

벤젠 흡착공정에서의 물질전달계수에 관한 연구

권준호, 최문규, 서성섭*

홍익대학교 공과대학 화학공학과
121-791 서울특별시 마포구 상수동 72-1
(2008년 2월 14일 접수 2008년 3월 10일 채택)

Measurement of Mass Transfer Coefficients in a Benzene Adsorption Process

Jun-Ho Kwon, Moon Kyu Choi, and Sung-Sup Suh*

Department of Chemical Engineering, Hongik University
72-1 Sangsu-dong, Mapo-gu, Seoul 121-791, Korea

(Received for review February 14, 2008; Revision accepted March 10, 2008)

요 약

흡착공정의 흡착속도를 표현하는 여러 가지 물질전달 모델들 가운데, 식의 형태가 비교적 간단한 선형추진력(Linear Driving Force, LDF) 모델이 많이 사용된다. 본 연구에서는 벤젠을 분리 및 제거하기 위한 실제 흡착공정에서 이 물질전달모델의 적용가능성을 알아보고자 하였다. LDF모델에 의한 전산모사 결과와 동적 실험에서 구한 실험값을 비교함으로써 흡착공정의 물질전달 계수를 구하였다. 여러 다른 값의 온도 및 압력에서 얻은 파과곡선을 이용하여 물질전달계수의 온도 및 압력에 대한 의존관계를 알아보았다. 물질전달계수의 온도와 압력에 대한 의존성은 각각, 아레니우스함수와 지수함수 형태의 경험식으로 표현할 수 있었다.

주제어 : 물질전달계수, 선형추진력모델, 흡착, 벤젠

Abstract : Among various mass transfer models to express adsorption rates for any adsorption processes, the linear driving force (LDF) model is used most. The present investigation aims at finding whether this model may be applied to real adsorption process for separation and removal of benzene. Comparison of numerical simulation results calculated by the LDF model with experimental data allowed us to find the mass transfer coefficients that are most appropriate for a specific adsorption process. Various breakthrough curves were obtained from experiments performed at many different temperatures and pressures, which in turn produced suitable mass transfer coefficients. These dependencies of mass transfer coefficient on temperature and pressure were represented by an Arrhenius type- and a power law type empirical equation, respectively.

Key words : Mass transfer coefficient, LDF model, Adsorption, Benzene

1. 서 론

대기 중의 오염입자의 증가는 대기의 광화학반응으로 이어져 인류에게 큰 피해를 주고 있다. 이러한 광화학반응의 전구물질 중 가장 대표적인 것이 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOC)이다. 그 중에서 벤젠은 여러

분야에서 널리 사용되고 있는 대표적인 VOC 중 하나이다. 대기로 방출되는 VOC의 양을 줄이거나 제거하는 기술로 여러 가지가 있지만 과량의 기체 속에 미량 섞여 있는 유기화합물을 효과적으로 제거하고 회수할 수 있는 방법 중 하나가 흡착공정을 이용하는 것이다[1-4]. 이러한 흡착공정의 효과적인 설계와 효율적인 조작을 위하여 간단하면서도 공정을 잘 모

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail address: suhss@wow.hongik.ac.kr

사하는 모델이 필요하고 그 모델에서 사용될 파라미터를 결정하는 절차가 공정설계에서 필수적이다[5].

흡착과정에 대한 논의는 회분시스템에서 실험적으로 얻은 시간에 따른 농도변화의 분석을 통해서도 가능하지만 흡착제와 흡착질 사이의 흡착과정은 일정한 조성을 갖는 균일 혼합물인 경우보다는 일반적으로 벌크상태의 유체흐름 중에 일어나는 경우가 대부분이며, 실제 공정에 직접 응용되기 위해서는 좀 더 복잡한 예측이 필요하다. 따라서 세부적인 공정모사를 위해서 단일입자에서의 흡착거동과 함께 유체흐름의 유동과 흡착제의 구조적 특성에 의해 해석될 수 있는 동적흡착거동에 대한 연구가 필수적으로 요구된다.

