

가압유동층 반응기의 시동과 정지시 일으킬 수 있는 오류

이창근[†] · 조성호 · 배달희 · 한근희 · 손재익

한국에너지기술연구소 에너지환경연구부
(1998년 7월 10일 접수, 1999년 1월 5일 채택)

Pitfalls in Start-up and Shut-down of Pressurized Fluidized Bed Reactors

Chang-Keun Yi[†], Sung-Ho Cho, Dal-Hee Bae, Keun-Hee Han and Jae-Ek Son

Energy Environment Research Department, Korea Institute of Energy Research
(Received 10 July 1998; accepted 5 January 1999)

요 약

가압유동층 반응기에서 조업 중에 발생할 수 있는 가장 큰 문제는 agglomeration과 비산유출이다. 이런 현상은 정상조업 동안 보다는 시동 또는 정지시의 비정상상태에서 종종 발생한다. 유동층에서 가장 기본적이라고 할 수 있는 최소유동화속도와 종말속도의 이론적 고찰을 통해 가압유동층 반응기의 시동과 정지시 agglomeration과 비산유출을 방지할 수 있는 온도와 압력 조절범위의 적정계약을 제안하였다.

Abstract—Serious potential problems in pressurized fluidized bed reactors were agglomerations and entrainments, occurred often when the reactors were unsteady-states. Based on theoretical evaluations on minimum fluidization velocity and terminal velocity, optimum loci for the manipulation of temperature and pressure were proposed when the reactors were started-up and shut-down.

Key words: Pressurized Fluidized Bed Reactors, Start-up, Shut-down, Agglomeration, Entrainment

1. 서 론

가압유동층 반응기는 유동층 반응기의 장점인 좋은 열전달, 물질전달, 혼합효과와 가압시스템의 장점인 높은 기체 밀도에 의한 처리량의 증가때문에 응용 면에서 여러 반응기에 사용되고 있다. 이 반응기를 정상상태의 온도, 압력까지 올리기 위하여 반응기내의 고체상의 유동화 상태를 적절하게 유지시키지 않으면 층내 물질이 엉겨괴상의 덩어리가 생성(agglomeration)될 수 있다. 또는 너무 높은 속도로 유지되어 많은 입자가 날아가 버릴(entrainment) 위험성도 많다. Agglomeration은 유속, 온도, 압력의 조건을 잘못 설정하여 한번 형성이 되면 그것을 녹여 내기 전에는 반응기를 폐기해야 할 정도의 심각한 경우를 야기할 수도 있다. Entrainment도 시동과 정지시 많이 일어나며 그 경우 정상상태의 실험조건에서 얻은 실험치는 전혀 못쓰게 된다. 당 연구팀이 고온고압축매 유동층 반응기, 가압유동층연소로, 순환유동층연소로, 유동층소각로, 유동층추매연소로 등의 여러 유동층 반응기를 운전하면서 겪었던 agglomeration과 entrainment를 사례로 제시하고, 간단한 이론식에 바탕을 두어 그들을 해결하는 방안을 제시하고자 한다.

대부분의 유량계 또는 질량유량제어기(mass flow controller)들은 유량(M^3/T)으로 표시되기 때문에 운전자가 유속(M/T)으로 환산하지 않으면 문제를 발생시킬 가능성이 많다. 상압유동층 반응기에서는 단

지 온도와 유속의 관계만을 고려하기 때문에 암산으로 조절할 수 있지만 가압유동층에서는 온도, 압력, 유량의 세 변수사이의 관계를 유기적으로 고려하여야 하기 때문에 암산만으로는 실수할 가능성이 높다. 본 고에서는 가압유동층에서 최소유동화속도와 종말속도에 관한 이론적 배경을 제시하고 그들을 이용하여 압력온도에 따른 적절한 유동화유량의 폭을 산출하고 이로부터 장치의 시동, 정지시 따라야 할 지침을 제시하여 시간과 노력을 절약하는 방안을 제시하고자 한다. 작은 입자인 경우와 큰 입자인 경우의 두 종류의 가압유동층 반응기 실패를 들었다. 이러한 압력-온도-유량사이의 관계는 agglomeration과 entrainment 같은 실수의 방지와 정상상태까지의 시간을 절약할 수 있으며, 이러한 유동층 공정에 대한 지식을 이용하여 가압유동층 반응기의 시동과 정지 과정의 자동화시 algorithm을 제시하는 데에도 필요할 것이다.

