

PSA 공정에서 흡착탑내 압력강하의 영향

양재영, 이창하, 이한주
연세대학교 공과대학 화학공학과

The effect of pressure drop along the adsorption bed in PSA process

Jaeyoung Yang, Chang-Ha Lee, Hanju Lee
Dept. of Chem. Eng., Yonsei university, Korea

서론

PSA(Pressure Swing Adsorption) 공정의 응용이라는 측면에서 중요한 두가지 형태는 비교적 공정주기가 긴 다탑 PSA 공정과 하나의 흡착탑으로 짧은 시간동안 두 개 또는 세개의 step을 사용하는 RPSA(Rapid Pressure Swing Adsorption) 공정으로 대별될수 있다. RPSA 공정은 흡착탑의 입구에서 1초 이하의 시간동안 가압과 감압을 주기적으로 반복하면서 계속적으로 출구에서 product를 얻는 공정으로, 크기(200-700 μm)가 매우작은 흡착제를 사용하므로 흡착탑내 압력강하가 다탑 PSA와는 다른 매우 두드러진 특징이라고 할 수 있다[1,2,3]. 한편 다탑 PSA공정에서는 상대적으로 큰 흡착제를 사용하므로 일반적으로 흡착탑내 압력강하가 그다지 크지 않다고 가정하여 압력의 축방향 구배를 무시하는 경향이 있다. 그러나 다탑 PSA공정에서도 압력강하가 존재할 수 있는 가압과 감압단계가 존재하고, 상용의 흡착탑은 그 길이가 수십미터에 달하기 때문에 압력강하의 영향을 완전히 무시하기는 힘들것으로 사료된다. 그럼에도 불구하고 압력강하에 대한 기존의 연구는 주로 RPSA에 국한되었고 다탑 PSA공정에서의 탑내 압력강하의 영향은 찾아보기 어려운 형편이다. 그러므로 RPSA 공정의 설계에 있어서 뿐만 아니라 다탑 PSA공정에서의 축방향의 압력강하의 동특성을 연구하는 것은 PSA공정의 보다 정확한 설계자료를 얻어내는데 매우 중요한 일이라 할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 RPSA의 흡착탑과 같은 조건하에서의 압력강하와 다탑 PSA 공정에서의 흡착탑내 압력강하의 동특성을 알아보고, 비등온-단열계에서 압력강하가 전체 공정의 결과에 미치는 영향을 수치적 해석을 통하여 알아보고자 한다.

이론

흡착탑을 동적모델링을 하기 위해 세운 가정은 다음과 같다.

- ㄱ) 흡착제와 기상은 열적 평형상태에 있다.
- ㄴ) 기상은 이상기체이다.
- ㄷ) 흡착속도는 LDF 모델로 표현될 수 있다.
- ㄹ) 관벽에서의 축방향의 열전도는 없다.

위와 같은 가정을 바탕으로 하여 세운 물질 및 에너지 수지식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[3,4].

$$-D_L \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} + \frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial u C_i}{\partial z} + \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \rho_p \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$C \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \rho_p \sum_{i=1}^n \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$(\alpha \rho_g C_{p_g} + \rho_B C_{p_B}) \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_g C_{p_g} \epsilon u \frac{\partial T}{\partial z} - \rho_B \sum_i Q_i \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial t} + \frac{2h_i}{R_{Bi}} (T - T_w) = 0 \quad (3)$$

$$\rho_w C_{p_w} A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = 2\pi R_{Bi} h_i (T - T_w) - 2\pi R_{Bo} h_o (T_w - T_{am}) \quad A_w = \pi(R_{Bo}^2 - R_{Bi}^2) \quad (4)$$

일반적으로 흡착탑내 압력강하는 정상상태 운동량수지(steady state momentum balance)인 다음과 같은 Ergun equation을 주로 사용한다[5].