여러 가정들을 도입한 이론을 토대로 해석된 등온흡착곡선식들은 단일성분의 흡착질에 대해서는 비교적 실험결과를 잘 표현하지만 산업체에서 조업되고 있는 공정의 조건 하에서는 현실과 어긋나는 경우들이 흔히 존재한다. 다성분 혼합 흡착질의 경우 기체들 사이에 고려되지 않은 상호작용으로 각 성분에 대한 흡착평형을 정확히 나타내는 데는 한계가 있다. 또한 실제 흡착공정에서 기본적으로 필요한 설계자료는 혼합기체 각각의 등온흡착곡선이다. 그러나 혼합기체의 흡착특성을 실험적으로 측정하는 데는 여러 실험변수들로 인한 실험상의 오차를 감수하여야 하고 반복작업을 해야 하는 어려움이 있어서 혼합기체의 흡착특성 계수들을 직접 추산하는 경우는 드문 편이고, 주로 순수기체의 등온흡착식으로 얻은 각 계수들만으로 혼합기체의 흡착특성을 예측할 수 있는 모델들이 흔히 사용되고 있다[6-8]. 등온흡착특성 이외에도 흡착제로 충전된 탭에서 실제로 조업되는 흡착공정의 설계를 위해서는 물질전달특성의 정량적인 표현도 필요하다.

본 연구에서는 벤젠의 흡착공정 설계에서 동시에 필요한 등온흡착특성과 물질전달특성, 이 두 가지 중에서 등온흡착특성은 미리 구해진 값을 사용함으로써 물질전달계수의 측정에 더 정확성을 기하였다[9]. 활성탄으로 충전된 탭 안에서 진행되는 흡착공정의 물질전달특성은 비교적 간단하면서도 실제 상황을 표현하는데 적합한 형태로 알려진 선형추진력(linear driving force, LDF)모델을 사용하였다.

VOCs의 대표물질인 벤젠 성분이 활성탄 흡착탑을 통과할 때 시간에 따라 얻어지는 출구에서의 농도 변화를 실험적으로 구하고 이 결과를 모델에 의한 모사결과와 비교하여 총괄물질전달계수를 구하는 것을 목표로 하였다. 벤젠을 증기화하여 공급되는 흡착질 농도를 조절하고 흡착탑의 조업조건을 변화시키면서 파과실험을 진행하였다. 실험결과를 토대로 온도와 압력이 물질전달계수에 미치는 영향을 정량적으로 분석함으로써 벤젠 흡착공정설계에 필요한 기초자료를 제시하였다.

2. 이 론

2.1. 흡착탑 내 기체성분의 동적거동

기상 흡착질과 흡착제 사이의 물질전달과정은 흡착제 표면까지의 물질전달과 흡착제 내부로의 물질전달로 나누어 구분할 수 있다. 전자의 경우는 다시 유체의 유동특성에 의하여 흡착

제 주위에 형성된 기체막까지의 전달과 흡착제 외부 기체막을 통과하는 과정의 경막물질전달저항(external film resistance)으로 나눌 수 있다. 이렇게 하여 흡착제 입자표면까지 전달된 흡착질은 흡착제 표면에 직접 흡착되거나 다공성 흡착제의 세공 안에서 흡착된다. 이 때, 기체분자의 물리적 특성 및 기공의 구조적 형태에 따라 기공 내 확산속도가 결정되는데, 크게 거대기공확산(macropore diffusion)과 미세기공확산(micropore diffusion)으로 분류한다. 두 영역에서 기체는 각각 분자확산(molecular diffusion)과 Knudsen 확산에 의한 분자운동으로 설명할 수 있다. 또한 표면확산(surface diffusion)이 작용하기도 한다.

일반적인 흡착공정에서는 유체의 빠른 유속으로 인하여 경막 물질전달저항에 비해 기공확산이 흡착속도에 지배적으로 영향을 미치는 경우가 많다. 물질전달은 위와 같은 경로로 순차적으로 진행되며, 흡착제의 총괄 유효흡착속도는 각 단계의 물질전달저항을 모두 포함한 속도를 의미한다.

물질전달저항이 전혀 없는 플러그 흐름의 경우라면 출구에서 농도응답은 탭 내부에서 지체되는 체류시간만이 반영된 파과형태로 나타난다. 이럴 경우에 혼합기체의 흡착평형모델을 적용한 해석하는 Suh and Wankat[10]에 의해 연구되었다. 이러한 국부평형(local equilibrium)모델에서는 등온흡착식만을 고려하여 탭 내부의 농도 분포에 대한 해석해를 얻을 수 있다. 이 경우에는 지배식이 비선형 파동식으로 표현되어, 탭 내부의 농도곡선은 충격파(shock-wave) 형태가 된다. 특성화 방법(method of characteristic)을 이용하여 이 파동의 위치를 알아내면 탭 내부의 농도 분포를 시간과 위치의 함수로 표현할 수 있는 것이다. 이처럼 물질전달저항이 존재하지 않는다는 가정 하의 국부평형모델은 농도파과곡선과 속도파과곡선의 예측에 일차적인 예측결과를 제공해 주는 편리한 점이 있다.