2. 이론적 고찰

2-1. 압력이 최소유동화 속도에 미치는 영향

유동화 상태에 대한 압력의 영향은 가스밀도의 변화에 의하여 미치며, 온도의 증가는 밀도와 점도의 변화를 통해서 미친다. 최소유동화속도는 Ergun의 식으로부터 다음과 같이 표시될 수 있다[2].

$$\frac{1.75}{\phi_s \epsilon_{mf}} \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (1)$$

[†]E-mail: ckyi@kier.re.kr

최소유동화 속도에 미치는 압력과 온도의 영향은 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다. 만약 입자의 크기가 작다면 단지 좌변의 두 번째 항만이 중요해진다. 그러므로 u_{mf} 는 μ^{-1} 에 비례한다. 이것은 온도의 증가에 따라 점도가 증가하므로 최소유동화 속도가 온도에 따라 감소할 것으로 예상되어 진다. 밀도에 의한 의존도가 없으므로 압력의 영향은 거의 없다.

큰 입자인 경우 식 (1)의 첫 번째 항이 중요해지고 u_{mf} 는 $\rho_g^{-1/2}$ 에 비례한다. 그러므로 압력의 증가는 u_{mf} 를 감소시키고, 역으로 온도의 증가는 u_{mf} 를 증가시킨다.

2-2. 압력이 종말속도에 미치는 영향

입자의 종말속도는 단일입자의 자유낙하 속도에 의하여 다음 식으로 표시된다.

$$u_t = \left[\frac{4gd_p(\rho_s - \rho_g)}{3\rho_g C_d} \right]^{1/2} \quad (2)$$

Drag 상수 C_d 에 대한 하나로 표현된 식이 없기 때문에 Kunii와 Levenspiel[2]은 레이놀즈 수에 따라 다음과 같은 식들을 제시하였다.

$$u_t = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{for } Re_p < 5.8 \quad (3)$$

$$u_t = \left[\frac{4}{225} \frac{(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{\rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \quad \text{for } 5.8 < Re_p < 540 \quad (4)$$

$$u_t = \left[\frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad \text{for } 540 < Re_p < 200,000 \quad (5)$$

입자의 크기가 작을 경우 식 (3)으로부터 u_t 는 μ^{-1} 에 비례한다. 온도의 증가에 따라 점도가 증가하므로 종말속도는 온도에 따라 감소할 것으로 예상되어 진다. 밀도에 의한 의존도가 없으므로 압력의 영향은 거의 없다. 큰 입자인 경우 식 (5)로부터 $\rho_g^{-1/2}$ 에 비례하고, 중간입자인 경우는 식 (4)로부터 $[\rho_g \mu]^{-1/3}$ 에 비례한다. 입자비산은 입자의 종말속도뿐만 아니라 기포의 크기와 속도에도 밀접한 관계를 갖는다. 유동층에서 실제적인 비탈동반(entainment)은 층표면에서의 기포가 터지면서 일어난다. 압력의 증가는 기포흐름의 증가를 야기시키므로 entrainment도 증가시킬 것이다[1].

2-3. 최소유동화유량, 종말유량과 온도, 압력의 관계

실제 유동층 반응기에는 로타미터나 질량유속제어기(mass flow controller)를 사용하기 때문에 제어실에서는 표준상태(standard or normal)의 유량을 읽을 수 있고, 운전자의 경우도 정상상태의 유량만을 염두에 두고 조업을 한다. 정상상태에서야 아무런 문제가 없지만 조업 조건을 바꾼다든지, 시동, 정지시에는 어차피 압력과 온도가 동시에 변화되기 때문에 유량을 너무 줄이면 비유동화에 의한 agglomeration, 유량을 높이면 entrainment를 일으킬 수 있다.

