무게의 영향을 먼저 고찰하였다.

Fig. 4에는 고체입자로 유리구슬을 사용했을 때, 모래시계 형태의 고체장입부에 채워지는 초기 입자무게의 변화에 따른 고체하강속도

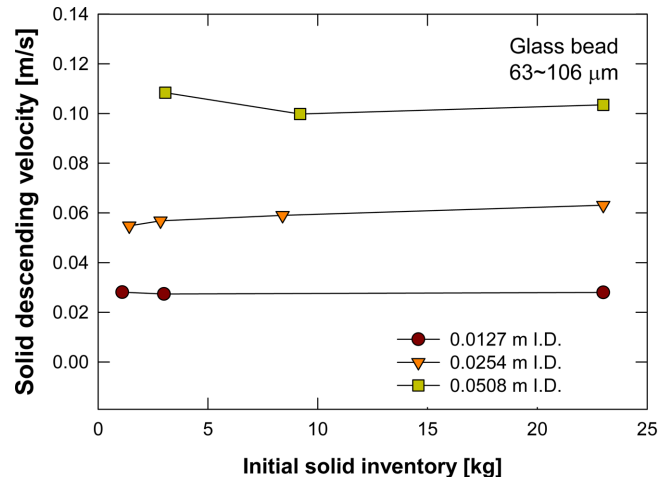


Fig. 4. Effect of initial solid inventory on solid descending velocity.

의 변화를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 고체하강관의 직경이 0.0127, 0.0254, 0.0508 m일 때 모두에 대해 초기 입자무게 변화 (1.1~23 kg)에 따른 고체하강속도의 변화는 크게 나타나지 않았으며 이를 통해 각 입자에 대해 보유하고 있는 입자량을 이용하여 실험한 결과가 각 입자의 특성을 대표할 수 있음을 확인하였다. 향후 실험에서 CO₂ 흡수제, 유리구슬, 모래, 산소공여입자, polypropylene 입자의 실험결과는 각 입자의 초기 충전량이 16, 23, 19.4, 9.92, 7.75 kg인 경우의 실험결과를 나타낸다.

3-2. 고체하강관 직경의 영향

Fig. 5에는 고체하강관 직경의 변화에 따른 다섯 종류 입자의 고체흐름속도, 고체순환속도 및 고체하강속도의 변화를 비교하여 나타내었다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 고체흐름속도(solid flow rate, kg/s)는 하강관의 직경이 증가함에 따라 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 한편 Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 고체하강관 직경의 영향이 함께 고려된 고체순환속도(solid circulation rate, kg/m²s)로 나타낸 경우 고체하강관의 직경이 증가함에 따라 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 Fig. 5(c)에 나타난 바와 같이 고체하강관의 직경과 고체입자의 벌크밀도가 함께 고려된 고체하강속도(solid descending velocity, m/s)로 나타낸 경우 모든 입자에 대해 하강관의 직경이 증가함에 따라 고체하강속도가 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, Geldart 분류 A 및 B 입자계에 속하는 CO₂ 흡수제, 유리구슬, 모래 및 산소공여입자와, Geldart 분류 D 입자계에 속하는 polypropylene 입자의 경우가 확실하게 구별되는 경향을 나타내었다. 결과적으로 고체 하강관 직경의 영향과 입자특성의 영향을 함께 고려하기 위해서는 고체흐름속도, 고체순환속도, 고체하강속도 중에서 하강관 직경의 영향 및 입자 벌크밀도가 함께 고려된 특성값인 고체하강속도를 고려하는 것이 적합한 것으로 사료되었다. 한편 Fig. 5에서 Geldart 분류 D 입자계에 속하는 polypropylene 입자의 경우, 하강관의 직경이 0.0127 m (0.5 inch)인 경우 연속적인 고체하강이 일어나지 않았으며 측정값의 편차가 크게 나타나 결과에 표시하지 않았다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 Geldart 분류 A 및 B 입자계의 경우 입자의 종류와 관계 없이 거의 유사한 고체하강속도 값을 나타내었으며 Geldart 분류 D 입자계의 경우 A 및 B 입자계와는 다른 값을 나

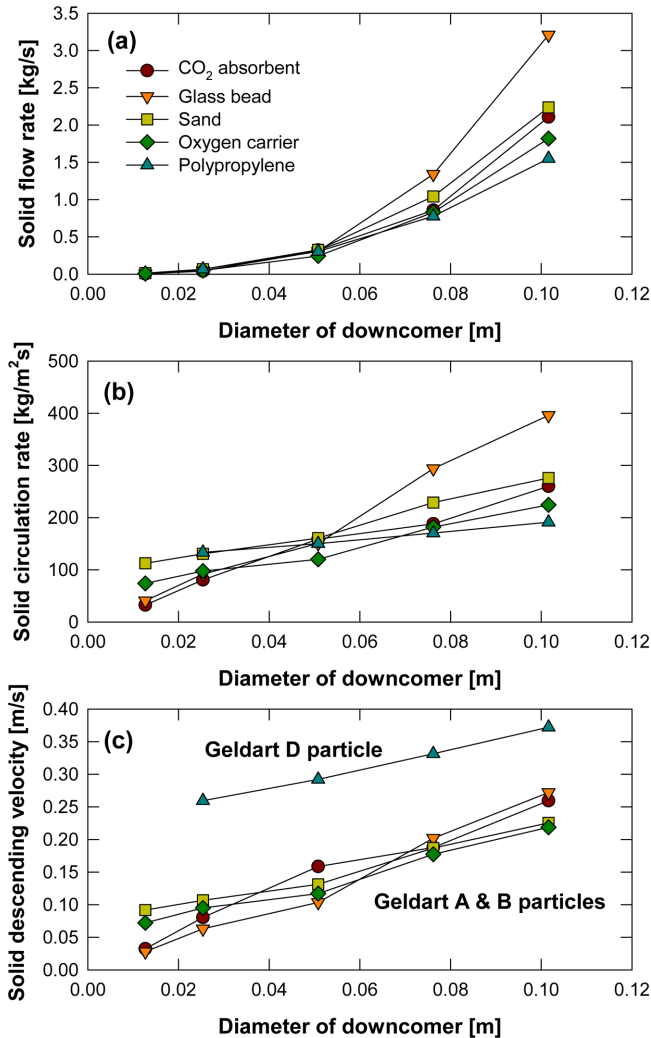


Fig. 5. Effect of downcomer diameter on (a) solid flow rate, (b) solid circulation rate, and (c) solid descending velocity.