반면에 실제 시스템에서는 파과곡선이 물질전달저항의 영향으로 분산된 형태의 응답으로 얻어지게 된다. 물질전달저항이 커지게 될수록 파과곡선에 더 넓은 물질전달 구간이 나타나며 파과시간에도 영향을 미치게 된다. 파과시간에 의해서는 흡착평형에 관련된 정보를 얻을 수 있고, 분산정도로는 흡착과정 중에 지배적으로 작용하는 물질전달의 영향을 예측할 수 있다.

2.2. 흡착공정의 모사

본 연구의 실험결과 해석을 위한 모델에 사용한 등온흡착식은 기상 혼합물의 흡착평형을 잘 예측해 줄 수 있는 coupled Langmuir isotherm이다. 흡착질에 대한 상수들은 Arrhenius 식에 의해 온도와 상관계수로 표현된다. 평형흡착량(q_i^*)을 분압 p_i 의 함수로 표현한 등온흡착식에 들어가는 파라미터인 K_i , b_i 값들은 이전의 연구[9]에서 정적흡착실험 방법으로 구해진 결과를 사용하였다.

$$q_i^* = \frac{K_i b_i}{1 + \sum_j b_j p_j} \quad (1)$$

물질전달모델 중에서는 자세한 모델일수록 현상을 잘 묘사

한다는 점에서는 의미가 있지만 모델식이 복잡하고 모델에 들어가는 파라미터가 많기 때문에 실험결과와의 비교를 통해서 신뢰성 있는 값을 얻기가 힘들어진다. 예를 들어서 기공확산모델(pore diffusion model)에서는 흡착제 안의 위치에 따라서도 농도가 변하기 때문에 독립변수로서 구형흡착제 반경 방향으로의 길이가 필요하다. 본 연구에서는 비교적 간단한 형태로서 공정 설계에 도입하기 용이하고 실제 조업결과의 예측에 유용한 것으로 알려진 LDF 모델을 사용하였다.

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} = k_i (q_i^* - q_i) \quad (2)$$

이 모델에서는 물질전달속도를 유체상의 농도에 대한 평형 흡착량(q_i^*)과 흡착된 흡착질의 실제 흡착량(q_i)과의 차이에 비례한다고 가정한다. 실제 흡착량의 표현에서는 흡착제 내부의 평균값만을 고려한다. 흡착량의 시간(t)에 따른 증가속도는 물질전달계수인 k_i 에 의해서 결정된다. 일반적으로 고체흡착제 내부로 확산이 일어날 때에 기공확산모델 대신에 LDF식을 사용하여도 시간에 따른 흡착량 변화가 거의 비슷한 결과로 얻어진다. 이 모델은 간단함에도 불구하고, 흡착공정 조업결과의 전체적인 형태를 정성적으로뿐만 아니라 정량적으로도 잘 나타내는 것으로 알려져 있다.

흡착탑 내부에서 기체가 흘러가는 과정에 대한 물질수지식

의 표현에서는 압력강하는 무시하였으며 흡착탑 지름방향의 속도나 농도구배는 없다고 가정하였다. 또한 등온공정으로서 이상기체를 가정하였다. 여러 성분이 혼합되어 있는 다성분계에서 각 성분과 혼합기체에 대한 흡착탑 내의 물질수지식은 각각 아래와 같이 표현된다.

$$\epsilon \frac{\partial C_i}{\partial t} + \epsilon \frac{\partial (uC_i)}{\partial z} + (1-\epsilon)\rho_p \frac{\partial q_i}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$\epsilon \frac{\partial C}{\partial t} + \epsilon \frac{\partial (uC)}{\partial z} + (1-\epsilon)\rho_p \sum_j \frac{\partial q_j}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

