

대기압 이하에서 운전하는 유동층 반응기의 유동 특성

박성희†

우석대학교 에너지공학과
27841 충청북도 진천군 진천읍 대학로 66
(2020년 2월 10일 접수, 2020년 2월 18일 수정본 접수, 2020년 2월 21일 채택)

Fluidization Characteristics in Fluidized Bed Reactors Operated in Subatmospheric Pressure

Sounghee Park†

Department of Energy Engineering, Woosuk University, 66, Daehak-ro, Jincheon-eup, Jincheon-gun, Chungcheongbuk-do, 27841, Korea
(Received 10 February 2020; Received in revised form 18 February 2020; accepted 21 February 2020)

요 약

최근 대기압이하 진공 압력 상태에서 운전되는 유동층 반응기는 진공건조 공정이나 플라즈마 화학증착과 같이 감압 유동화가 요구되기에 관심이 증대되어 왔다. 그러나 대기압 이하에서 운전되는 유동층의 수력학적 특성 연구는 많이 연구되지 않았다. 본 연구에서는 대기압 이하에서 운전하는 유동층의 압력강하를 층내 압력을 1.33 에서 101.3kPa 까지 변화시키며 측정하였다. 유동층의 운전 압력이 진공인 상태에서는 최소유동화속도가 압력이 감소함에 따라 증가하며, 이는 기체 밀도와 평균 자유경로 변화와 같은 slip 흐름에 의한 변화이다. 또한 기존의 상압 상태에서 운전되는 유동층의 최소유동화속도 상관식과 비교함으로써 압력 감소에 따른 slip 흐름의 영향 뚜렷하게 나타남을 가리키는 임계 Knudsen 수를 결정하였다. 이로부터 slip 흐름이 주도하기 시작하는 임계 압력을 실험적으로 결정하였다.

Abstract – Fluidized bed reactors operated in subatmospheric pressure has been focused because several industrial applications such as vacuum drying and plasma cvd requires reduced pressure fluidization. However, the hydrodynamics of fluidized beds in subatmospheric pressure has not been extensively investigated. The pressure drop in the fluidized bed has been measured with variation of downstream pressures from 1.33 to 101.3 kPa in the shallow and deep fluidized beds under the sub-atmospheric pressures. The obtained minimum fluidization velocity of powders is a function of pressure due to the changes of gas density and mean free path. We can experimentally determine the critical Knudsen number and the critical pressure to define the slip regime significantly to influence the hydrodynamics of fluidized beds.

Key words: Fluidized Bed, Subatmospheric, Vacuum, Minimum Fluidization Velocity, Slip Flow

1. 서 론

다양한 산업에서 운전되고 있는 유동층 반응기들은 대부분 대기압 상태하에서 운전되거나 가압상태에서 운전되고 있다[1,2]. 그러나 입자상 물질의 표면 특성이 중요한 첨단 소재 산업과 특수 건조 상태등을 활용하는 제약 및 식품 산업등에서 진공 조건에서 유동층 반응기를 사용하고 있다[3,4]. 특히 최근에 고반응성 환경을 제공하는 기체의 플라즈마 상태하에서 소재 개발 및 화학 합성 공정이 많이 산업적으로 활용되고 있으며 연구되고 있다[4-8]. 또한 진공상태에

서 입자들과 플라즈마간의 접촉 향상을 활용하는 플라즈마 유동층 반응기 연구도 활발히 진행되고 있다[5-8]. 이러한 진공건조 장치나 플라즈마 반응기는 압력이 낮은 상태인 진공을 요구하고 있다. 따라서 이러한 진공상태에서 운전되는 유동층 반응기의 유동 특성 및 수력학적 특성의 이해가 중요하다. 유동층의 수력학적 현상에 압력의 영향에 대해 많은 연구자들의 발표가 있어왔다. 그러나 그들 중 대부분은 상압 및 가압 조건들에서의 유동화 특성에 대해서는 많은 문헌들에 광범위하게 연구되어왔다[1,2]. 그러나 감압된 상태 즉 진공 상태하에서 운전된 유동층에서의 수력학적 특성연구는 매우 미미한 상태이다[9-11].