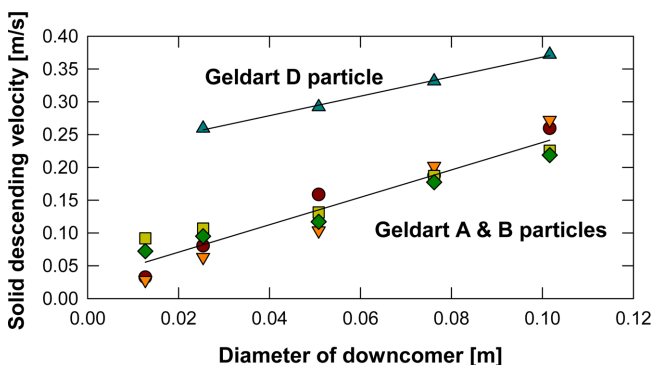


Fig. 6. Comparison between measured and calculated solid descending velocities (symbols : measured values, lines : calculated values by equation (4) and (5)).

타내었다. 본 연구에서는 고체하강속도와 하강관 직경의 관계를 수식화하기 위해 실험결과를 바탕으로 다음의 식 (4) 및 (5)와 같이 상관식을 도출하였으며 측정값과 계산값을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림과 같이 식 (4)와 (5)에 의해 예측된 값은 측정값과 유사한 값을 나타내었다.

$$\text{For Geldart group A and B particles: } V_s = 0.02896 + 2.091 D_t \quad (r^2 = 0.918) \quad (4)$$

$$\text{For Geldart group D particle: } V_s = 0.2195 + 1.485 D_t \quad (r^2 = 0.998) \quad (5)$$

4. 결 론

유동층 공정에서 사용되는 고체하강관의 적절한 직경 선정을 위해 수직관에서 고체하강속도를 측정할 수 있는 편리한 실험방법을 제시하였고 Geldart 분류 A, B, D 입자를 사용하여 수직관의 직경 및 입자특성 변화에 따른 고체하강속도를 측정 및 해석하였다. 초기 입자 장입량 변화에 따른 고체하강속도의 변화는 크게 나타나지 않았으며 고체하강관 직경이 증가함에 따라 고체하강속도, 고체순환속도 및 고체하강속도가 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 입자의 벌크밀도와 고체하강관의 직경이 고려된 고체하강속도의 경우 모든 입자에 대해 고체하강관의 직경이 증가함에 따라 고체하강속도가 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, Geldart 분류 A 및 B 입자와 Geldart 분류 D 입자의 결과가 확실하게 구별되는 경향을 나타내었다. 측정된 고체하강속도를 바탕으로 Geldart 분류 A 및 B 입자계와 D 입자계에 대한 고체하강속도 상관식을 각각 제시하였으며 측정값과 유사한 값을 예측할 수 있었다.

감 사

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(2011201020004B).

사용기호

- A : crosssectional area of standpipe or downcomer [m^2]
- D_1 : one side diameter of cylindrical polypropylene particle [μm]
- D_2 : another side diameter of cylindrical polypropylene particle [μm]
- D_t : diameter of standpipe or downcomer [m]
- G_s : solid circulation rate [$\text{kg/m}^2\text{s}$]
- H : height of cylindrical polypropylene particle [μm]
- t : time [s]
- V_s : solid descending velocity [m/s]
- W_0 : initial solid inventory [kg]
- W_s : solid flow rate [kg/s]

그리스 문자

- ρ_b : bulk density of solid [kg/m^3]

참고문헌

- Knowlton, T. M., Proceedings of the 6th International Conference on Fluidized Bed Combustion, Atlanta, Georgia(1980).
- Kunii, D. and Levenspiel, O., *Fluidization Engineering*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, MA(1991).
- Kim, K. C., Kim, K. Y., Park, Y. C., Jo, S. H., Ryu, H. J. and Yi, C. K., "Study of Hydrodynamics and Reaction Characteristics of K-based Solid Sorbents for CO_2 Capture in a Continuous System Composed of Two Bubbling Fluidized-bed Reactors,"

- Korean Chem. Eng. Res.(HWAHAK KONGHAK)*, **48**(4), 499-505(2010).
4. Ryu, H. J., Jin G. T., Lim, N. Y. and Bae, S. Y., "Reaction Characteristics of Five Kinds of Oxygen Carrier Particles for Chemical-looping Combustion," *Trans. Korean Hydrogen Energy Society*, **14**(1), 24-34(2003).
 5. Ryu, H. J. and Jin, G. T., "Reactivity and Attrition Resistance of Three Oxygen Carrier Particles for Chemical-looping Combustor," *Trans. Korean Hydrogen Energy Society*, **15**(3), 208-209 (2004).
 6. Geldart, D., *Gas Fluidization Technology*, 1st ed., John Wiley & Sons Ltd., Chichester(1986).
 7. Kunii, D. and Levenspiel, O., *Fluidization Engineering*, 1st ed., John Wiley and Sons Inc., New York, NY(1969).