상압유동층 반응기에서는 단지 온도와 유속의 관계만을 고려하기 때문에 암산으로 조절할 수 있지만 가압유동층에서는 온도, 압력, 유속 세 변수에다가 유량으로 한번 더 환산을 해 주어야 하기 때문에 착오를 일으킬 가능성이 높다. 다음 실제 두 가지 유동층 반응기의 실험을 통해 네 변수 사이의 상호관계를 확인해 보고자 한다.

3. 실험 및 고찰

3-1. 실험 1: 작은 입자의 경우

Table 1은 유동층 촉매반응기의 유동화기체의 밀도, 점도 및 유동

Table 1. Physical properties of fluidizing gas and sample particle in case of small particles

Particle density	5 g/cm ³
Gas density	0.0012 g/cm ³ at 20 °C, 1 atm
Gas viscosity	0.000182 g/cm/s
Mean particle size	0.2 mm
Particle size distribution	0.1-0.3 mm
Particle sphericity	0.86
Voidage of particles	0.5

화 입자의 물리적 특성을 보여준다. 유동화 입자는 Geldart에 의한 분류 B에 해당하는 평균입경이 0.2 mm의 입자이다.

3-1-1. 최소유동화속도

Fig. 1은 식 (2)를 사용하여 온도 압력의 변화에 따라 최소유동화속도와 유량이 어떻게 변하고 있는지 보여준다. 이미 전술한 바와 같이 최소유동화속도는 압력의 변화에 따라 낮은 온도를 제외하고는 거의 일정한 값을 유지한다. Fig. 1(a)와 (b)의 비교에서 보는 바와 같이 유량은 압력에 따라 다른 경향을 갖는다. 압력이 증가함에 따라 최소유동화 유량은 증가하고 있다. 이는 유속을 유량으로 환산할 때 압력이 보정되기 때문이다. 실제 운전을 하면서 압력, 온도의 변화에 따라 순간 순간 최소유동화속도를 계산하고 그를 유량으로 환산하여 그 수치 이상에서 운전하는 것이 최상이겠지만, 실제 운전에서는 번거로운 일이며, 적당한 길을 알고 있다면 그렇게 할 필요가 없다.

Fig. 1(b)의 경우 5 기압, 500 °C가 조업온도라면, 유동화 유량은 최소유동화 유량(점 C)의 3.5배 정도인 9 Nm³/hr이 조업유량이라고 가정하자. 그 유량으로 밸브를 조종해 놓고 장치의 시동시 압력을 먼저 올린 후 온도를 올리면 그림의 A → D → C(Path 2)의 과정을 거

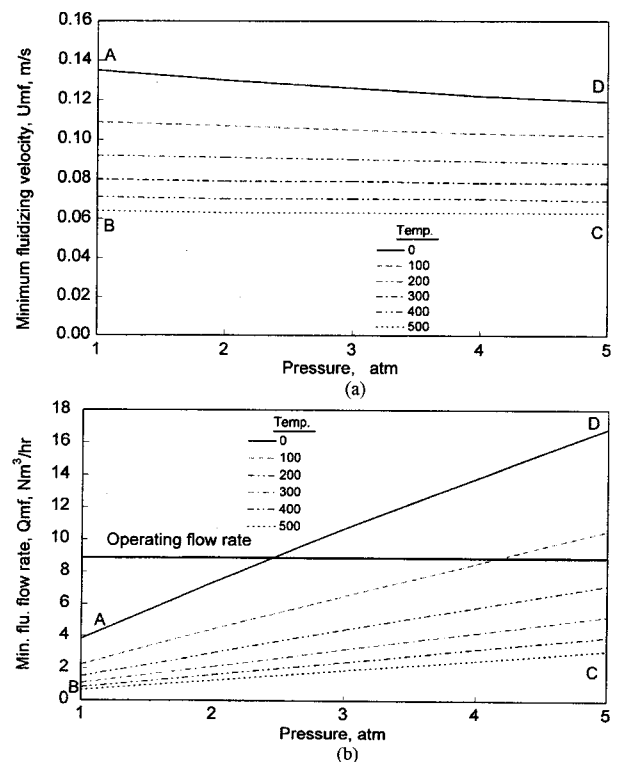


Fig. 1. Effect of pressure and temperature on minimum fluidization velocity(U_{mf}) and minimum fluidization flow rate(Q_{mf}) in case of small particles.