여기에서 C_i 는 i 성분의 농도, C 는 전체 농도, u 는 벌크흐름의 선속도, ϵ 는 공극률, ρ_p 는 고체입자의 밀도이다. 위 모델식들을 전산모사에 의해서 해석하면 흡착탑 안 흡착질의 동적거동을 구해낼 수 있다[11]. 편미분방정식으로 표현된 식들을 포함하는 모델을 풀기 위한 구체적인 수치해석 방법으로는 두 개의 독립변수인 z 와 t 중에서 z 방향으로는 cell model에 의해서 분해하였는데, 이는 backward difference 개념과도 마찬가지로이다. 이로써 z 에 대한 미분방정식 형태가 사라지고 t 방향에 대한 상미분방정식 형태로 변환된 식들은 Runge-Kutta-Gill 방법과 Adams 예측자-수정자 방법에 의해서 풀었다. 이는 흡착공정의 수치해석에서 보편적으로 널리 사용되어온 방법 중 하나이다.

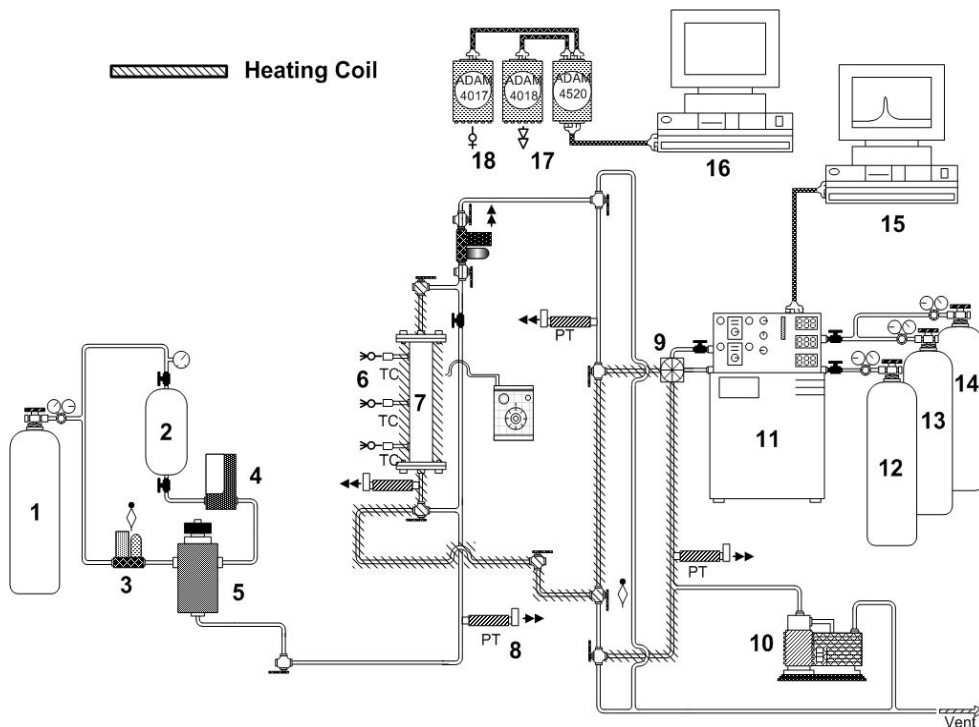


Figure 1. Schematic diagram of apparatus for dynamic adsorption experiment: 1. N₂ cylinder; 2. VOCs reservoir; 3. MFC (mass flow controller); 4. LFC (liquid flow controller); 5. CEM (controller evaporator); 6. TC (thermocouple); 7. column; 8. PT (pressure transducer); 9. sampling port; 10. pump; 11. GC (gas chromatography); 12. N₂ cylinder; 13. air cylinder; 14. H₂ cylinder; 15. GC data acquisition computer; 16. TC, PT, MFC data acquisition computer; 17. PT indicator; 18. TC indicator.

3. 실험

3.1. 실험 장치

VOC를 기상으로 기화시키면서 동적흡착실험을 수행하는 실험장치는 Figure 1에 나타내었다. 실험장치는 전체적으로 네 부분으로 이루어져있다. 흡착질이 기상으로 기화되어서 운반가스와 혼합되는 원료공급부, 기체가 흡착탑 안으로 들어가서 흡착 및 탈착 등의 현상이 일어나는 반응부, 그리고 원료공급부 및 반응부를 전체적으로 컨트롤하는 제어부, 탑에서 나오는 기체의 VOC농도를 측정하기 위해 FID(flame ionization detector)가 장치된 기체크로마토그래프장치(GC)를 이용하여 실험결과를 분석 및 저장하는 분석부의 네 부분으로 구성된다.