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{150\mu\epsilon u (1-\epsilon)^2}{4R_p^2 \epsilon^3} + 1.75\rho(\epsilon u)^2 \frac{(1-\epsilon)^2}{2R_p \epsilon^3} \quad (5)$$

여기서 RHS의 두 term은 각각 유체의 점성과 유속에 의한 압력강하를 주로 반영하며, 일반적으로 흡착탑내를 흐르는 기체의 Reynolds number는 매우 작으므로 첫째 항만을 생각하는 경우가 많고 이때 Ergun equation은 Darcy's law로 불리어 진다. 이와같은 연립 편미분 방적식들을 풀기위해 backward two step FDM을 사용하였으며, 이용된 경계조건은 다른 문헌에서 찾아볼 수 있다[3,4].

결과 및 토론

흡착탑내 압력의 변화를 정확히 예측하기 위해서는 흡착탑내 압력강하를 나타내는 Ergun equation을 사용하는것 외에도 각 밸브에서의 압력강하를 정확히 예측하는 valve equation을 사용하여야 한다. 그러나 본 연구에서는 흡착탑내에서의 압력강하만을 고려하였다. Figure 1에 RPSA용 흡착탑에서 가압단계시 짧은 시간동안 나타나는 압력의 구배를 나타낸것이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 가압초기에는 매우 큰 압력구배가 있으며, 시간이 지남에 따라 그 구배가 감소해감을 알 수 있다. 특히 흡착탑의 입구부분에서 압력구배가 심하게 나타나고 있다. 일반적으로 RPSA 공정에서는 이러한 압력구배가 없어지기 전에 다음 단계인 감압단계로 들어가기 때문에 그 주기가 매우 짧아야 함을 알수가 있다.

다탑 PSA 공정에서 사용되는 흡착탑에서의 압력강하의 현상을 살펴보기 위해서 임의의 흡착탑(길이 10 m, 직경 5 cm)을 사용하여 가압단계에서의 입구부분과 출구부분의 압력의 비를 시간별로 도시해 보았다. 이 그림에서 알 수 있듯이 가압초기에는 그 압력의 비가 매우크게 나타남을 알 수 있으며, 약 13초 이후에야 그 압

력구배가 거의 없어짐을 알 수 있다. 그 이후와 흡착단계에서의 압력강하는 거의 무시할만 하였다. 그러므로 이 그림에서 알 수 있듯이 탑내 압력의 변화가 심한 가압이나 감압단계에서는 압력강하를 무시하는 가정은 그다지 바람직하지 않으나 그 압력변화가 심하지 않은 흡착단계나 정화단계에서의 압력강하는 무시가능함을 알 수 있다. 이처럼 가압단계에서의 매우 큰 압력강하의 영향을 살펴보기 위해 $H_2/CO(7/3)$ 혼합기체를 이용하여 가압을 거친후 흡착단계에

서 출구에서의 배출류의 물분율을 이론적으로 살펴봄으로서 그 영향을 고찰하고자 하였다. 이론을 위한 기초 데이터는 문헌을 참고하였다[6]. Figure 3에서 보인바와 같이 압력강하를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우는 상당한 파과시간(breakthrough time)의 차이를 보이고 있는데, 이는 주로 가압단계시 흡착탑내 입구 부분에서의 압력강하가 커서 나타나는 유속의 증가로 인하여 나타나는 현상으로 사료된다. 즉, 압력강하는 입구부분에 도입되는 유속을 상대적으로 크게 예측하기 때문에 가압단계시 도입유량이 많아지고 그러므로 파과시간이 짧아지는 결과를 유발한것으로 사료된다. 여기서 알 수 있듯이 가압단계는 흡착단계의 시간에 비해 상대적으로 매우 짧은 시간 동안이지만 압력강하의 영향은 매우 지대하고 그 효과가 흡착단계에 까지 미침을 알수가 있다. 한편 순도면에서는 그다지 큰 영향을 나타내지 않고 있는데, 이는 순도의 경우 흡착단계에서의 흡착압력이 더 크게 영향을 미치나 흡착단계에서의 압력강하는 그다지 크지 않기때문이다. 그러므로 위의 결과를 감안할때 흡착단계에서의 압력강하뿐만 아니라 감압단계에서의 압력강하까지 고려한다면 전체 다탑 PSA 공정성능의 예측결과는 압력강하를 고려할때와 그렇지 않을때 차이가 있을것을 예측할수 있다.

