

고분자 입자를 사용하는 순환유동층에서의 유동 안정성 연구

김상현 · 한귀영[†]

성균관대학교 화학공학과
(1998년 7월 13일 접수, 1998년 12월 18일 채택)

Flow Stability of Circulating Fluidized Bed with Polymeric Particles

Sanghyun Kim and Guiyoung Han[†]

Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea
(Received 13 July 1998; accepted 18 December 1998)

요 약

고분자 입자를 사용하는 순환유동층에서 유동 안정성을 압력요동으로부터 살펴보았다. 실험에 사용된 순환유동층은 직경이 5 cm, 높이는 250 cm였으며, 사용된 고분자는 크기가 0.5 mm인 PE와 0.1 mm PVC였으며, 유동 안정성을 향상시키기 위해 사용된 큰 입자는 0.7 mm 모래와 2.0 mm 유리알이었다. 순환유동층에서 측정된 압력요동 신호는 표준편차, 확률밀도함수로서 해석하였다. 큰 입자의 첨가 그리고 기체의 습도가 유동 흐름에 미치는 영향을 압력요동의 변화에서 살펴보았다. 실험결과 유동층 하부가 상부보다 압력요동이 심하였다. 또한 큰 입자의 첨가 그리고 습한 공기를 사용할 때, 압력요동이 작아졌으며, 이로써 유동 안정성이 향상됨을 알 수 있었다.

Abstract—The flow stability of circulating fluidized bed with polymeric particles was investigated from the pressure drop fluctuation. The test facility was 5 cm I.D.×250 cm long and the PE and PVC were employed as the bed materials. The pressure drop fluctuations of the CFB was analysed in terms of standard deviation, probability density function. The effect of addition of coarse particle and relative humidity of fluidized gas on the flow stability was determined from change of pressure drop fluctuations. Axial profiles of pressure drop fluctuation were measured and results showed that at the lower part of the bed the pressure drop fluctuation was more severe. It also showed that the addition of coarse particles and humid fluidized gas prevented the particle agglomeration thus the narrower pressure drop fluctuation was observed.

Key words: Circulating Fluidized Bed, Flow Stability, Pressure Fluctuation

1. 서 론

순환유동층(Circulating Fluidized Bed: CFB)은 고속의 기체와 크기가 비교적 작은 고체입자간의 긴밀한 접촉을 통하여 비교적 대규모의 여러 가지 물리화학적 작업을 수행하는 유동층 기술의 한 영역이다[1]. 순환유동층은 1940년 이후로 미국에서 촉매에 의한 원유로부터의 가솔린 제조 등에 이용되어 왔으며[2], 비촉매 반응에 있어서의 공업적 응용은 1970년 독일의 Lurgi사의 CFB calciner를 들 수 있으며[3], 최근에는 석탄의 연소 및 가스화를 통한 전력생산 공정의 핵심장치로 활용되고 있다. 이러한 순환유동층은 비교적 저속의 기체와 입자가 접촉하는 기존의 기포유동층(bubbling fluidized bed)에 비하여 수력학적, 열전달 측면에서 큰 차이가 있으며, 일반적으로 기포유동층에 비하여 기체-고체간의 혼합이 우수하고 유동층 단위체적당 취급용량이 크며, 다양한 종류의 입자를 취급할 수 있다는 장점이 있다[4].

그러나 이러한 장점에도 불구하고 고속의 기체흐름에 의한 입자와 입자간의 마찰, 그리고 입자와 반응기 벽면간의 마찰에 따른 정전기

의 발생이 심하여 입자들이 덩어리(cluster)를 형성하는 agglomeration 현상이 나타나 유동층내 입자들의 유동특성이 바뀌고 유동층내에서 입자의 반경방향, 축방향 농도가 불균일해진다. 이러한 고체입자의 불균일한 흐름은 심각한 압력변동으로 이어지며, 이것은 궁극적으로 조업상의 불안정성으로 나타난다.

유동층내의 불안정성을 해결하기 위해 최근 여러 가지 방안이 제시되고 있는데, Wolny와 Opalinski[5]는 1,020-1,200 μm 크기의 polystyrene bead에 1-45 μm 크기의 활성탄 분말 혹은 titanium dioxide를 약 0.1 vol%로 소량 첨가하여 heating surface와 bed 사이의 열전달 특성과 수력학적 특성이 향상됨을 실험적으로 증명하였고, Bagster와 Roberts[6], Li 등[7]은 높은 유속의 유동층에서 coarse particle의 첨가와 제거에 의하여 fine particle의 fluidization quality가 영향을 받는다고 보고하였다. 또한 Bi 등[8]은 coarse particle를 첨가함으로써 고체입자의 holdup이 향상된다고 하였고, Wolny와 Kazmierczak[9], Jiang 등[10]은 각각 polystyrene과 polyethylene 입자를 사용하는 유동층에서 유동화 기체의 상대습도(relative humidity) 조절을 통해 첨가된 수분이 유동흐름 특성에 어떠한 영향을 주는가를 관찰하였다.

본 연구에서는 순환유동층의 조업 중 발생할 수 있는 유동흐름의 불안정성을 해결하는 방안으로 coarse particle를 첨가하는 방법과 유

[†]E-mail: gyhan@yurim.skku.ac.kr

동화 기체(공기) 상대습도를 조절하는 방법을 선택하여 유동흐름의 안정성 향상을 실험적으로 살펴보았다. 즉 정전기의 발생이 쉽게 일어날 것으로 예상되는 고분자 수지(PE, PVC)에 coarse particle(glass bead, sand)를 첨가하여 유동층내 흐름의 변화를 압력변동 신호로서 해석하고, 또한 입자의 뭉침에 주요 원인으로 여겨지는 입자간의 마찰에 따른 정전기를 방지하는 방법으로 유동화 기체(공기)의 상대습도 조절을 통하여 유동흐름의 안정성과 상대습도와의 관계도 살펴 보았다.