3.2. 실험 방법

본 실험에서는 VOC로서 벤젠을 사용하여 동적흡착실험을 수행하였다. 흡착탑에 12-20 mesh 크기의 활성탄을 넣고서 활성탄이 빠져 나오지 못하도록 1000 mesh의 sieve로 탑의 상하부를 막은 후 사용하였다. 운반가스인 질소를 MFC (Mass Flow Controller, Bronkhost Co., F-201C-FA-22-V)를 이용하여 유량을 조절한 후 액상의 벤젠을 기화시켰다. LFC (Liquid Flow Controller, Bronkhost Co., LIFAC-22-O)로 벤젠의 유량을 조절하였으며, 완전한 혼합 기화를 위하여 CEM (Controlled Evaporator Mixer, Bronkhost Co., W-102-120-K)을 이용하여 원료의 혼합농도가 일정하게 유지되면서 탑으로 흘러들어가게 하였다. 이때 탑 밖으로 나오는 기체 시료를 GC에 통과시켜 2분마다 흡착탑의 출구농도를 측정하여 기록하고, 이를 이용하여 파과곡선(Breakthrough curve)을 구하였다. 실험 조건으로서 벤젠의 입구농도를 10000, 15000, 20000 ppm으로 변화시키며 실험을 진행하였다. 운반가스의 유량은 0.3 NL/min으로 선정하였다. 또한 흡착탑의 온도는 변압기를 사용하여 조절하였고 흡착탑의 압력은 PCV (Pressure Control Valve, Bronkhost, Model P-702C)장치로 back pressure를 설정하여 실험을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

흡착탑 온도와 압력을 각각 30℃와 1 atm으로 고정시키고 원료의 일정한 유량(0.3 NL/min)에서 벤젠농도를 10000, 15000, 20000 ppm으로 바꾸면서 실험한 결과가 Figure 2에 나타나 있다. 흡착질의 평형흡착량이 농도에 비례하는 선형흡착인 경우에는 흡착질의 농도가 변하여도 파과시간은 일정하다. 이는 국부평형이론(local equilibrium theory)에 의하면 흡착질의 탑 내에서의 이동속도가 dq/dc 에 의존되기 때문이다. 선형흡착에서는 dq/dc 가 농도와 무관한 상수가 되어서 흡착질의 이동속도도 일정하며, 결국 파과시간도 일정해지는 것이다. 한편, 비선형흡착을 하는 강흡착질이 약흡착질로 채워진 흡착탑 안에 통과할 때 형성되는 shock wave의 속도는 농도과 전면 및 후면에서의 농도차로 계산되는 $\Delta q/\Delta C$ 에 의존된다. 흡착탑 입구 쪽으로부터 흘러 들어오는 강흡착질의

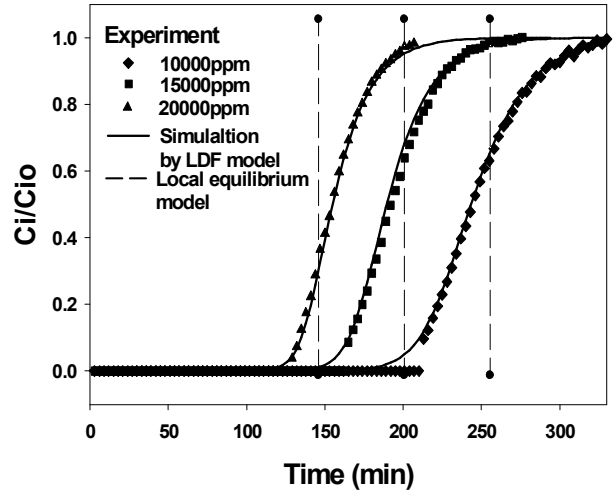


Figure 2. Breakthrough curves obtained from experimental data (symbols) and simulations by the LDF model (solid lines) and by the local equilibrium model (dashed lines) for various inlet concentrations of benzene.

농도가 높을수록 비선형흡착의 특성에 의해서 이 값이 작아지게 되며 shock wave의 이동속도, 즉 강흡착질의 이동속도가 작아지게 된다. 본 실험에서 벤젠의 농도가 높아질수록 파과시간이 뚜렷이 짧아지는 것으로 나타나는 것도 벤젠의 등온흡착곡선이 선형이 아니라 상당한 비선형이기 때문이다. 따라서 벤젠의 흡착공정에서는 원료 속 벤젠의 농도에 따른 조업조건의 결정이 매우 중요하다.

