

원추형 분립유동층에서 미세 분체의 수력학적 특성

이동현, 신문권, 김은미, 손승용, 박병섭, 한귀영, 윤기춘

Hydrodynamic Characteristics of Fine Powders in the Conical Powder-Particle Fluidized Beds

Dong Hyun Lee, Moon Kwon Shin, Eun Mi Kim, Seong Yong Son, Byung Sub Park, Gui Young Han, Ki June Yoon

Key words : Conical Fluidized Beds(원추형유동층), Minimum Fluidization Velocity(최소유동화속도), Carbon Black(카본블랙), Alumina(알루미나), Elutriation Rate(유출속도)

Abstract : The conical fluidizing system of a binary mixture of Geldart C powders and Geldart A particles was defined as the conical powder-particle fluidized bed. We used a cold conical powder-particle fluidized bed model having a 0.104 m-I.D. and 0.6 m-high with an apex angle of 10° for fluidization of a binary powder-particle mixture of 50 vol % fine carbon black powders (HI-900L, Korea Carbon Black Co.) and coarse alumina particles (90 μm) under different superficial gas velocities (0-0.1 m/s). The differential bed pressure drop increases with increasing gas velocity, and it goes from zero to a maximum value with increasing or decreasing gas velocity. In the conical fluidized beds of fine powders, demarcation velocities of the partial fluidization, full fluidization, partial defluidization was not observed.

Nomenclature

U_g : superficial gas velocity, cm/s
 $-\Delta P$: pressure drop, Pa
 z : axial bed height, cm
 Ar : Archimedes number, -
 H_B : bed height, cm
 a : slope of linear equation, -
 y_0 : intercept of linear equation, -
 d_p : particle diameter, μm
 m_p : particle inventory, g
 ρ_b : bulk density, g/cm³

subscript

B : bed
g : gas
p : particle
mf : minimum fluidization
f : fluidized state

1. 서론

현재 인간이 이용할 수 있는 에너지원으로서 그 역할을 충실히 이행해오고 있는 화석연료는 그 사용량이 계속해서 증가하고 있지만, 화석연료의 한정된 매장량과 그 사용결과 발생하는 CO₂ 가스에 의한 온실현상, 산성비, 오존층의 파괴 등은 심각한 환경오염 등의 문제점을 야기 시키고 있다. 그러므로 화석연료를 대신할 수 있는 환경 친화적인 대체 에너지 자원에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

수소에너지는 현재 인류가 직면하고 있는 환경 문제 및 에너지 문제를 해결할 수 있는 궁극적인 미래의 대체에너지로서 인식되고 있다.

그렇지만 자연계에 H₂형태로 존재하는 수소의

1) 성균관대학교, 화학공학과
E-mail : dhlee@skku.edu
Tel : (031)290-7340 Fax : (031)290-7272

양은 매우 적어서 직접적인 채취를 통한 이용은 불가능하다. 수소는 직접채굴을 통해 에너지원으로 사용하는 것이 아니라, 화합물 형태로 존재하는 수소를 여러 방법들을 이용하여 분리해 낸 이후, 에너지로 이용해야 하는 2차적인 에너지 자원이다. 그런 이유로, 에너지원으로서 수소를 이용하기 위해서는, 수소에너지의 다양한 응용 및 활용에 대한 연구와 더불어 수소를 얻기 위한 방법에 대한 연구가 필연적으로 수반되어야 한다. 현재 사용 및 연구되고 있는 수소 생산방법에는 수증기 개질(stream reforming), 열화학 사이클 기술, 물의 전기분해 등을 열거할 수 있다. 그러나 이러한 방법들은 공정 중 발생하는 CO₂ 가스의 제거를 위한 공정과 고온의 열원이 필요하며, 고온 상태에서는 수소분해가 이루어지는 등 여러 가지 문제점을 지니고 있다. 이러한 점으로 볼 때, 현재 활발한 연구가 진행되고 있는 천연가스 열분해법은 CO₂가스의 발생 없이 고 순도의 수소를 생산할 수 있는 환경친화적인 방법이다. 동시에 이 기술은 반응부산물로서 여러 분야에 이용되는 고 순도의 카본블랙(carbon black)을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 상온유동층에서 탄화수소의 촉매분해에 사용되는 카본블랙촉매의 유동특성을 해석하여 유동층을 이용한 연속반응기의 설계가능성을 검토하고자 한다. 본 연구에 사용되는 탄화수소로는 액화천연가스(LNG)의 주성분인 메탄(CH₄)과 액화석유가스(LPG)의 주성분인 프로판과 부탄등이 사용될 수 있다. 메탄, 프로판 및 부탄 모두 카본블랙을 촉매로 사용하여 카본블랙과 수소가 product로 얻어진다. 그러므로 반응과정에서 생성된 카본블랙과 수소는 고체와 기체상태로 얻어지므로 기-고 분리를 이용하여 각각 분리할 수 있으며, 반응기에 생성되는 카본블랙을 연속적으로 제거하여 주는 것이 필요하다. 또한 카본블랙은 primary 입자의 크기가 15에서 58 nm로 매우 미세한 Geldart group C 입자이다. Geldart group C 입자들은 입자들의 크기가 매우 작아서 입자간의 응집현상이 일어나고 균일한 유동화현상이 얻어지지 못한다. 그러므로 Geldart group C 입자인 카본블랙은 균일하게 유동화시키기 위하여 Geldart group A 입자들과 혼합하여 유동특성을 개선하는 실험을 실시하였다. 카본블랙과 Group A 입자인 알루미늄(90 μm)를 각각 단일입자들의 유동특성을 측정된 후 두 입자를 혼합하여 유동특성을 관찰하였다. 또한 탄화수소가 분해한 후 생성되는 카본블랙을 연속적으로 제거하기 위한 카본블랙의 elutriation 실험도 실시하였다.