2. 실험

본 실험에 사용된 순환유동층의 개략도는 Fig. 1과 같다. 고체입자의 흐름을 관찰할 수 있도록 장치는 아크릴 관으로 제작되었으며, 크게 공기 공급장치, 유동층 상승관(riser) 그리고 사이클론과 입자 재주입부로 구성되어 있다. 유동층 상승관은 내경이 5 cm, 높이는 250 cm이며, 벽면에는 압력강하를 측정하기 위한 4개의 압력 tap이 50 cm 간격으로 설치되어 있으며, 입자의 유출을 막기 위해 60 마이크론의 필터를 설치하였다. 압력 tap은 그림에서 보듯이 3개의 차압 압

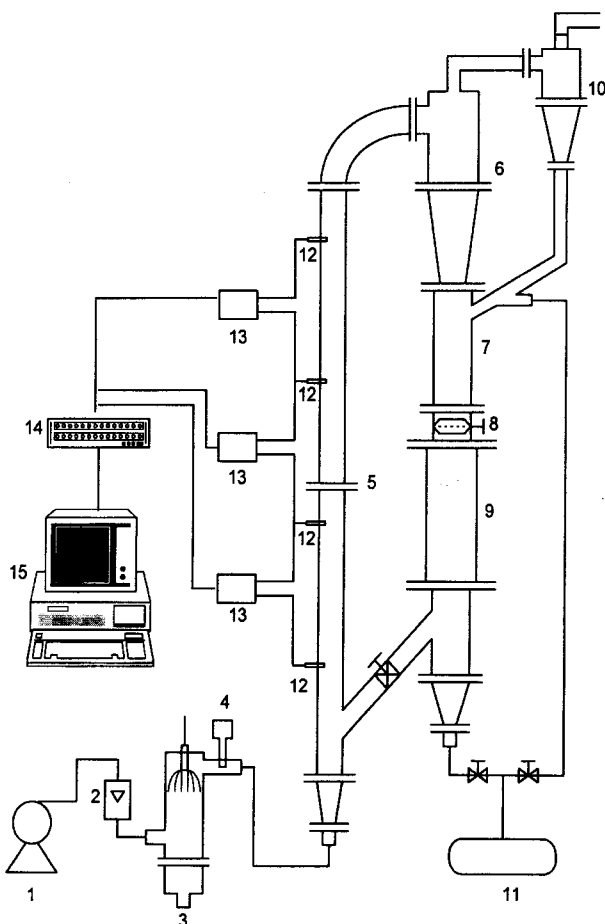


Fig. 1. Schematic diagram of CFB test facility.

- | | |
|---------------------|---------------------------|
| 1. Blower | 9. Reservoir |
| 2. Flow meter | 10. 2nd cyclone |
| 3. Humidifier | 11. Compressor |
| 4. Humidity probe | 12. Pressure tap |
| 5. Riser | 13. Pressure transmitter |
| 6. 1st cyclone | 14. Data acquisition unit |
| 7. Measuring column | 15. Computer |
| 8. Butterfly valve | |

Table 1. Physical properties of employed particles

	$d_p(\mu\text{m})$	$\rho_p(\text{kg/m}^3)$	$\rho_s(\text{kg/m}^3)$	$U_{mf}(\text{m/s})$	$U_t(\text{m/s})$
PE	538	370	918	0.13	2.31
PVC	109	530	1400	1.008	0.362
Glass	2000	1552	2282	2.61	11.32
Sand	625	1680	2720	0.52	5.19

력전달계에 측방향으로 연결되어 유동층 하부, 중간부, 상부의 압력요동을 측정하였고, 이 신호는 data acquisition unit을 통하여 컴퓨터에 저장하였다. 또한 유동층 밖으로 비산되는 입자를 포집하기 위하여 2개의 사이클론을 직렬로 연결하였고, 포집된 입자는 기포 유동층 형태의 입자저장조를 거쳐서 유동층 상승관으로 재순환되도록 하였다. 이때 재순환되는 입자의 양을 조절하기 위하여 재순환부와 유동층 상승관 사이에 밸브를 설치하여 순환량을 조절하였다. 또한 순환유동층의 주요 조업변수인 고체입자 재순환량(solid circulation rate: G_s)을 측정하기 위하여 1차 사이클론 하부에 수직관을 설치하고 분산판이 설치된 butterfly 밸브를 이용하여 정상상태로 조업될 때 밸브를 닫고 입자의 축적속도로서 재순환량을 결정하였다.

한편 유동 흐름에 대한 기체의 습도 영향을 알아보기 위하여 유동층 입구 앞에 직경 7 cm, 높이 50 cm의 습도조절장치(humidifier)를 설치하였다. 물을 분사노즐을 통하여 습도조절장치 상부에서 공급하고, 유동화 기체인 공기를 하부에서 유입시켜 물방울과 향류접촉이 되도록 하여 공기의 습도를 조절하였으며, 유동층에 도입되는 공기의 습도는 humidity probe로 측정하였다.