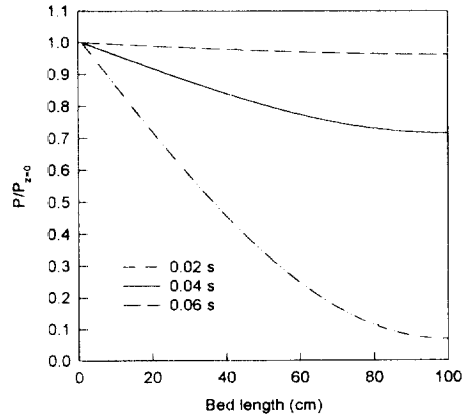


Figure 1 Pressure profile in the adsorption bed during pressurization step for RPSA bed.

참고문헌

1. Alpay, E., Kenney, C.N., and Scott, D.M., *Chem. Eng. Sci.*, **49**, 3059(1994)
2. Sundaram, N. and Wankat, P.C., *Chem. Eng. Sci.*, **43**, 123(1988)
3. Ruthven, D. M., Farooq, S., and Knaebel, K.S., "Pressure Swing Adsorption," VCH publisher, Inc.(1994)
4. Farooq, S., Hassan, M.M., and Ruthven, D.M., *Chem Eng. Sci.*, **43**, 1017(1988)
5. Buzanowski, M.A., Yang, R.T., and Hass, O.W., *Chem. Eng. Sci.*, **44**, 2392(1989)
6. Yang, J., Han, S., Cho, C., Lee, C.H., and Lee, H., *Separation Technology*, in print

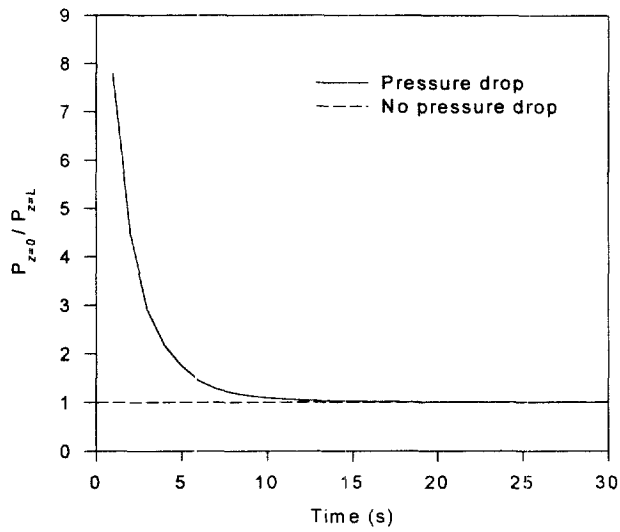


Figure 2. Effect of pressure drop in pressurization step for multibed PSA process.

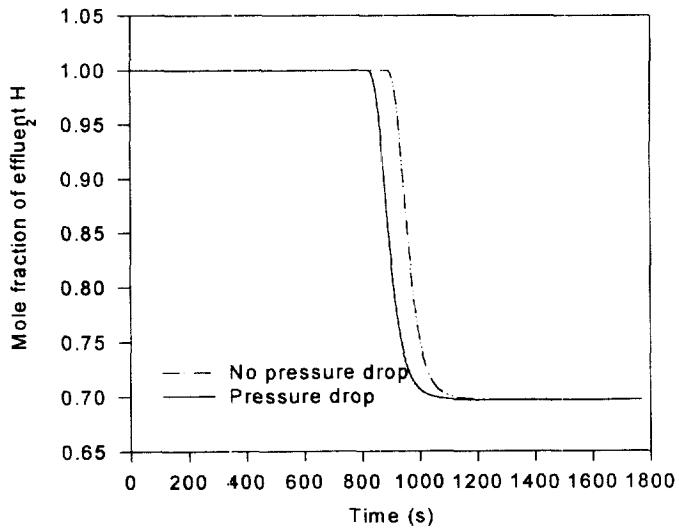


Figure 3. Effect of pressure drop on breakthrough curve.