2. 실험

상온유동층에서 카본블랙의 유동특성을 고찰하기 위하여 실험장치의 직경은 0.1 m이고 높이가 0.6 m 인 투명 아크릴 관으로 제작되었으며, 원추각은 10° 인 원추형 기-고유동층에서 실험이 수행되었다. 원추형 유동층의 개략도를 그림1에 나타내었으며, 원추형과 원통형 기고유동층의 사진을 그림2에 나타내었다. 모든 실험은 상온, 상압에서 실시되었다. 기체유속은 오리피스타입의 유량계 (FLT, Korea Flow Cell Co.)를 이용하였으며 기체유속의 범위는 0 ~ 0.1 m/s이다. 본 실험에 사용된 고체입자는 카본블랙(Korea Carbon Black Co., HI-900L)을 포함하여 알루미늄(F-150, F-220)와 PVC 입자를 사용하였으며 표1에 사용된 입자들의 물리적 특성을 나타내었다.

원추형 기고유동층에 투입된 층 물질의 압력강하를 측정하기 위하여 11개의 압력tap이 층의 중심축을 기준으로 설치되었다. 한 압력 tap은 분배기위의 인접지역에 설치하였으며, 다른 압력 tap은 분배기위의 5 cm부터 10cm간격으로 설치된 위치로부터 차압을 측정하였다. 압력 tap은 400 mesh 를 설치하여 층내 입자들이 leak되는 것을 방지하였다. 압력변환기의 신호는 초당 1개의 data를 180초 동안 컴퓨터로 저장한 후 통계 처리하여 평균값을 사용하였다. 모든 실험은 완전 유동화 상태에서 기체유속을 감소시키면서 완전 고정층에 도달할 때까지 수행한 후 그 다음에 고정층 상태에서부터 기체유속을 증가시켜 완전유동화상태까지 변화시키면서 실험을 실시하였다. 기체의 유속은 일전 크기만큼 증가시키거나 감소시키면서 실험을 수행하였다.

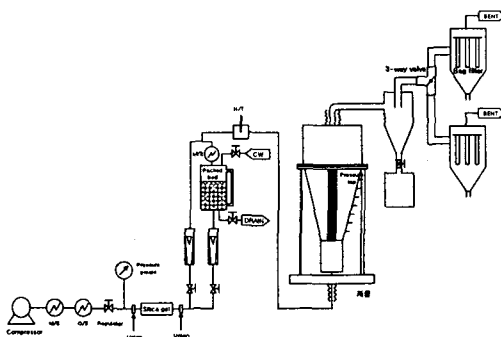


Fig. 1 원추형 유동층에 관한 개략도

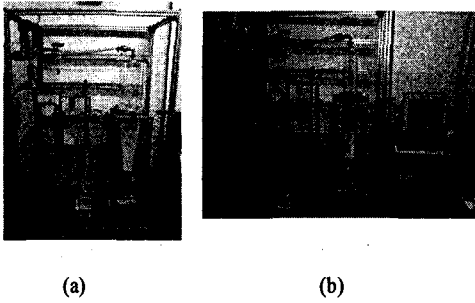


Fig. 2 원추형 (a) 과 원통형 (b) 유동층에 관한 사진

표1 사용된 입자들의 물리적 특성값

Item	Unit	Alumina		PVC	C/B HI-900L
		F-220	F-150		
d_p	μm	52.94	89.59	171.1	15 nm
ρ_p	kg/m^3	3,980	3,980	1,400	2,200
ρ_b	kg/m^3	1,529	1,834	582.1	220

3. 결과 및 고찰

그림3은 원추형 유동층의 축방향에 따른 층내 압력강하 ($-\Delta P$)를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 기체유속은 6.59 cm/s 이므로 최소유동화속도 이상이고, 층내 입자들에 의한 압력강하는 층높이까지 일정한 기울기로 증가하다가 층표면보다 높은 위치에서는 압력강하가 일정함을 알 수 있다. 층표면보다 높은 위치에서는 압력강하가 일정한 이유는 고체입자의 중력이 더 이상 작용하지 않기 때문이다.