(a) U_{mf} vs. P, (b) Q_{mf} vs. P

친다. 상온, 2.5 기압 정도의 압력부터 증내는 유동화가 되지 않는다. 이러한 상태로 5기압까지 올린 후 온도를 상승시키기 위하여 가열을 하면 유동화에 의한 열전달이 아니라 단지 입자의 전도에 의해서만 열전달이 일어나므로 국부가열에 의한 agglomeration의 가능성이 존재한다.

공정의 시동시 온도를 먼저 올리고 압력을 올리면 그림의 A → B → C(Path 1)의 과정을 거친다. 유량이 9 Nm³/hr으로 고정된 상태에서 온도를 올리면 최소유동화유량은 오히려 줄어들므로 유동화 상태는 상당히 활발해진다. 그 후 압력을 상승시켜도 문제가 없다. 즉 최소유동화속도의 관점에서는 문제가 없다.

공정의 정지시 온도를 먼저 내리고 압력을 내릴 경우 그림의 C → D → A(Path 4)의 과정을 밟는다. 유량이 9 Nm³/hr의 상태에서 온도가 250 °C까지 떨어졌을 때 증내는 유동화가 되지 않는다. 본 예제의 경우는 충분히 온도가 떨어졌기 때문에 문제가 없다. 만일 증내에 열원이 되는 물질이 남아있고, 발열반응이고, 물질의 점화온도(light-off temperature)가 그 온도보다 낮다면 이 또한 agglomeration의 가능성이 있다.

정지시 압력을 먼저 내리고 온도를 내릴 경우는 C → B → A(Path 5)의 과정을 밟는다. 공정이 갑작스럽게 긴급하게 정지된다면, 정전의 경우 이와 같은 경우가 생길 수 있다. 압력이 떨어지는 속도가 온도가 떨어지는 속도에 비하여 빠르기 때문에 정전시 이와 같은 과정을 밟는다. 이때에는 최소유동화속도 관점에서는 전혀 문제가 없다.

3-1-2. 입자종말속도

Fig. 2(a)는 압력, 온도의 변화에 따른 입자의 종말속도의 관계를 보여주고 있다. 0.1-0.3 mm 입자 중 작은 입자부터 비산되므로 본 계산에는 가장 작은 크기인 0.1 mm를 사용하여 계산하였다. 앞의 이론적 고찰에서와 같이 u_t 는 μ^{-1} 에 비례하였는데, 온도의 증가에 따라

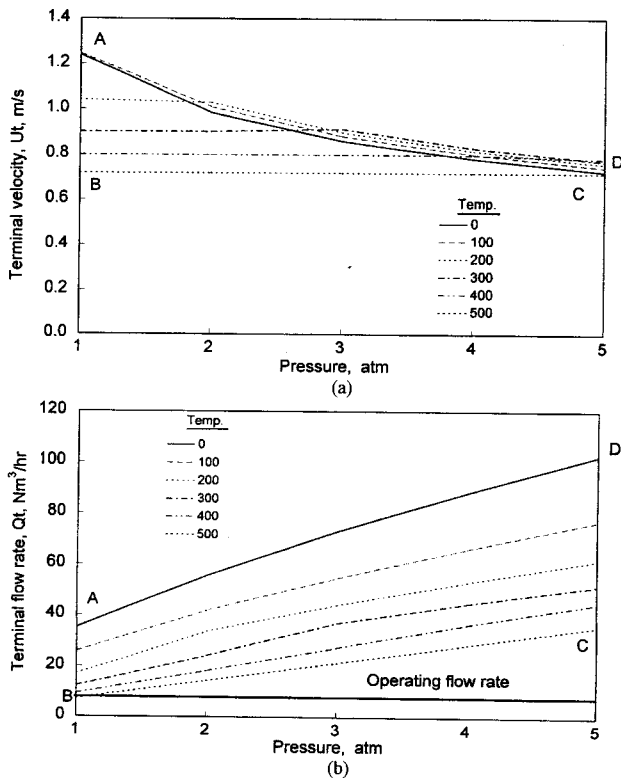


Fig. 2. Effect of pressure(P) and temperature(T) on terminal velocity(U_t) and terminal flow rate(Q_t) in case of small particles.
(a) U_t vs. P, (b) Q_t vs. P