압력이 감소함에 따라 기체 입자의 평균 자유경로가 증가하기 때문에 입자층 또는 관을 통과하는 기체의 흐름 현상은 뚜렷한 변화를 나타낼 수 있다. 압력에 따라 그 기체는 분자흐름 상태(molecular state), 점성 흐름 상태(viscous state), 또는 중간 흐름 상태(intermediate state)

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: drpark@woosuk.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

즉 slip 흐름 상태에 있을 수 있다[12]. 결과적으로 운전조건(압력, 관 직경)에 따라 다른 흐름 영역이 존재가 가능하다. 압력이 낮아짐에 따라 기체 흐름은 기체 분자들의 평균 자유경로가 증가함에 따라 층류 영역을 벗어난 흐름을 보일 수 있다. 이 상이한 흐름 영역들은 무차원 수인 Knudsen 수(Knudsen number, Kn)로 결정할 수 있다. 분체들의 평균 자유 경로와 특성길이(입자의 직경) 비이다. 평균 자유 경로는 식 (2)로 계산할 수 있다. 이때 k는 볼츠만 상수, T는 온도, ξ 는 기체분자의 직경 그리고 P는 기체 압력이다[4,12].

$$Kn = \frac{\lambda}{D} = \frac{\lambda}{dp} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\xi^2P} \quad (2)$$

기체는 기체 흐름이 $Kn \gg 1$ 경우에 분자 상태, 희박상태 또는 Knudsen 흐름에 있다고 한다. 기체 입자 충돌들은 서로 간 충돌보다 반응기 벽과의 충돌이 대부분이며 이러한 상태에서는 기체의 점성이 무시될 만하다. 따라서 유동층의 흐름은 이 조건들 하에서는 얻어질 수 없다. Slip 흐름 영역은 기체 분자들의 평균 자유경로가 특성길이에 비교할만한 경우에($Kn \approx 1$) 도달한다. 이 상태의 기체 흐름은 분자 운동 현상과 점성도에 따라 규정할 수 있다. 층류($Kn < 1$) 경우에는 특성 길이가 평균 자유경로보다 충분히 큰 경우로 기체의 흐름은 점성에 지배받으며 Hagen-Poiseuille 법칙이 적용된다.

Kusakabe 등[13]은 기체의 압축 성질과 Knudsen 흐름 현상에 기초해서 레이놀즈 수가 20이하인 경우에 한하여 관성 영향을 제거한 대기압시 최소유동화속도를 도입한 미세입자들의 최소유동화속도 상관식을 제안하였다.

$$(U_{mf}P) = U_{mfv}P_0 \left[1 + \frac{k_2(1-\epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}} \times \sqrt{\frac{2RT}{\pi m} \frac{\eta}{(\phi d_p)P_0}} \right] \quad (3)$$

$$U_{mfv} = \frac{d_p^2 g(\rho_s - \rho_g)}{1650\eta} \quad (4)$$

여기서, U_{mfv} 는 대기압에서의 최소유동화속도이다.

광범위한 응용을 갖는 즉, 진공에서 고압 범주에 까지 적용할 수 있는 최소유동화속도를 계산할 수 있도록 Llop 등[14]은 Knudsen 흐름에서 난류 흐름 영역을 포함하는 압력강하에 관한 일반식을 제안하였다.

$$1.75C_1(Re_{mf})^2 + Z(Re_{mf}) - Ar = 0 \quad (5)$$

$$Z = \frac{1}{\frac{Kn}{K_2C_3} + \frac{1}{K_1C_2}} \quad (6)$$

Zarekar *et al.*[15]은 수정한 평균자유 경로와 무차원 수 Ar 수를 함수로 하는 최소유동화 레이놀즈 수에 관한 상관식을 제안하였다.

$$Re_{mf} = -\frac{25.7}{\phi(1+8.8Kn)} + \sqrt{\left(\frac{25.7}{\phi(1+8.8Kn)}\right)^2 + 0.0365\phi Ar} \quad (7)$$

대기압이하에서 운전하는 유동층은 기존 상압 및 가압 유동층의 흐름 패턴들과는 다른 형태를 따르는 것으로 알려졌다[13,16]. 유동층내 수력학적 특성이 난류흐름이나 층류흐름 같은 점성 흐름이기 보다는 slip 흐름으로 대체된다. 이러한 감압 상태 조건들에서 최소 유동화속도 계산을 위한 식들은 더 이상 적용되지 못한다. 따라서 감압조건에 맞는 최소 유동화 속도 계산을 할 수 있는 식이 필요하다. 그러나 지금까지 유동층 반응기의 최소 유동화 속도에 관한 연구들은 대기압 상태 또는 가압 상태의 유동 현상에 대한 연구들을 주로 시행해 오고 있어 진공 또는 대기압 이하에서 운전되는 감압 상태의 유동 현상과 최소유동화 속도에 관한 연구는 매우 미미한 상태이다[13-15]. 따라서 본 연구에서는 대기압 이하 즉 진공상태에서 운전하는 유동층 반응기의 압력강하 측정 실험 등을 통하여 감압상태에서의 유동 특성 등을 조사한다. 그리고 이러한 유동층 반응기의 수력학적 연구의 기초 데이터를 확보하며 대기압이하의 감압상태에서 운전되는 유동층의 최소유동화 속도를 결정하고, 압력 감소에 따른 slip 흐름의 영향을 조사 연구하고자 한다.