본 실험에서 사용된 고분자 입자는 polyethylene(PE)과 polyvinyl-chloride(PVC)였으며, 유동 안정성을 향상시키기 위하여 첨가된 큰 입자(coarse particle)는 모래와 유리구슬이었다. 사용된 입자의 물리적 특성은 Table 1에 나타내었다.

실험은 우선 PVC와 PE만을 사용하여 압력요동을 측정하고 다음에는 같은 조업조건에서 각각의 고분자 입자에 10 vol%의 유리입자, 5 vol%의 모래입자를 각각 첨가하여 압력요동값을 측정하여 서로 비교하였다. 실험자료는 주어진 조업조건하에서 유동층이 정상상태에 도달하였을 때, 기체의 유속, 고체입자의 재순환량, 그리고 압력강하를 측정하였으며, 압력강하의 요동을 살펴보기 위하여 압력강하 신호는 5 Hz의 sampling rate로 측정하여 data acquisition system (MetroByte, DAS 800)을 통하여 PC에 저장하였다.

3. 결과 및 고찰

일반적으로 순환유동층에서의 유동특성은 작은 입자들의 집합체인 cluster의 형성 및 거동에 의하여 큰 영향을 받으며, 이러한 cluster의 발생은 입자들간의 작용하는 힘, 그리고 전기적 특성에 의한다고 알려져 있다. 즉 입자들의 덩어리 형성 혹은 좀더 일반적인 의미에서의 기체-고체 suspension의 불균일성은 기체와 고체입자상에서의 난류형성, 유체와 입자간의 drag force, 그리고 정전기적 인력(electrostatic force)이나 van der Waals force와 같은 입자 상호간의 힘에 의하여 발생된다. 순환유동층의 대표적인 수력학적 특성인 core-annulus 현상에 의한 riser 벽면에서의 고체입자들의 축적 현상도 덩어리의 형성에 영향을 미치는 중요한 인자가 되는데 이는 입자와 입자, 입자와 벽면간의 충돌과 분산의 연속과정이 벽쪽으로 향하는 고체입자들의 이동을 증가시켜 방사방향에서의 입자속도분포를 불균일하게 하고, 벽면에서의 no-slip condition이 벽면 주위에서 유속과 유체의 난류강도를 감소시켜 고체입자들이 core 방향으로 다시 이동하는 것을 방해함으로 인하여 발생된다[10]. 한편 순환유동층의 응용

이 처음에는 주로 FCC 촉매를 이용한 cracking에 관한 연구에서 고분자 중합반응기로 응용범위가 확대되어감에 따라서 고분자 입자에 대한 유동특성의 연구가 활발히 진행되고 있다. Jiang 등[11]은 고분자 입자의 경우에는 hydrodynamic 혹은 gravitational force 보다는 interparticle force의 영향이 상대적으로 크다고 보고하였다. 순환유동층에서 주된 두 가지의 interparticle forces는 van der Waals force와 electrostatic force이다. Van der Waals force는 일반적으로 입자-입자 간의 접촉으로 형성된 agglomeration을 보존하는 힘이라 할 수 있는데, Krupp[12]은 van der Waals force에 의한 입자들의 adhesion force를 다음의 식으로 계산하였다.

$$F_H \approx \frac{h\omega}{8\pi z_0^2} R \left(1 + \frac{h\omega}{8\pi^2 z_0^3 H} \right) \quad (1)$$

여기서 $h\omega$ 는 Lifschitz-van der Waals 상수, z_0 는 adhesion force가 최대 값을 가지는 입자사이의 거리, H 는 고체입자의 hardness, 그리고 R 은 접촉하는 입자들의 surface geometry에 의해 결정되는 특성량이다. 따라서 van der Waals force는 입자의 크기에 따라 결정되는 것이 아니며, 입자들의 surface geometry를 고려해 주어야 하는데 대개 거친 표면을 가지는 고분자 입자의 경우 R 값의 영향이 크게 됨을 알 수 있다. 또한 고분자 입자와 같이 soft한 물질이 유리구슬과 같이 hard한 물질에 비해 adhesion force가 크다는 결과[13]로부터 고

분자 입자들이 접촉에 의해 쉽게 agglomeration 된다는 것을 설명할 수 있으며 coarse particle의 첨가시 크기, 밀도뿐만 아니라 adhesion force도 고려해야 함을 알 수 있다.

Electrostatic force는 고분자 입자와 같은 dielectric solid로의 조업에 있어 복잡한 양상을 나타나게 한다. 특히 유동층에 있어 입자-입자, 입자-벽면 간의 정전기는 system의 수력학적 특성에 영향을 줄 뿐만 아니라 heating surface와 bed 사이의 열전달에도 큰 저해 요인이 된다. Smeltzer 등[14]은 pneumatic transport system에서 입자-입자, 입자-벽면 간의 접촉에 의해 야기되는 마찰전기(triboelectrification)가 입자의 흐름거동에 중대한 영향을 주어 층내의 압력강하가 증가함을 보고하였고, Chang과 Louge[15]는 다양한 표면마찰계수(surface friction coefficient)를 가지는 입자들을 사용하여 표면마찰계수가 적은 입자일수록 압력강하가 적다는 것을 보고하였다.

3-1. Coarse Particle의 영향

순환유동층에서 측정되는 압력강하는 유동층 단위부피당 고체입자의 농도를 예측하는 주요한 자료가 된다. 또한 압력강하요동(pressure drop fluctuation)은 유동층 단위부피당 순간적인 입자의 농도분포를 나타내는 지표가 되며, 이러한 압력강하요동의 크기로서 유동층에서 기체-고체 suspension의 흐름상태를 예측할 수 있는 근거를 제공한다.