Table 2. Physical properties of fluidizing gas and a sample particle in case of large particles

Particle density	7 g/cm ³
Gas density	0.0012 g/cm ³ at 20 °C, 1 atm
Gas viscosity	0.000182 g/cm/s
Mean particle size	5 mm
Particle size distribution	2-10 mm
Particle sphericity	0.70
Voidage of particles	0.48

점도가 증가하므로 종말속도는 온도의 증가에 따라 감소하고 있다. 압력의 영향은 온도가 높은 경우에는 거의 없다. 그러나 온도가 낮은 경우에 압력이 높아지면서 불연속선이 나타나고 있다. 그 조건에서 레이놀즈 수가 식 (3)에서 (4)로 경계를 넘어섰기 때문이다.

Fig. 2(b)는 종말속도를 종말유량으로 환산한 것이다. 종말속도의 경우에는 0 °C의 경우 압력에 따라 감소하였으나, normal 종말유량의 경우는 압력에 따라 증가하며, 불연속선도 거의 사라지고 있다.

시동(start-up)시 유량을 원하는 조업유량인 9 Nm³/hr에 맞춘 후, 온도를 먼저 올리고, 압력을 올리면(Path 1: A → B → C), 압력 1 기압, 온도가 400 °C되었을 때 작은 입자부터 비산이 시작된다. 온도가 더 올라갔을 때, 더 큰 입자도 비산유출될 것이다. 온도가 500 °C된 후 압력을 올리면 조업유량이 종말속도보다 적게 유지되므로 비산유출은 멈출 것이다.

시동시 압력을 먼저 올리고, 온도를 올리면(Path 2: A → D → C), 종말유량이 상당히 높기 때문에 비산유출의 염려는 전혀 없다.

정지시 온도를 먼저 내리고 압력을 내리면(Path 4: C → D → A), 시동시의 Path 2에서와 같이 종말유량이 높기 때문에 비산유출의 염려는 전혀 없다.

정지시 압력을 먼저 내리고 온도를 내리면(Path 5: C → B → A), 기압이 1.5 기압 정도에서부터 비산유출이 시작된다. 가능하다면 이 제책은 피해야 한다.

3-2. 실험 2: 큰 입자의 경우

Table 2는 큰 입자의 경우 유동화기체의 밀도, 점도 및 유동화 입자의 물리적 특성을 보여준다. 유동화 입자는 Geldart에 의한 분류 D에 해당하는 크고 무거운 평균입경이 5 mm의 입자이다.

3-2-1. 큰 입자의 최소유동화속도

Fig. 3은 식 (2)를 사용하여 평균입경 5 mm의 최소유동화속도와 유량이 온도와 압력에 따라 어떻게 변하고 있는지 보여준다. Fig. 3(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 입자크기가 클 경우에는 압력이 증가함에 따라 최소유동화속도는 감소한다. 작은 입자의 경우 거의 일정한 값을 갖는 것과 대조를 이룬다. 온도의 영향은 작은 입자의 경우와 정반대의 경향을 보인다. 온도가 증가함에 따라 증가한다. Fig. 3(b)는 최소유동화유량의 온도 압력에 따른 경향을 3차원으로 표시하였다. 최소유동화유량은 온도의 증가에 따라 감소하고, 압력의 증가에 따라 증가하는 경향을 보여준다. 이는 Fig. 1(b)의 작은 입자의 경우와 같은 경향이다. 유속에서 표준상태의 유량으로 환산할 때 온도와 압력 보정의 영향이 밀도, 점도의 변화보다 더 크기 때문이다.