2. 실험

Fig. 1은 압력을 진공 펌프를 통해 감압시킨 조건하에서 운전하는 유동층의 최소 유동화속도 및 수력학적 특성을 측정하기 위해 사용된 장치의 개략도를 나타내고 있다. 유동층은 내경 33.6 mm, 높이 0.8 m의 Pyrex 유리관을 사용하였다. 사용된 입자들과 기체의 물리적 특성치들과 실험 조건들을 Table 1에 나타내었다.

기체 유량은 질량흐름조절기(MFC: mass flow controller)를 통해 조절 및 측정하였다. 주탑과 공기박스 사이에 놓인 기체 분배기 위에 입자들을 충전하였다. 부분 유동화 현상에 고정층 높이의 영향을 조사하기 위해 고정층 높이를 40에서 400 mm까지 변화시키며 실험하였다. 층 내 압력은 진공펌프에 의해 감압되고 유지시켰다. 비산되는 입자들은 입자 트랩과 필터를 활용하여 붙잡았다. 유동층의 축방향 압력분포를 측정하기 위해 분산판 하부와 분산판으

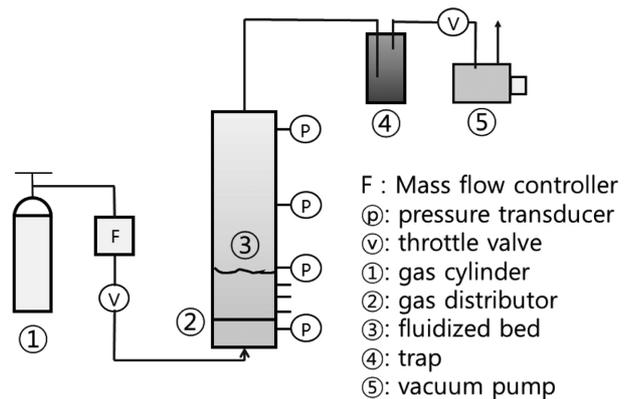


Fig. 1. Schematic diagram of the apparatus for fluidization in sub-atmospheric pressure.

Table 1. Experimental ranges of fluidization characteristics under subatmospheric pressures

Particle	Size [μ m]	Density [kg/m^3]	ϕ [-]	ϵ_{mf} [-]	Pressure [kPa]
Glass bead	400	2500	1	0.41	0.67, 1.33, 2.0, 2.67, 4.67, 101.3
HDPE	338	960	0.8	0.55	0.4, 0.67, 1.33, 2.0, 2.67, 101.3
PVC	120	1300	0.9	0.6	0.67, 1.33, 2.0, 2.67, 101.3

Gas : Nitrogen (purity, 99.999%)

로부터 높이에 따라 압력점을 두고 압력측정기(Convectron Gauge: Granville-Phillips Co.)와 연결하였다. 압력강하 실험과 최소유동화 속도 결정을 위해 충전시킨 고정층에서부터 유속을 높여가며 분산판을 통한 압력강하와 층의 압력강하를 측방향으로 설치된 압력측정기를 통해 측정하였다. 그리고 유동화 부분과 프리보드 부분간의 계면의 높이와 유동화 부분과 고정층간의 계면의 높이를 분산판 위치로부터 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

미세입자들(Glass bead, HDPE)로 충전된 층의 압력을 감압시킴으로써 진공상태를 유지하며 운전할 때 공급하는 기체의 유속 변화에 따른 층내 압력강하 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 이때 압력은 101.3 kPa에서 1.33 kPa까지 변화시켰으며, 고정층의 입자 충전량은 반응기 직경 대비(L/Dc=1.2) 1.2와 12로 충전하여 얇은 유동층과 깊은 유동층 형태를 실험하였다.

그림에서 보듯이 미세입자 입자층은 감압상태에서 충분히 유동화가 되었다. 기존의 상압 및 가압 상태의 유동층 반응기의 층내 압력강하 변화 실험들과 유사하게 감압상태에서도 기체유속에 따라 층간 압력강하가 비례적으로 증가하다가 임의 기체 유속에 도달하면 층의 압력강하가 일정한 값을 나타내는 상압 유동층 경우와 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 기존의 방법들과 마찬가지로 이들 압력강하 변화를 나타내는 고정층 범주와 유동화 상태 범주의 압력강하 변화 직선들의 교점으로부터 최소유동화 속도를 결정하였다.

고정층 높이를 직경대비 12배에 이르는 깊은 층으로 충전한 후 기체 유속을 증가시키며 최소 유동화 과정을 관찰한 것을 Fig. 3에 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 기체 유속에 따라 상층부는 유동화가 시작됨 반면에 하층부위는 아직 고정층 상태로 있다가 기체 유속을 지속적으로 높여줌으로써 그 고정층의 경계부가 낮아지는 현상 즉 부분 유동화 현상을 관찰할 수 있었다.