Figure 2에는 물질전달저항이 없는 경우의 국부평형모델에 대하여 Suh and Wankat[10]이 얻어낸 결과식으로부터 파과시간을 계산하여 파과곡선과 중첩하여 보였다. 이로부터 파과곡선이 발생하는 시간대를 국부평형모델로부터 대략적으로 쉽게 예측할 수 있음을 확인하였다. 한편, 파과실험에서

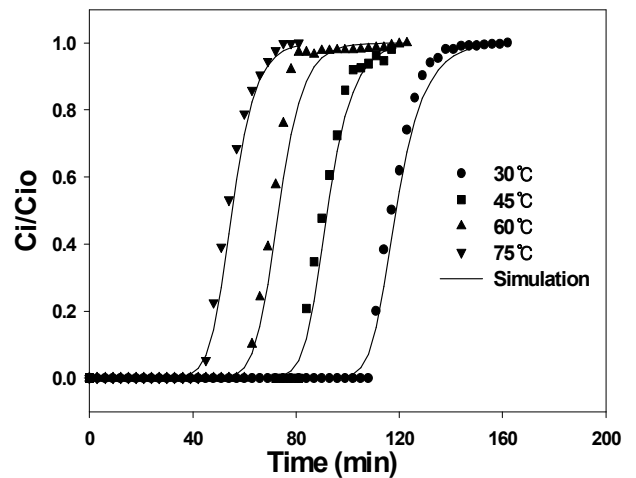


Figure 3. Experimental breakthrough curves and their corresponding simulation results with the best mass transfer coefficient at four different temperatures of 30, 45, 60, and 75℃.

Table 1. Mass transfer coefficients for benzene at various temperatures and 1 atm

Temperature (°C)	k (sec ⁻¹)
30	0.003095
45	0.004095
60	0.004995
75	0.005895

Table 2. Mass transfer coefficients for benzene at 30°C and various pressures

Pressure (atm)	k (sec ⁻¹)
1	0.003095
2	0.002495
3	0.002095
4	0.001895

언어진 파과곡선을 물질전달 영향을 나타내는 LDF모델에 의한 전산모사결과와 비교해 보면 물질전달계수를 적절히 잘 선택만 하면 이론적 모델과 실험이 잘 일치하게 됨을 알 수 있다. 입자 외부의 물질전달과 입자 내부의 여러 형태의 확산 현상 등이 포함되는 물질전달과정을 표현하기 위하여 복잡한 상세 모델을 도입하지 않아도 비교적 간단한 모델인 LDF모델에 의해서도 충분히 공정설계가 잘 이루어질 수 있을 것이다.

Figure 3에서는 벤젠의 입구농도는 20000 ppm으로 고정시키고 흡착탑의 압력을 1기압으로 유지하면서 온도를 4가지 다른 온도 (30, 45, 60, 75 °C) 중의 하나로 선택하여 얻은 실험결과를 보였다. 온도가 높아지면 흡착량이 감소하면서 흡착제의 용량이 줄어들고 그로 인하여 파과시간이 짧아졌다. 따라서 실제 산업공정에서 배가스로 발생하는 벤젠 증기의 온도가 높다면 벤젠을 제거 및 분리하기 위하여 흡착탑 안으로 원료를 공급하기 전에 충분히 냉각시켜야만 흡착탑의 경제적 이용 효과가 높아질 것이다. 그림에서 실험결과를 전산모사결과를 비교해 보면, 각각의 온도에 대하여 실험과 전산모사를 일치시킬 수 있음이 보인다. 그러나 여기에서의 전산모사는 서로 다른 온도에서 수행된 각 실험결과마다 서로 다른 물질전달계수를 선택하면서 이루어졌다. 그렇게 선택된 물질전달계수는 Table 1에 나타내었다. 온도가 높아질수록 분자의 운동이 활발해지면서 물질전달속도가 빨라져서 물질전달계수가 크게 얻어졌다.