Jiang 등[11]은 polyethylene 입자 간의 강한 상호 인력에 의해 유

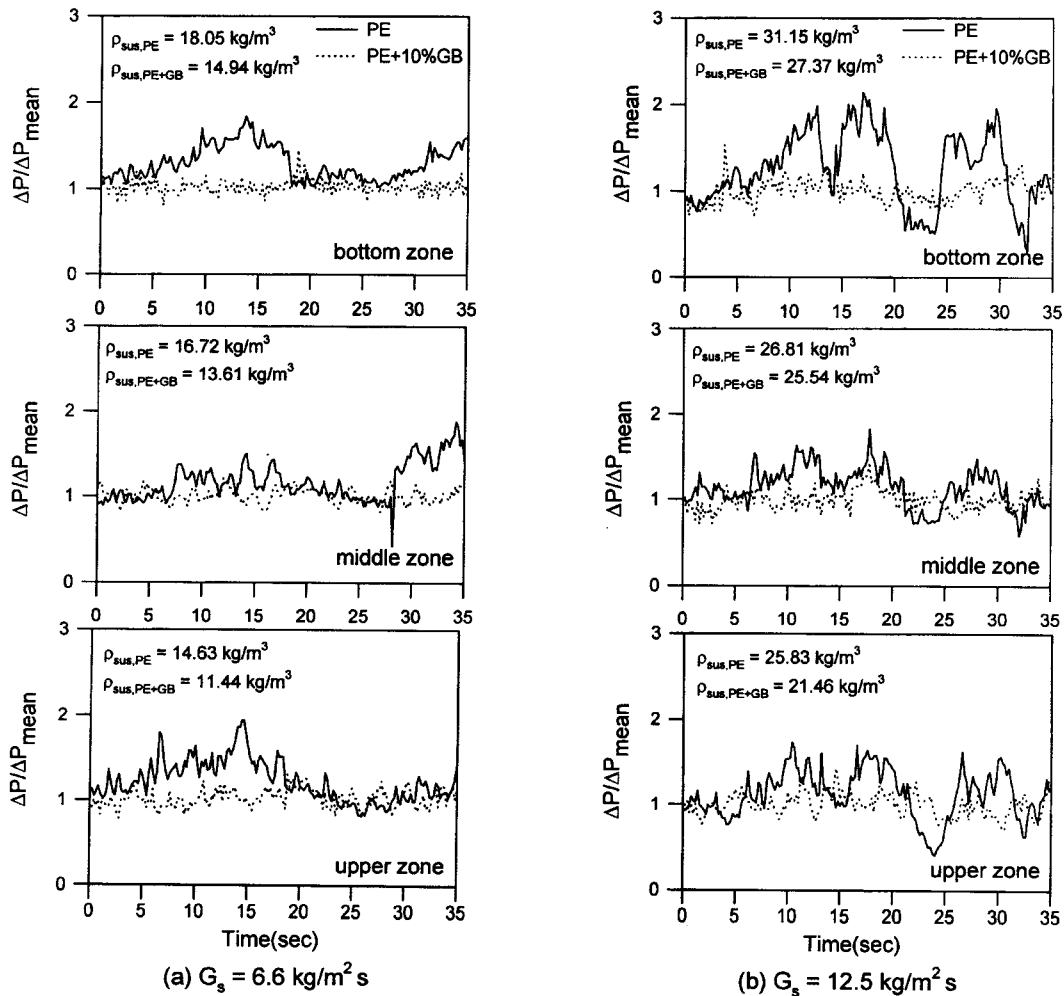


Fig. 2. Pressure drop fluctuations for different G_s and bed height ($U_f = 2.69$ m/s).

발된 입자들의 agglomeration이 coarse particle를 첨가하므로써 coarse와 fine particle의 상호작용을 통하여 제거될 수 있으며, coarse particle의 첨가시 압력요동이 감소되는 결과로부터 fluidization quality가 향상된다고 보고하였다. 또한 Bi 등[16]은 이를 응용하여 coarse particle은 수평 방향으로, fine particle과 유동화 기체는 수직방향으로 공급하는 coarse-fine crossflow fluidized bed라는 새로운 형태의 모델을 제안하였는데 고체입자의 체류시간 조절의 용이, coarse와 fine particle의 good mixing을 통한 높은 열전달 속도, 커다란 기포 생성 억제 등의 이점이 있는 것으로 나타났다.