Deep bed에서 기체 유속 변화에 따른 압력강하 양태가 shallow bed와는 다른 모습을 보이고 있다. shallow bed경우는 기체 유속의 변화에 따른 압력강하의 변화 모습이 최소유동화 속도 근처에서 급격히 변화하여 그림에서 보듯 압력강하와 기체유속 그림에서 두 직선의 교점이 명확히 설정될 수 있다. 그러나 deep bed경우에는 교

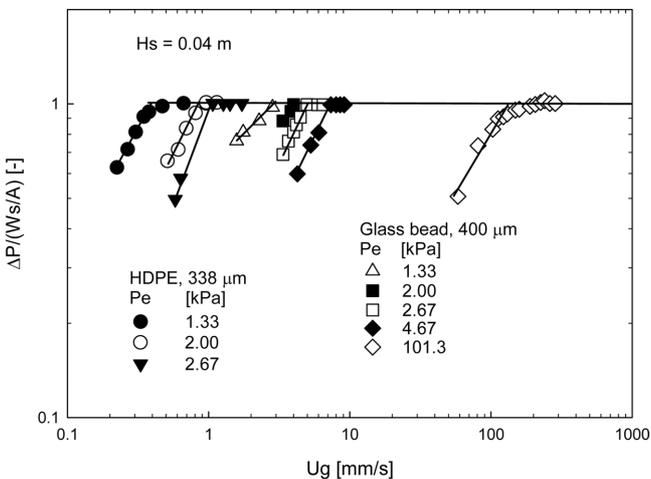


Fig. 2. Pressure drop through shallow beds of glass bead and HDPE in fluidized bed reactors in subatmospheric pressures.

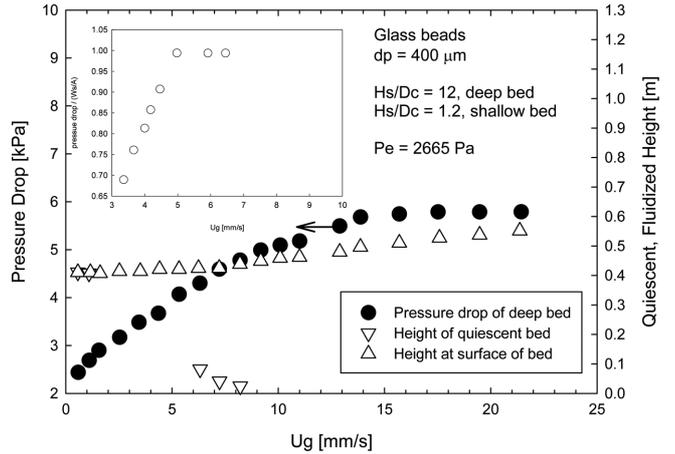


Fig. 3. The pressure drop data of glass bead in a deep bed in subatmospheric pressure.

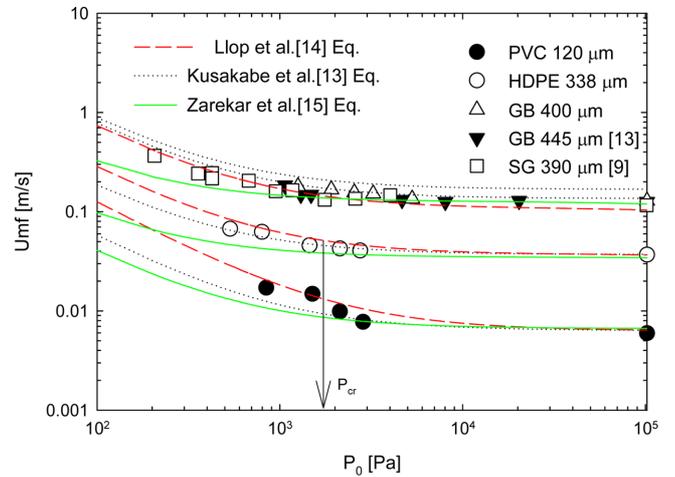


Fig. 4. A comparison of measured and calculated minimum fluidization velocity in subatmospheric pressures.

점이 잘 구분되기 어렵다. 마치 상압조건하에서 다중 직경을 갖는 입자들의 유동 특성과 유사하게 하층부는 고정층으로 잠잠하고 상층부위는 유동하는 부분 유동화 현상이다[10,13]. 이는 층 압력강하와 절대압력이 같은 크기의 자리 수에 있을 때 존재함을 보였다[17]. 이는 기체 흐름이 점성류에서 분자흐름 형태 즉 Knudsen 흐름 방향으로 이동함으로써 저항 감소로 인한 축 방향에 따라 속도 기울기가 증가함에 의한 것으로 사료된다.