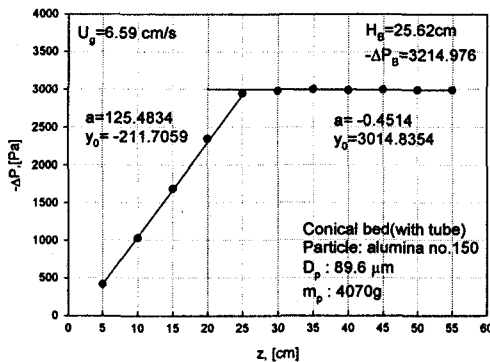


Fig. 3 원추형 유동층에서 축방향에 따른 층내 압력강하의 변화.

그러므로 축방향으로 기울기가 일정한 직선과 층내 압력강하가 일정한 두 직선의 교점이 층높이 (H_b)임을 알 수 있다. 또한 층입자들에 의한 압력구배를 계산한 후 측정된 층높이를 곱해주면 그 유속에서의 층전체의 압력강하를 계산할 수 있다.

그림4는 각각의 일정유속에서 측정된 층전체의 압력강하 ($-\Delta P_b$)를 기체유속으로 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 유속이 증가함에 따라 층전체의 압력강하가 증가하다가 일정해진다. 기체유속이 증가함에 따라 $-\Delta P_b$ 가 증가하는 것은 고정층에서 제시된 Ergun equation으로 알 수 있다. 최소유동화 속도 이상에서는 기체유속이 증가하여도 $-\Delta P_b$ 값이 증가하지 않는데 이는 유동화 상태에서는 고체입자의 무게를 단위면적으로 나눈 값과 같다. 그림4에서 각 입자들의 정지층높이는 20 cm인대 층전체의 압력강하가 최소유동화 속도 이상에서 다른 이유는 표1에서 보는 바와 같이 각 입자들의 겉보기 밀도가 다르기 때문이다. 또한, 고정층에서의 유속에 따른 층전체의 압력강하에 대한 기울기는 대략 1.0 정도 됨을 알 수 있다. 이러한 이유는 Ergun 식에서 입자의 크기가 작고 밀도가 낮은 즉, 입자에 대한 Reynolds 수 ($Re_{p,m}$)가 20이하인 경우에는 기체유속의 1승에 비례한다는 연구결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 표2는 본 연구에서 측정된 각 입자들의 최소유동화 속도의 측정값과 계산값을 비교하였다. 최소유동화 속도의 계산값은 Wen 과 Yu⁽¹⁾가 제시한 식을 사용하였다. 표2에서 보는 바와 같이 각 입자들에 대한 실험값과 계산값이 오차범위에서 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 각 입자들에 대한 종말속도의 계산값을 표2에 함께 나타내었다.

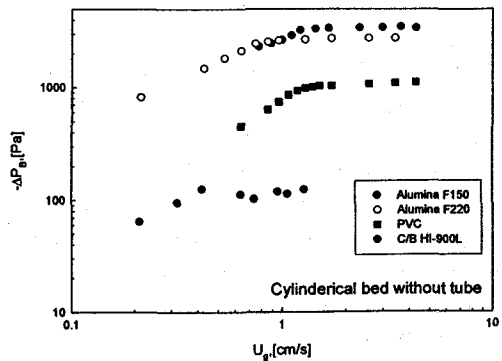


Fig. 4. 기체유속에 따른 층전체의 압력강하 ($-\Delta P_b$)의 변화

표2. 사용된 입자들의 최소유동화 속도의 측정값과 계산값의 비교

Item	Unit	Alumina		PVC	C/B HI-900L
		F-220	F-150		
d_p	μm	52.94	89.59	171.1	15 nm
ρ_t	kg/m^3	3,980	3,980	1,400	-
ρ_b	kg/m^3	1,529	1,834	582.1	220
Ar	-	21.43	103.9	-	-
$U_{mf,exp}$	cm/s	0.855	1.436	1.282	0.41
$U_{mf,cal}$	cm/s	0.867	1.052	-	-
U_t,cal	cm/s	19.0	47.3	-	-