Fig. 3(b)의 경우 9 기압, 1,000 °C가 조업온도라면, 유동화유량은 최소유동화 유량(점 C)의 2배 정도인 6,000 Nm³/hr가 조업유량이라고 가정하자. 공정의 시동시 온도를 먼저 올리고 압력을 올리면 그림의 A → B → C(Path 1)의 과정을 거친다. 유량이 고정된 상태에서 온도를 올리면 최소유동화유량은 오히려 줄어들므로 유동화 상태는 활발해진다. 그 후 압력을 상승시켜도 문제가 없다. 즉 최소유동화속도의 관점에서는 문제가 없다. 역으로 정지시 압력을 먼저 내리고

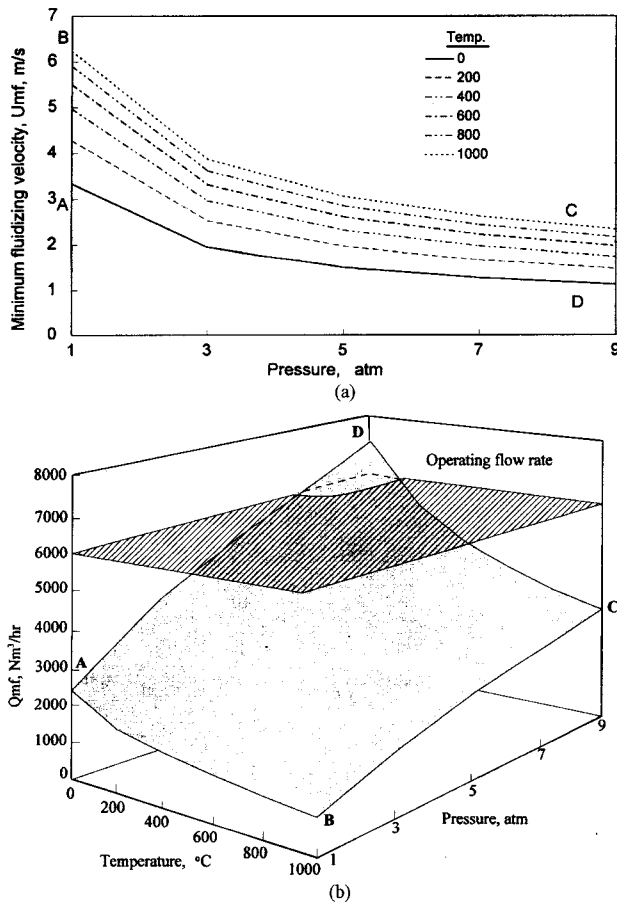


Fig. 3. Effect of pressure and temperature on minimum fluidization velocity(U_{mf}) and minimum fluidization flow rate(Q_{mf}) in case of large particles.

(a) U_{mf} vs. P, (b) Q_{mf} vs. P

온도를 내릴 경우[C → B → A(Path 5)]에도 최소유동화속도 관점에서 전혀 문제가 없다.

공정의 시동시 압력을 먼저 올린 후 온도를 올리면 그림의 A → D → C(Path 2)의 과정을 거친다. 상온, 6 기압 정도의 압력부터 층내는 유동화가 되지 않는다. 이러한 상태로 9 기압까지 올린 후 온도를 상승시키기 위하여 비유동화 상태에서 가열을 하면 국부가열에 의한 agglomeration의 가능성이 존재한다. 공정의 정지시에도 역 궤적으로 그림의 C → D → A(Path 4)의 과정을 밟으면 이 또한 agglomeration의 가능성이 있다.

3-2-2. 큰 입자의 입자종말속도

Fig. 4(a)는 압력, 온도의 변화에 따른 입자의 종말속도의 관계를 보여주고 있다. 2-20 mm 입자 중 작은 입자부터 비산되므로 본 계산에는 가장 작은 크기인 2 mm를 사용하여 계산하였다. 앞의 이론적 고찰에서와 같이 u_t 는 식 (5)로부터 $\rho_s^{-1/2}$ 에 비례하였는데, 온도의 증가에 따라 밀도는 감소하므로 종말속도는 온도의 증가에 따라 증가한다. 압력의 증가에 따라 밀도도 증가하므로 종말속도는 감소한다.