Fig. 4는 대기압 이하에서 운전하는 유동층 내 압력을 감압시킴에 따른 최소 유동화속도의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 압력이 감소시킴에 따라 대기압으로부터 일정부분 압력 감소 변화 동안 최소유동화 속도는 큰 변화를 보여주지 않다가 일정 압력 이하에서부터 변화가 명확하게 구분될 수 있음을 알 수 있다. 이로서 점성흐름이 지배하는 영역과 slip 흐름 영역이 뚜렷해지는 영역의 경계가 존재할 수 있음을 추정해 볼 수 있다. 그리고 전체적으로는 압력 감소에 따라 최소유동화 속도는 증가함을 알 수 있다. 압력이 감소함에 따라 분자들의 평균 자유경로의 증가로 유동층 내 흐르는 기체의 거동이 크게 변한다. 분자들의 평균 자유경로의 증가는 기체의 밀도 감소를 야기한다. 운전 압력 조건에 따라 분자흐름, slip 흐름 또는 점성 흐름이 발생할 수 있는데 유동층내 흐름 영

역은 Knudsen 수의 함수로 규정할 수 있다. 분자흐름은 $Kn \gg 1$, 점성 흐름은 $Kn \ll 1$ 경우이고 slip 흐름은 이 두 흐름 영역의 사이이다. 결국 운전 압력이 감소함으로 최소유동화 속도는 기체의 밀도가 감소하고 기체의 평균자유 경로의 증가등 slip 흐름 현상이 발생함에 따른 것으로 사료된다[13,14].

그림에서 보는 바와 같이 몇몇 연구자들이 제안한 최소유동화 속도의 상관식들로부터 얻은 최소유동화 속도도 함께 선들로 나타내었다. 각 상관식들에 의해 예측된 값에 약간의 차이가 있으며 특별히 일정압력이하에서 증가하는 쪽에 차이가 있음도 발견할 수 있다. 그러나 전체적으로는 실험값들과 같이 압력이 감소함에 따라 최소유동화 속도가 증가함을 알 수가 있다. 각 상관식들의 결과들도 전체적으로는 유동층내 압력이 감소함에 따라 일정부분 큰 변화가 없다가 압력이 감소함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 그림에서 보듯이 최소유동화 속도의 변화에 있어 slip 흐름의 영향을 따르는 지점이 있는 것으로 예측할 수 있다. 이러한 지점을 정량적으로 표현하기 위해 임계 Knudsen 수(critical Knudsen number, Kn_{cr})[15]를 제안하였다. 임계 Knudsen 수는 slip 흐름 항이 최소유동화 레이놀즈 수(minimum fluidization Reynolds number)에 명확하게 영향을 미치는 경우를 나타내는 수로 삼았다. 이때 임계 Knudsen 수를 구하기 위해 slip과 점성 흐름 영역을 모두 고려한 최소유동화 레이놀즈 수 상관식과 오직 점성 흐름 영역만을 나타내는, 즉, $Kn=0$ 인 최소유동화 레이놀즈 상관식을 식 (8)처럼 비교하였다. 이때 점성 흐름 영역만을 나타내는 상관식으로는 기존의 상압 유동층에서 일반적으로 활용되고 있는 Richardson[1]의 최소유동화 레이놀즈 상관식을 선택하였다.

$$\zeta = \frac{Re_{mf}(Ar, Kn)}{Re_{mf}(Ar, Kn=0)} \quad (8)$$

$$Re_{mf0} = -25.7 + \sqrt{25.7^2 + 0.03665Ar} \quad (9)$$

실질적인 목적으로 공업적 계산에서 대개 실제값과 10% 또는 20%의 편차는 대개 허용되기 때문에 이 비교값 $\zeta=1.1$ 또는 $\zeta=1.2$ 값으로부터 임계 Knudsen 수를 얻을 수 있다.

Fig. 5는 실험에 의해 얻은 최소유동화 속도로부터 계산된 레이놀즈 수와 그들의 비를 함께 나타내었다. 최소유동화 레이놀즈 수의 비, ζ 이 Knudsen 수에 따른 변화를 나타낸 것으로 이 비율은 Knudsen 수에 따라 비례관계를 보이고 있다. 이는 압력이 감소함에 따라 최소유동화 레이놀즈 수가 대기압조건하에서의 레이놀즈 수에 비해 비례적으로 증가함을 의미한다. 이는 압력이 감소함에 따라 기체 성질의 변화 즉 밀도 감소와 기체의 평균자유행로의 증가로 인한 점성적 흐름보다는 slip 흐름이 형성됨에 의한 것으로 사료된다[14,15]. 또한, ζ 비율값이 1.1인 경우를 임계 Knudsen 수를 결정