본 실험에서는 fine particle의 고분자 수지를 사용하였을 때와 고분자 수지에 coarse particle를 첨가하였을 때의 유동층내의 축방향 압력강하요동을 시간의 변화에 따라 측정하여 그 요동의 크기를 비교, 분석하여 흐름상태의 변화를 살펴보았다. 유동층의 하부(bottom), 중간(middle), 그리고 상부(upper)에서 얻어진 시간에 따른 압력강하요동을 순환유동층의 주요 운전변수 중의 하나인 고체순환량(G_s)의 변화에 따라 Fig. 2에 나타내었는데 기체유속(U_g)은 glass bead의 최소 유동화 속도인 2.61 m/s 이상에서 유지하였다. 그림에서 알 수 있듯이 주어진 조업조건에서 고분자 수지 polyethylene에 coarse particle로서 glass bead를 10 vol% 첨가된 경우가 polyethylene 수지만으로 조업할 때보다 압력요동의 폭이 작아짐을 알 수 있다. 이것은 coarse particle를 첨가했을 경우에 유동층내에서 cluster의 형성이 많이 억제되어서 입자의 축방향, 반경방향 농도분포가 보다 균일해질 것으로 예상되며, 따라서 입자의 흐름이 안정화되어 있음을 보여준다고 할 수 있다. 또한 순환유동층의 하부가 상부보다도 압력요동이 심한 것을 볼 수 있으며, 이것은 입자의 재순환부가 하부에 있기 때문에 재순환관을 통하여 하부로 떨어지는 고체입자량의 변동에 의한 요인으로 여겨진다. 이러한 실험결과로 미루어 보건대 coarse particle의 첨가는 fine particle의 agglomeration을 분쇄하여 입자들이 뭉치지 않고 잘 분산되어 상부로 흐르게 하는 일종의 baffle 역할을 한다고 볼 수 있다. Fig. 3은 유동층으로 순환되는 고체입자의 재순환량에 따른 압력요동의 표준편차(standard deviation: σ)를 유동층 높이별로 나타내었다. 이것은 앞에서 고찰한 결과의 또다른 표현방식으로 볼 수 있는데 coarse particle이 첨가된 경우가 순수한 고분자 수지만으로 조업할 경우보다 압력강하의 표준편차 값이 작음을 알 수 있다. 또한 입자의 재순환량이 증가할수록 표준편차의 값이 증가함을 알 수 있으며, 이것은 입자의 순환량이 크면 클수록 입자간의 충돌빈도가 커져서 입자의 agglomeration이 자주 발생하는 것으로 여겨진다.

3-2. 기체유속의 영향

순환유동층의 조업에 있어 유동특성에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 기체유속이라 할 수 있다. 비교적 낮은 유속에서는 coarse particle이 주로 riser의 하부에 존재하기 때문에 coarse와 fine particle 간의 상호작용 가능성이 작으며, 유속을 증가시킬수록 상호작용이 활발히 일어나게 된다. Bi 등[8]은 다른 크기의 입자들을 포함하는 혼합물의 유동화에서 기체유속 혹은 고체입자 순환량의 변화에 따라 두 가지의 양상이 나타남을 보고하였다. 일반적으로 낮은 기체유속에서는 기체의 틈새속도(interstitial gas velocity)가 증가하여 fine particle의 이동속도가 증가하여 축방향 holdup이 감소하며, 높은 기체유속에서는 coarse particle의 층팽창이 커지면서 coarse와 fine particle 간의 상호작용이 증가하게 되어 fine particle의 holdup이 증가하게 되는데, 이때 coarse particle의 층팽창과 fine particle의 holdup은 입자들의 물질뿐만 아니라 coarse와 fine particle 간의 흐름 형태 및 momentum exchange rate와 관련이 있다고 알려져 있다[11].

Fig. 4는 고분자 수지로 PVC를 사용하고 coarse particle로 sand를 사용한 경우에 기체의 유속에 따른 유동층 상부에서의 압력강하요

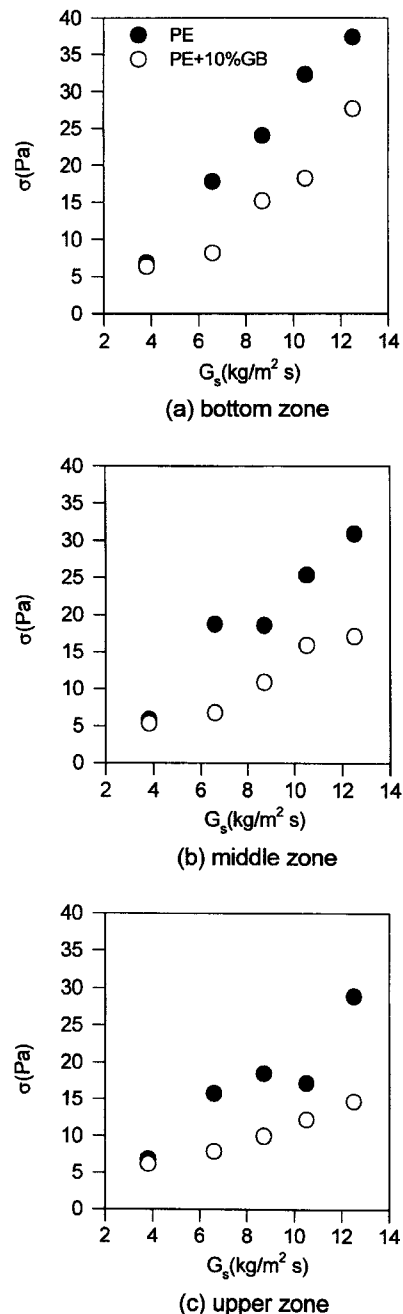


Fig. 3. Standard deviation of pressure drop for different bed height ($U_g=2.69$ m/s).

동을 나타내었다. 기체의 유속이 낮을 경우에는 그림 (a)에서 보듯이 coarse particle를 첨가한 경우가 고분자 수지만으로 조업한 경우보다 압력요동이 작은 것을 볼 수가 있으나 그림 (b), (c)에 비하여서는 유동흐름이 불안정한 것을 알 수 있다. 이것은 기체의 유속이 낮을 경우 coarse particle이 충분히 유동화되지 못하여 baffle의 역할을 충실히 수행하지 못하는 것으로 여겨지며, 기체의 유속이 증가하면서 압력요동이 급속히 감소함을 알 수 있다. 따라서 coarse particle이 입자의 agglomeration을 방해하는 baffle의 역할을 하기 위해서는 일정유속 이상의 기체유속이 필요함을 알 수 있었다. 또다른 해석으로는 유속이 순환유동층의 조업조건에 미치지 못하는 slugging 영역이기 때문에 압력요동이 큰 것으로 예측된다. 이러한 압력요동의 크기를 표준편차의 값으로 계산한 것을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보듯