Fig. 4(b)는 종말속도를 종말유량으로 환산한 것으로 Fig. 2(b)의 작은 입자의 경우와 같은 경향을 보여준다. 시동(start-up)시 유량을 원하는 조업유량인 6,000 Nm³/hr에 맞춘 후, 온도를 먼저 올리고, 압력을 올리면(Path 1: A → B → C), 압력 1 기압, 온도가 800 °C 되었을 때 작은 입자부터 비산이 시작된다. 시동시 압력을 먼저 올리고, 온도를 올리면(Path 2: A → D → C), 종말 유량이 상당히 높기 때문에

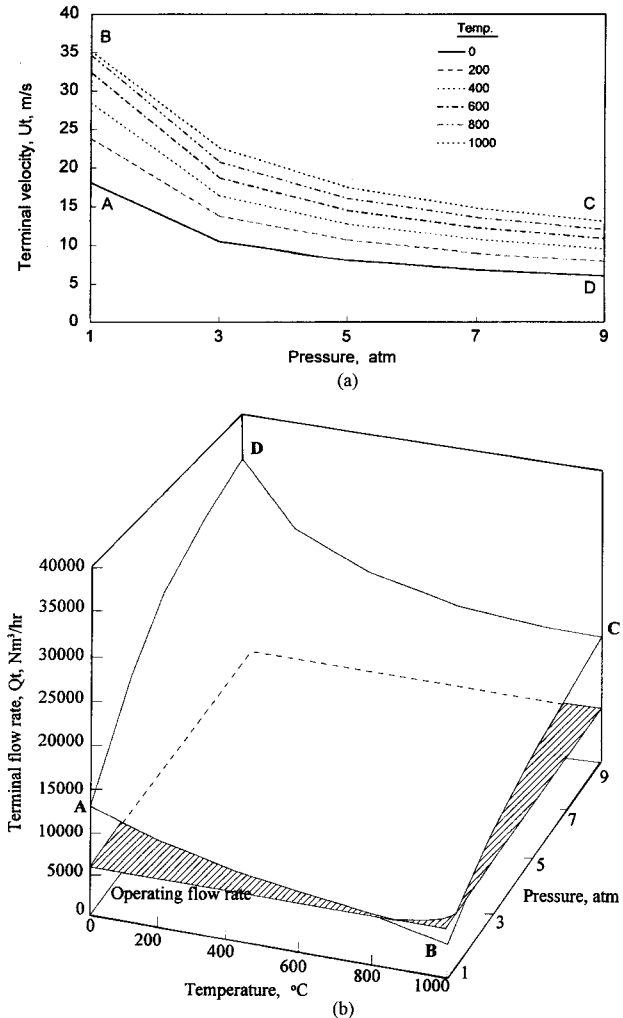


Fig. 4. Effect of pressure(P) and temperature(T) on terminal velocity (U_t) and terminal flow rate(Q_t) in case of large particles.

(a) U_t vs. P, (b) Q_t vs. P

비산유출의 염려는 전혀 없다.

정지시 온도를 먼저 내리고 압력을 내리면(Path 4: C → D → A), 시동시의 Path 2에서와 같이 종말유량이 높기 때문에 비산유출의 염려는 전혀 없다. 정지시 압력을 먼저 내리고 온도를 내리면(Path 5: C → B → A), 기압이 1.5 기압 정도에서부터 비산유출이 시작된다. 가능하다면 이 궤적은 피해야 한다. 종합적으로 유량(Q_{mf} & Q_t)-온도(T)-압력(P)의 관계는 입자가 작은 입자이건 큰 입자이건 같은 경향을 갖는다.

3-3. 최적궤적의 제안

토의 되어진 Fig. 1(b), Fig. 2(b), Fig. 3(b)와 Fig. 4(b)의 각 궤적에 따른 유동화 상태를 Table 3에 정리하였다. 우선 agglomeration의 가능성이 있는 D 꼭지점을 지나는 시동시 A → D → C 궤적(Path 2)과 정지시의 C → D → A 궤적(Path 4)은 가능한 한 피하는 것이 좋을 것이다.

비산유출의 가능성이 있는 B 꼭지점을 지나는 시동시 A → B → C 궤적(Path 1)과 정지시의 C → B → A 궤적(Path 5)은 조업유속이 낮은 경우는 종말유속 미만에서도 조업이 이루어질 수 있다. 온도와 압력을 동시에 조절하는 A → C 궤적(Path 3)과 정지시의 C → A 궤적(Path 6)은 이상적인 궤적이나 조업자가 연속적으로 압력제어기에

Table 3. Fluidization qualities according to pressure and temperature conditions when it starts-up and shuts-down