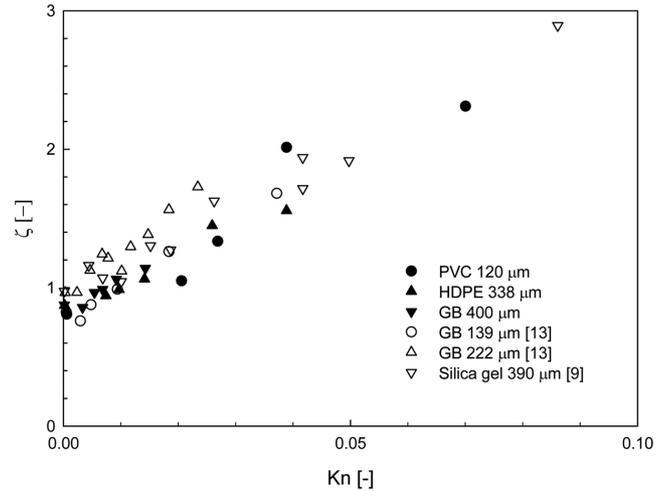


Fig. 5. The ratio of minimum fluidization Reynolds number obtained from experiments to minimum fluidization Reynolds number calculated by Richardson correlation.

하는 비율로 선택하여 얻은 임계 Knudsen 수와 그로부터 얻은 임계 압력들을 각각의 조건에 따라 결정할 수 있었다.

Table 2에 대기압 이하에서 운전한 유동층의 최소유동화 실험 데이터로부터 결정된 최소유동화 속도로 각 입자의 최소유동화 레이놀즈 수를 계산하고, 대기압 조건에서의 최소유동화 레이놀즈 수를 Richardson 상관식으로 결정하였다. 그 다음 이 두 레이놀즈 수의 비의 압력 변화(Knudsen 수 변화)에 따라 선형적 변화를 보임으로 선형회귀분석을 통해 ζ 비 값이 1.1에 해당하는 임계 Knudsen 수를 결정하였다. 그리고 Llop 등[14]와 Zarekar 등[15]이 제시한 상관식들을 기반으로 얻은 ζ 비 값들로부터 임계 Knudsen 수를 결정하고 이로부터 계산된 임계 압력들을 Table 2에 나타내었다. Llop 등의 상관식 기반의 $Kn_{cr}=0.0042$, Zarekar 등의 상관식 기반의 $Kn_{cr}=0.0113$ 과 각 입자들에 대한 최소유동화 실험 데이터의 임계 Knudsen 수를 구할 수 있었고($Kn_{cr}=0.0052$) 이 수로부터 실험에 의한 임계 압력값을 구하였다. Fig. 5와 Table 2에서 보듯 최소유동화 레이놀즈 수를 예측하는 Llop 등들의 식에 의해 계산된 비율 값들이 Zarekar 등의 식에 의한 ζ 비율 값들보다 상대적으로 실험 결과와 좋은 일치를 보여주고 있다. 이는 앞서 최소유동화 속도와 압력간의 그림에서 Llop등의 최소유동화속도 예측 경향과도 일치한다.

Fig. 6은 압력 변화에 따른 층 내 통과유량(U_{mf} , P)의 변화를 나타낸 것이다. 점선은 대기압 조건하에서 Richardson 식에 근거하여 계산한 상압조건에서의 최소유동화속도에 기반하여 나타낸 통과유량, (U_{mf} , P)를 나타낸 것이다. 압력 감소에 따라 단순 비례관계를 보인

Table 2. Values of critical pressure obtained from correlations of Llop et al.[14] and Zarekar et al. [15] and experimental data at 10% influence of slip flow on minimum fluidization velocity

	Pcr [Pa]		
	From experiment	From correlation of zarekar et al.	From correlation of Llop et al.
PVC, 120 μ m	11201	4853	13868
HDPE, 338 μ m	3981	1726	4931
Glass bead, 400 μ m	3360	1456	4160
Glass bead, 139 μ m [13]	9670	4190	11972
Glass bead, 222 μ m [13]	6054	2624	7496
Silica Gel, 390 μ m [9]	3447	1493	4267

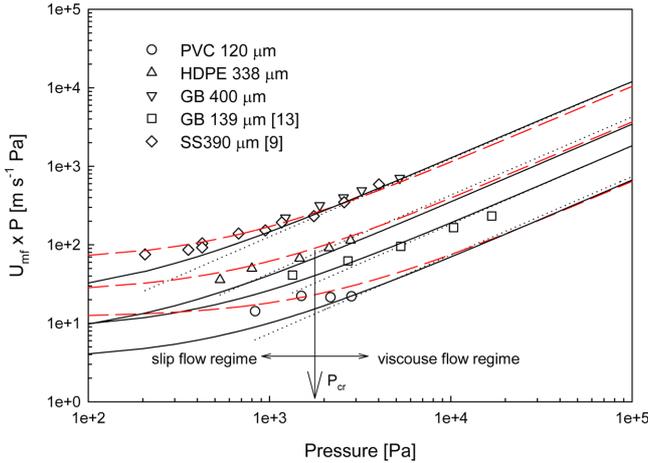


Fig. 6. Relationship between ($U_{mf} P$) versus pressure for the particles. Solid line: from correlation of Zarekar et al. [15], Dash line: from correlation of Llop et al. [14], Dotted line: correlation of Richardson [1].