압력의 영향은 Figure 4에서 실험결과와 전산모사를 비교함으로써 나타나 있다. 온도는 30°C로 고정시키고 벤젠의 입구농도는 20,000 ppm으로 선택하였다. 앞서와 마찬가지로 실험결과를 잘 맞출 수 있도록 물질전달계수를 선택한 후 4가지 다른 압력조건 (1, 2, 3, 4기압)에 대하여 실험과 일치하는 모사결과를 얻을 수 있었다. 선택된 물질전달계수를 압력과 함께 Table 2에 나타내었다. 흡착탑 압력이 1 atm으로부터

4 atm으로 변하는 영역에서는 흡착제 기공 내에서의 분자 확산 저항이 커짐에 따라서 총괄 물질전달계수가 작아졌음을 알 수 있다.

Table 1에서 나타낸 물질전달계수와 온도와의 관계식을 도출하기 위하여 Figure 5를 얻었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 절대온도 T에 대하여 Arrhenius형태의 관계식을 유도할 수 있고 1 atm에서 적용되는 적절한 식은 $k = 2.589 \exp\left(\frac{-15404}{RT}\right)$ 이다. Table 2에 나타낸 물질전달계수와 압력의 관계는 지수형태의 식으로 잘 표현된다. 온도가 30°C일 때 Figure 6으로부터 만들어지는 식은 $k = 10^{-5.768P - 0.357}$ 이다. 여기에서 P는 흡착탑 안의 압력(atm)이다. 이러한 형태의 관계식은 실험적으로 얻어지는 경험식으로서 공정의 설계에서 적절히 잘 활용될 수 있을 것이다. 다만 실험결과로부터 경험식을 얻어내

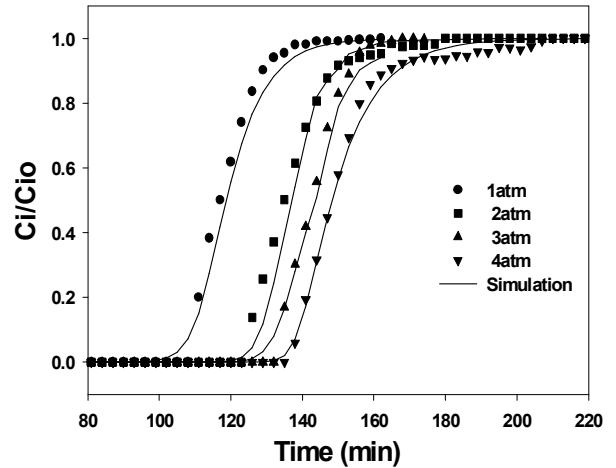


Figure 4. Experimental breakthrough curves and their corresponding simulation results with the best mass transfer coefficient at four different pressures of 1, 2, 3, and 4 atm.

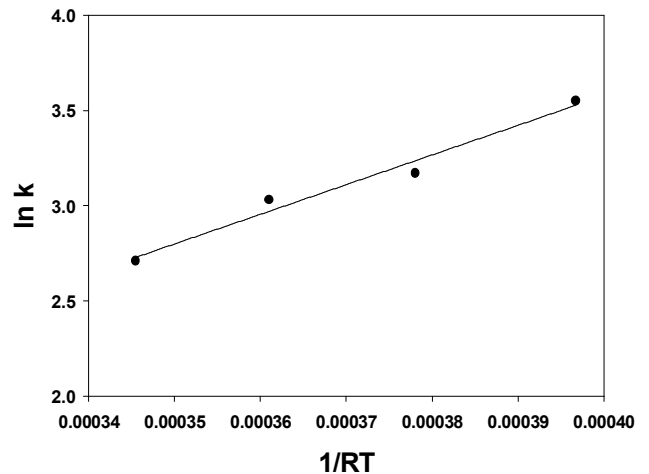


Figure 5. Temperature dependency of mass transfer coefficient for benzene on activated carbon.

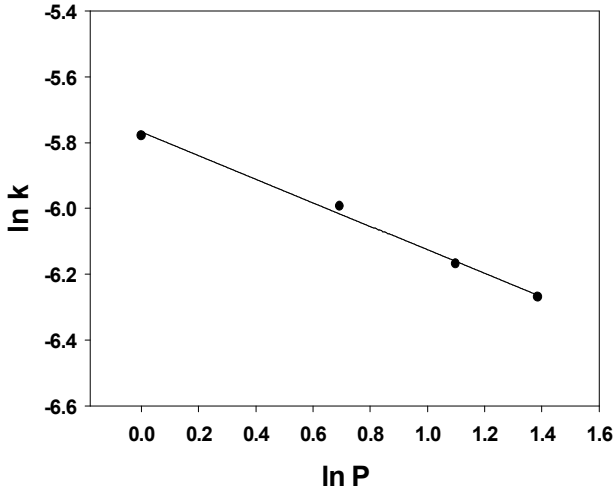


Figure 6. Pressure dependency of mass transfer coefficient for benzene on activated carbon.