그림5는 excess gas velocity ($U_g - U_{mf}$) 에 따른 층높이의 변화를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 각 입자들의 정지층 높이는 20 cm.이다. Excess gas velocity의 물리적 의미는 유동층에서 기포가 형성될 수 있는 유속을 의미한다. 즉 최소유동화 속도까지는 고정층의 층 공극사이로 기체가 흐를 수 있으므로 최소유동화 유속이하에서는 기포가 형성되지 않는다. 기포가 형성될 수 있는 excess gas velocity가 증가함에 따라 층팽창이 증가하는 이유는 excess gas velocity가 증가하면 고체입자에 가해지는 기체의 momentum이 증가되고, drag force가 증가하므로 층팽창이 커짐을 알 수 있다. 또한 같은 excess gas velocity에서 고체입자의 밀도와 입자의 크기가 작으면 층팽창이 커지는 이유도 입자에 가해지는 drag force와 관련이 있다. 입자의 밀도가 작으면 같은 excess gas velocity에서 더 큰 drag force를 나타내므로 더 큰 층팽창이 일어남을 알 수 있다.

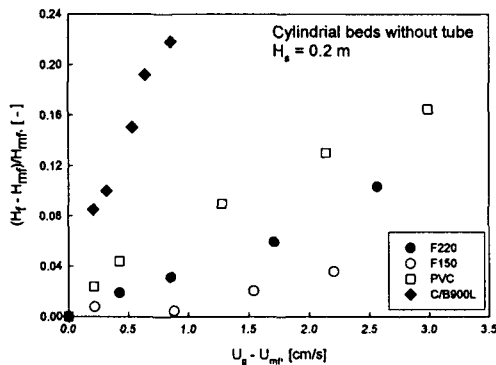


Fig. 5 Excess gas velocity ($U_g - U_{mf}$) 에 따른 층높이의 변화

그림6은 원추형 유동층에서 평균입경이 89.6 μm 인 알루미늄의 층전체의 압력강하를 기체유속의 변화에 대하여 측정된 결과를 나타내었다. 그림6의 실험은 먼저 기체유속을 최소유동화속도보다 큰 기체유속에서 기체유속을 일정간격으로 감소시키면서 고정층을 지나 기체유속이 zero 까지 감소시키면서 기체유속이 따른 층전체의 압력강하를 측정 한 후에 다시 기체유속이 zero에서 기체유속을 일정간격으로 이 증가시키면서 고정층을 지나 입자들이 자유롭게 유동화될 수 있는 최소유동화 속도 이상으로 변화시키면서 층전체의 압력강하를 측정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 기체유속의 감소시킨 경우와 증가시킨 경우의 층전체의 압력강하에 대한 차이가 발생하지 않았다. 그러나 최근에 원추형 유동층에서 Son 등⁽²⁾이 발표한 결과에 따르면 원추형 유동층에서 기체유속을 증가시키는 경우와 감소시키는 경우의 사이에 층전체의 압력강하에 대한 매우 심한 hysteresis가 발생한다고 발표하였다. 또한 Kwauk⁽³⁾이 발표한 문헌에서도 원추형 유동층에서의 hysteresis의 현상을 설명하였다. Son 등⁽²⁾이 사용한 입자의 크기는 본 실험에서 사용한 89.6 μm 보다 매우 큰 1.0 mm (1000 μm)인 유리구슬 (2,500 kg/m^3)을 사용하였다. 이러한 현상들은 향후 좀 더 많은 입자 크기와 밀도에 대한 실험결과와 현상설명이 필요하다.

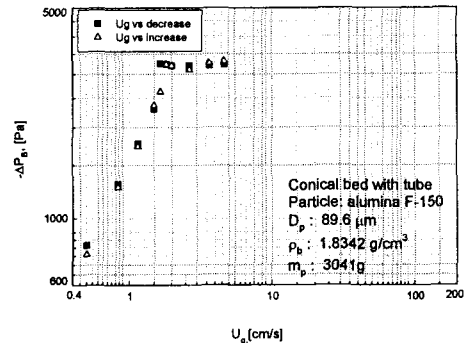


Fig. 6. 층압력강하 ($-\Delta P_B$) 와 기체유속과의 관계

References

- [1] Wen CY and Yu YH, AIChE J., 1966, 12, 610
- [2] Son, SY, Lee DH, Han GY, Kim DJ, Sim, SJ, Kim SD, "Effect of Air Distributor on the Fluidization Characteristics in Conical Gas Fluidized Beds," 2005, KICHe J., 22, 315-320
- [3] Kwauk, M, 1992, Fluidization, 100, Science Press