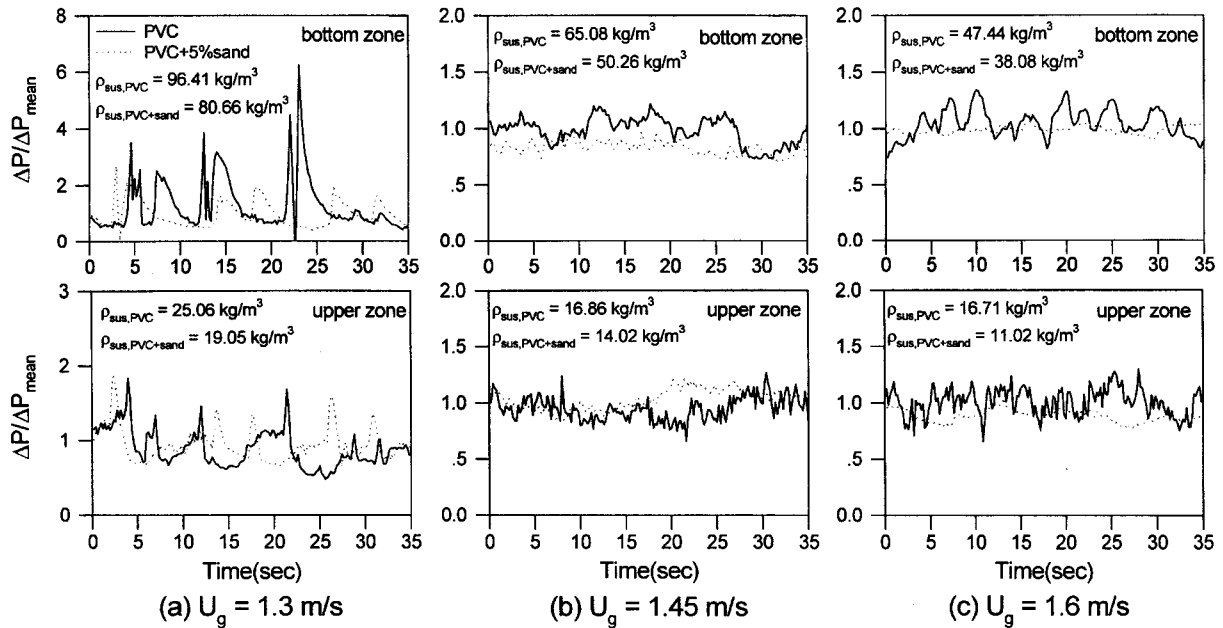


Fig. 4. Pressure drop fluctuations at the bottom and upper zone for different gas velocity.

이 bottom zone에서는 압력요동의 편차가 40-100 Pa인데 비하여 upper zone에서는 20-50 Pa의 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이것은 순환유동층의 상부와 하부가 다른 유동특성을 갖는다는 것을 보여주는 것이라 하겠다. 또한 기체의 유속이 증가함에 따라서 표준편차의 값이 크게 감소함을 볼 수 있으며, 이로써 유동특성에 대한 기체유속의 영향을 명확히 보여준다고 하겠다.

3-3. 상대습도의 영향

유동층에서 입자들간의 마찰, 그리고 입자와 벽면간의 마찰에 의한 정전기의 발생으로 인한 입자들의 agglomeration을 방지하는 한 방법으로 유동화기체의 상대습도를 변화하면서 유동층의 압력요동을 관찰하였다. 본 실험에 사용된 고분자 수지는 높은 표면저항을 가지고 있어서 쉽게 정전기를 발생하는 경향을 가지고 있다.

Jiang 등[10]은 습도 증가에 따른 core region에서의 고체입자 농도의 증가 및 wall region에서의 고체입자 농도의 감소로부터 첨가된 물분자의 영향으로 정전기에 의하여 야기된 riser의 벽면과 고체입자 사이의 인력이 감소된다고 보고하였다. 즉 정전기의 감소가 직접적으로 벽면에 달라붙는 고체입자들의 양을 감소시켜 wall region에서의 고체입자 농도를 감소시키고 이로 인하여 반경방향으로의 흐름 상태가 균일하게 변화되어 유동흐름이 안정화되는 것이라 할 수 있다.

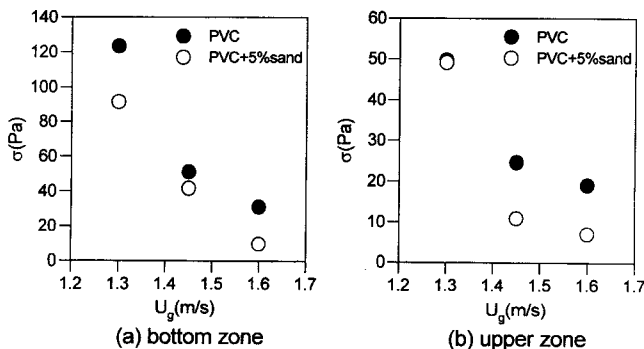


Fig. 5. Standard deviation of pressure drop for different gas velocity.