	At constant flow rate	Path	Fluidization quality	Entrainment
Start-up	Increase temperature and increase pressure	Path 1: A → B → C	Good	Much
	Increase pressure and increase temperature	Path 2: A → D → C	Defluidization	No
	Increase temperature and pressure step by step	Path 3: A → C	Good	Little
Shut-down	Decrease temperature and decrease pressure	Path 4: C → D → A	Defluidization	No
	Decrease pressure and decrease temperature	Path 5: C → B → A	Good	Much
	Decrease pressure and temperature step by step	Path 6: C → A	Good	Little

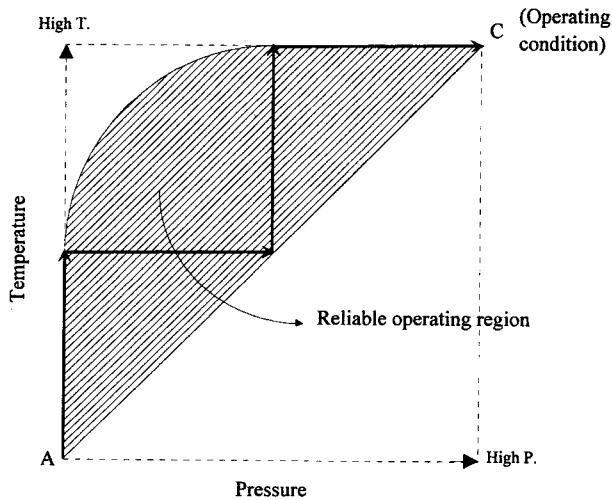


Fig. 5. An optimum path for start-up and shut-down.

매달려 단계적으로 압력을 조절하여야 하는 노력이 따른다. 그러므로 agglomeration을 제일 먼저 피하고, 비산유출도 줄이며, 조업자의 노력도 절감할 수 있는 대안의 궤적이 제안될 수 있다.

시작 정지시 온도 압력변화의 최적 궤적으로서 Fig. 5의 사선 친부분을 제안하였다. 초기의 상압, 상온조건(A)와 조업조건인 고온 고압 조건(C)사이에서 변화시킬 때 사선 친 부분에서 온도와 압력을 변화시키면서 조업하는 것이 적정한 궤도로 사료된다. 본 그림에서 한 예로서 실선으로 그려진 궤적을 따라가면 2단계 정도의 조업을 하면 된다. 온도를 먼저 반을 올린 후 압력을 반 올리고, 나머지 온도를 다 올린 후 압력을 올리면, agglomeration의 위험성도 피할 수 있고, 미분의 비산유출도 막을 수 있으며, 시동시의 노력도 절감할

수 있다. 정지시에는 역으로 같은 궤적을 쫓아 압력을 먼저 반정도 떨어뜨린 후 온도를 반 내리고, 다시 나머지 압력을 내린 후, 온도를 완전히 내리면, 문제점없이 빠르게 상온 상압 조건으로 돌아간다.

본 연구에서는 비산유출을 해석하기 위하여 간단하게 입자의 종말속도를 사용하였다. 실제 비산유출은 기포의 거동에 의하여 발생하므로 좀더 정확한 궤적을 예측하기 위해서는 향후 기포에 의한 entrainment 해석이 이루어져야 할 것이다.

4. 결 론

가압유동층 반응기의 시동과 정지시 유동층에서 가장 기본적인이라고 할 수 있는 최소유동화속도와 종말속도를 이용하여 조업상 발생할 수 있는 가장 큰 문제점인 agglomeration과 비산유출을 막을 수 있는 온도와 압력변화의 궤적에 관하여 고찰하였다. 조업자의 안전 운전에도 도움을 주기 위하여 그 이론적 고찰을 바탕으로 하여 시동, 정지시 온도 압력 조건변화의 적정궤적을 제시하였다.

감 사

본 연구는 대체에너지 기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구비지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Fueyo, N. and Dopazo, C.: "Fluidization Fundamentals", in Pressurized Fluidized Bed Combustion edited by Cuenca, M. A. & Anthony, E. J., Blackie Academic & Professional Ltd., 68(1995).
2. Kunii, D. and Levenspiel, O.: "Fluidization Engineering", John Wiley & Sons, Inc., 72(1969).