다. 그러나 최소유동화 속도에 의한 유량은 전체적으로 유동층 내 압력이 대기압으로부터 감소함에 따라 즉 진공 상태가 됨에 따라 그 유량은 지수적으로 감소함을 보인다. 그림에서 보듯 대기압 조건하에서 ($U_{mf} P$) 값과 진공상태에서의 ($U_{mf} P$)간의 결과가 거의 차이가 없거나 미미하다가 특정 압력이하부터 그 차이가 뚜렷하게 드러나고 있다. 그리고 이후 압력이 더욱 감소함에 따라 대기압 조건하에 유량으로부터 계산된 유량과의 차이가 점진적으로 증가됨도 확인할 수 있다. 이때 이 압력 지점까지는 유동특성이 점성 흐름이 지배하고 있는 범위라고 할 수 있으며 이 지점을 임계압력으로 하면 이 이하는 slip 흐름이 지배적인 유동특성을 보인다. 즉, 특정 압력이하 즉 임계압력에서는 점성 흐름에서 slip 흐름의 영향이 더욱 명확하게 드러남을 예측할 수 있다. 예로써 HDPE 입자의 경우를 살펴보면 그림에 나타내었듯이 대기압으로부터 임계압력 1726 Pa 이상까지는 slip 흐름이 뚜렷하게 유동층의 수력학적 특성에 영향을 미치지 않음을 나타낸다. 그러나 임계압력(P_{cr}) 이하에서는 압력 감소에 따라 최소유동화 레이놀즈 수 비간의 차이가 증가하는데 이는 기체의 slip 흐름에 기인 한 것으로 사료된다. 결국 slip 흐름이 뚜렷하게 유동층내 수력학적 특성으로 나타나는 운전 압력 기점을 실험적으로 얻을 수 있었다. 또는 역으로 대기압 조건하에서 얻어질 수 있는 최소유동화 속도에 근거한 유동속도를 활용할 수 있기도 한 범주가 있음도 확인할 수 있다. 즉, 1 기압이하 임계압력 이상 영역에서는 Richardson 식을 근거로 한 최소유동화 속도를 활용하는 것도 실제적 유용성을 갖을 수 있음을 보인다. 이는 이 범위의 운전 조건하에서 유동특성을 활용함에 있어 유동층 반응기의 수력학적, 열 및 물질전달 특성을 위해 리모델링없이 기존의 많이 연구되어져 있는 식들을 활용할 수도 있을 것으로 판단된다.. 따라서 이 임계 압력을 아는 것이 중요하다고 사료된다.

4. 결 론

대기압보다 낮은 압력 상태에서 운전된 유동층 반응기의 유동 특성에 대해 조사하였고 다음과 같은 결론을 얻었다. 미세 입자들은 대기압 이하 즉, 진공상태(0.4 kPa에서 101.3 kPa까지)에서 질소 기

체에 의해 유동화가 가능하였다. 깊은 충전층을 갖은 유동층의 최소 유동화 속도는 얇은 충전층의 최소 유동화 속도값과 달리 브로드한 입자들로 구성된 입자의 유동화 현상과 유사한 특성을 보인다. 각 진공 압력 상태에서 최소 유동화 속도를 실험적으로 구하였고 이 최소유동화 속도는 앞서 제안된 상관식들과 대체적으로 좋은 일치치를 보였다. 유동층 내 압력이 감소함에 따라 최소유동화 속도에 slip 흐름의 영향을 명확하게 구분 지을 수 있는 임계 Knudsen 수를 결정하여 점성 흐름과 slip 흐름 영역간의 경계를 구분 지을 수 있는 임계압력을 결정하였다.

감 사

이 논문은 우석대학교 교내 연구비 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사드립니다.