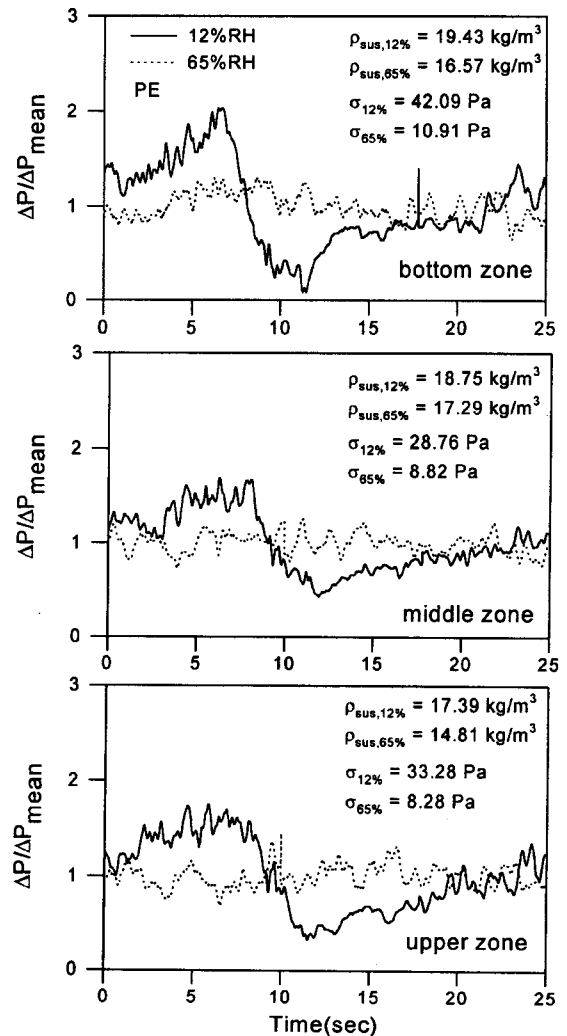


Fig. 6. Pressure drop fluctuation of PE particle for different relative humidity ($U_g = 2.69 \text{ m/s}$, $G_s = 8.2 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$).

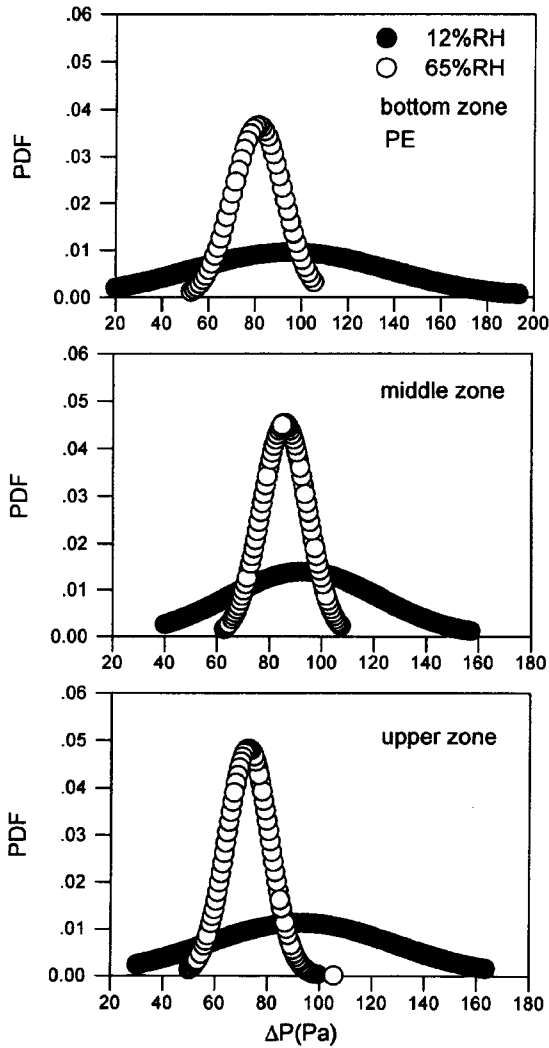


Fig. 7. Normal distribution curves of pressure drop of PE particle for different relative humidity ($U_f=2.69$ m/s, $G_s=8.2$ kg/m² s).

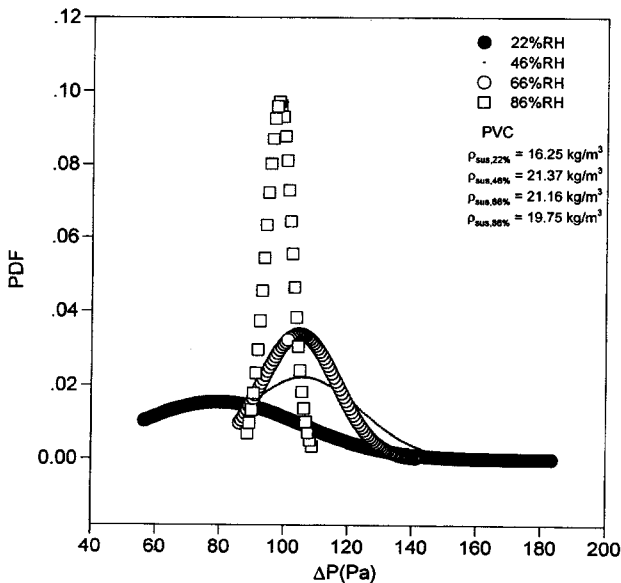


Fig. 8. Normal distribution curves of pressure drop of PVC particle for different relative humidity ($U_f=1.45$ m/s).

Fig. 6은 유동화 기체의 상대습도가 각각 12%, 65%일 때 유동층의 축방향 압력요동을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 상대습도가 높은 경우가 낮은 경우일 때보다 유동층의 모든 영역에서 압력요동이 작아짐을 관찰할 수 있었다. 즉 압력요동의 표준편차를 살펴보면 상대습도가 65%인 경우 압력변동의 표준편차가 8-10 Pa인데 비하여 상대습도가 12%인 경우에는 압력 표준편차가 30-40 Pa의 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 마찰전기 효과에 의하여 정전기적 전하를 띠고 있는 고분자 수지의 표면 혹은 세공에 첨가된 물분자들이 물리적 흡착을 하여 입자들의 표면전하를 중성화(neutralization)시킴으로써 입자들의 agglomeration을 방해하는 것으로 여겨진다.

Fig. 7과 8은 각각 polyethylene과 polyvinylchloride 입자를 사용한 실험에서 얻어진 압력요동을 정규분포곡선(normal distribution curve)을 이용하여 확률밀도함수(probability density function)로 표현한 것이다.

$$PDF(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(P-\bar{P})^2}{2\sigma^2}\right), \quad -\infty < P < \infty \quad (2)$$

그림에서 보듯이 상대습도가 클 경우가 상대습도가 작은 경우보다 좁은 영역의 압력변동을 나타낼 수 있으며, 이것은 상대습도가 클 경우 압력요동이 작은 표준편차를 갖는다는 것을 보여주고 있다. 이로써 유동화기체의 상대습도가 순환유동층의 유동흐름에 큰 영향을 미침을 알 수 있었으며, 특히 polyethylene 입자의 실험결과는 60% 이상의 상대습도에서 polyethylene 입자의 전기적 행동이 습도에 영향을 받게 된다는 연구결과[10]와 잘 일치하고 있다.

4. 결 론

순환유동층의 조업 중에 발생하는 입자의 agglomeration에 의한 유동흐름의 불안정성을 해결하기 위하여 coarse particle을 첨가하는 방법과 상대습도의 조절을 통하여 순환유동층의 유동특성을 비교 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 정전기의 발생이 용이한 고분자 입자의 순환유동층에 glass bead 그리고 sand와 같은 coarse particle을 첨가한 결과, 유동층의 압력요동이 현저히 감소하였다. 이것은 첨가된 coarse particle이 agglomeration을 방해하는 일종의 baffle 역할을 하는 것으로 여겨진다.

(2) 유동화기체의 상대습도를 높이면 물분자의 표면흡착에 따른 입자-입자 그리고 입자-벽면간에 발생할 수 있는 정전기가 감소하여 입자의 agglomeration이 감소하는 결과를 가져오며, 따라서 압력요동이 현저히 줄어들음을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 coarse particle의 첨가와 유동화 기체의 상대습도가 유동흐름의 안정성에 큰 영향을 미침을 압력요동의 변화로부터 알 수 있었다.

감 사

본 연구는 학술진흥재단 공모과제 연구지원사업에 의하여 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

사용기호

d_p : mean particle diameter [μ m]

F_H : adhesion force of attraction with dominating van der Waals force

[N]

- H : hardness of solid material [N/m²]
 h₀ : Lifschitz-van der Waals' constant [eV]
 G_s : solid circulation rate [kg/m²-s]
 P : pressure drop [Pa]
 \bar{P} : mean pressure drop [Pa]
 R : characteristic measure of surface asperities [m]
 U_g : superficial gas velocity [m/s]
 U_{mf} : minimum fluidization velocity [m/s]
 U_t : terminal velocity [m/s]
 z₀ : $\cong 4 \times 10^{-10}$, distance at which maximum of van der Waals force is observed [m]

그리스 문자

- ρ_b : bulk density [kg/m³]
 ρ_s : particle density [kg/m³]
 σ : standard deviation of pressure drop [Pa]

참고문헌

- Han, G. Y. and Choi, J. H.: *Chemical Industry and Technology*, **13**, 20(1995).
- Squires, A. M.: in "Circulating Fluidized Bed Technology", edited by Basu, P., Pergamon Press, Toronto, 1(1986).
- Reh, L.: *Chem. Eng. Prog.*, **67**(2), 58(1971).
- Yerushalmi, J. and Cankurt, N. T.: *Powder Technology*, **24**, 187 (1979).
- Wolny, A. and Opalinski, I.: *J. Electrostatics*, **14**, 279(1983).
- Baster, D. F. and Roberts, A. W.: *Powder Technology*, **43**, 11(1985).
- Li, H., Legros, R., Brereton, C. M. H., Grace, J. R. and Chaouki, J.: *Powder Technology*, **60**, 121(1990).
- Bi, H., Jiang, P., Jean, R.-H. and Fan, L.-S.: *Chem. Eng. Sci.*, **47**, 3113(1992).
- Wolny, A. and Kazmierczak, W.: *Chem. Eng. Sci.*, **44**, 2607(1989).
- Jiang, P., Zhang, J. and Fan, L.-S.: in "Circulating Fluidized Bed Technology V", edited by Kwauk, H. and Li, J., Science Press, Beijing, 188(1997).
- Jiang, P., Bi, H., Liang, S.-C. and Fan, L.-S.: *AIChE J.*, **40**, 193 (1994).
- Krupp, H.: *Adv. in Coll. and Interf. Sci.*, **1**, 111(1967).
- Molerus, O.: *Powder Technology*, **33**, 81(1987).
- Smeltzer, E. E., Weaver, M. L. and Klinzing, G. E.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **21**, 390(1982).
- Chang, H. and Louge, M.: *Powder Technology*, **70**, 259(1992).
- Bi, J., Yang, G. and Kojima, T.: *Trans IChemE*, **73**, 162(1995).