사용기호

- Ar : Archimedes number [-]
- C_1 : constant in Eq. (5)
- C_2 : constant in Eq. (6)
- C_3 : constant in Eq. (6)
- D : characteristic length [m]
- Dc : diameter of column. [m]
- dp : particle diameter [μ m]
- g : gravitational acceleration [m/s^2]
- GB : glass bead
- Hs : height of static fixed bed [m]
- HDPE : high density polyethylene
- k : Boltzmann's constant [J/K]
- k_2 : constant in Eq. (3) [-]
- Kn : Knudsen number [-]
- Kn_{cr} : critical Knudsen number [-]
- M : molecular weight [kg/kmol]
- P : pressure [Pa]
- P_{cr} : critical pressure [Pa]
- Pe : downstream pressure of the bed [Pa]
- PVC : polyvinyl chloride
- Re_{mf} : Reynolds number at minimum fluidization condition [-]
- Re_{mf0} : Reynolds number at ambient pressure [-]
- SG : silica gel
- T : temperature [K]
- U_{mf} : minimum fluidization velocity [m/s]
- U_{mfv} : minimum fluidization velocity at ambient pressure [m/s]
- Z : constant in Eq. (5)

그리이스문자

- ϵ_{mf} : void fraction in a bed at minimum fluidization condition [-]
- ζ : ratio of Reynolds number with and without slip flow [-]
- η : gas viscosity [kg/m s]
- λ : mean free path [m]
- ξ : diameter of gas molecule [m]

- ρ_g : gas density [kg/m³]
 ρ_s : particle density [kg/m³]
 ϕ : sphericity of particle [-]

References

1. Kunii, D. and Levenspiel, O., Fluidization Engineering, 2nd ed., Elsevier Inc., New York, NY(1991).
2. Chitester, D. C., Kornosky, R. M., Fan, L. S. and Danko, J. P., "Characteristics of Fluidization at High Pressure," *Chemical Engineering Science*, **39**(2), 253-261(1984).
3. Kozanoglu, B. U., Vichez, J. A., Casal, J. and Arnaldos, J., "Drying of Solids in Vacuum Fluidized Bed," *The Canadian J. of Chem. Eng.*, **80**(3), 376-385(2002).
4. Weerasiri, L. D., Das, S., Fabijanic, D. and Yang, W., "Numerical Study of Bubbling Fluidized Beds Operating at Sub-atmospheric Conditions," *International Scholarly and Science Research & Innovation*, **13**, 656-660(2019).
5. Rogers, T. and Morin, T. J., "Slip Flow in Fixed and Fluidized Bed Plasma Reactors," *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, **11**, 203-228(1991).
6. Park, S. H. and Kim, S. D., "Plasma Surface Treatment of HDPE Powder in a Fluidized Bed Reactor," *Polym. Bull.*, **33**, 249-256 (1994).
7. Park, S. H. and Kim, S. D., "Oxygen Plasma Surface Treatment of Polymer Powder in a Fluidized Bed Reactor," *Colloid Surface A.*, **133**, 33-39(1998).
8. Song, L. H., Park, S. H., Jung, S. H., Kim, S. D. and Park, S. B., "Synthesis of Polyethylene Glycol-polystyrene Core-shell Structure Particles in a Plasma-fluidized Bed Reactor," *Korean J. Chem. Eng.*, **28**(2), 627-632(2011).
9. Kawamura, S. and Suezawa, Y., "Mechanism of Gas Flow in a Fluidized Bed at Low Pressure," *Kagaku Kogaku*, **25**, 524-530 (1961).
10. Germain, B. and Claudel, B., "Fluidization of Mean Pressures Less Than 30 Torr," *Powder Technology*, **13**, 115-121(1975).
11. Fletcher, J. V., Deo, M. D. and Hanson, F. V., "Fluidization of a Multi-sized Group B Sand At Reduced Pressure," *Powder Technology*, **76**, 141-147(1993).
12. Roth, A., "Vacuum Technology," North-Holland, Amsterdam (1976).
13. Kusakabe, S., Kuriyama, T. and Morooka, S., "Fluidization of Fine Particles at Reduced Pressure," *Powder Technology*, **58**, 125-130(1989).
14. Llop, M. F., Madrid, F., Arnaldos, J. and Casal J., "Fluidization at Vacuum Conditions. A Generalized Equation for the Prediction of the Prediction of Minimum Fluidization Velocity," *Chemical Engineering Science*, **51**, 5149-5157(1996).
15. Zarekar, S., Buck, A., Jacob, M. and Tsotsas, E., "Reconsideration of the Hydrodynamic Behavior of Fluidized Beds Operated Under Reduced Pressure," *Powder Technology*, **287**, 169-176 (2016).
16. Kozanoglu, B. U., Welti Chanes, J., Garcia Cuautle, D., Sants Jean, J. P., "Hydrodynamics of Large Partilce Fluidization in Reduced Pressure Operations: An Experimental Study," *Powder Technology*, **125**, 55-60(2002).
17. Wraith, A. E. and Harris, R., "Fluidisation of a Mineral Concentrate at Reduced Pressure," *Minerals Engineering*, **5**, 993-1002 (1992).