어서 사용할 때에는 실험에 사용된 조건의 범위 내에서만 유효한 식임을 유념해야 할 것이다. 실제 공정의 조업 범위에 해당하는 조건에서 이러한 실험을 통하여 물성치를 얻어내는 것이 바람직하다.

5. 결 론

대기환경오염물질인 벤젠을 흡착탑에 충전된 활성탄에 흡착시키는 실험으로부터 파과곡선을 얻고, 이를 선형추진력(LDF) 모델의 전산모사와 비교하여 벤젠에 대한 총괄 물질전달계수를 구하였다. 실험과 전산모사의 결과는 서로 잘 일치함을 확인하였다. 벤젠의 입구농도와 흡착탑의 온도 및 압력을 변화시켜 가면서 얻은 파과곡선을 이용하여 물질전달계수를 가장 적합하게 선택할 수 있었다. 벤젠의 입구농도가 10,000-20,000 ppm일 때, 흡착탑 온도가 30-75°C의 영역일 때, 또한 흡착탑의 압력이 1-4 atm일 경우에 실험으로 얻은 파과곡선의 실험결과에 전산모사의 수행 결과를 근사시킬 수 있었다. 벤젠의 농도가 늘어나면 파과시간은 짧아지지만 물질전달계수는 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 온도가 증가하면 물질전달계수가 증가하였고 상관관계가 Arrhenius 함수에 의해서 잘 나타내어졌다. 압력이 증가할 때에는 물질전달계수가 감소하는 것으로 나타났으며, 물질전달계수의 압력에 대한 의존성은 지수함수 형태의 경험식으로 나타낼 수 있었다. 이와 같은 과정을 통하여 물질전달계수를 얻는 방법은 다양한 흡착공정에 적용되리라 사료된다. 본 연구에서 얻어진 결과는 실제 공정의 설계에서도 활용이 가능할 것이다.

감 사

이 논문은 2006학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Urtiaga, A., Gorri, D., and Ortiz, I., "Mass-Transfer Modeling in the Pervaporation of VOCs from Diluted Solutions," *AIChE J.*, **48**(3), 572-581 (2002).
2. Yang, R. T., *Adsorbents: Fundamentals and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003.
3. Kim, H. S., Park, Y. S., and Min, B. M., "Adsorption Characteristics of Benzene at the Fixed-bed Adsorption Column," *J. Korean. Soc. Environ. Engrs.*, **23**(12), 1979-1988 (2001).
4. Hwang, K. S., Choi, D. K., and Gong, S. Y., "The Thermal Regeneration Characteristics of Volatile Organic Compounds on an Activated Carbon Bed (I): Adsorption Step," *WAHAK KONGHAK*, **36**(2), 159-168 (1998).
5. Chiang, Y. C., Chiang, P. C., and Huang, C. P., "Effects of Pore Structure and Temperature on VOC Adsorption on Activated Carbon," *Carbon*, **39**, 523-534 (2001).
6. Yun, J. H. and Choi, D. K., "Adsorption Isotherms of Benzene and Methylbenzene Vapors on Activated Carbon," *J. Chem. Eng. Data*, **42**(5), 894-896 (1997).
7. Linders, M. J. G., van den broeke, L. J. P., Kapteijn, F., and Moulijn, J. A., "Binary Adsorption Equilibrium of Organics and Water on Activated Carbon," *AIChE J.*, **47**(8), 1885-1892 (2001).
8. Moon, H. and Park, Y., "Adsorption Equilibrium Theory and Application of Multicomponent Mixture," *Chem. Ind. Technol.*, **14**(2), 103-109 (1996).
9. Song, H. T., Kang, S. W., Min, B. H., and Suh, S. S., "A Study on VOCs Adsorption at Low Pressure," *Clean Tech.*, **9**(4), 153-161 (2003).
10. Suh, S. S. and Wankat, P. C., "Pressure swing adsorption for binary gas separation with Langmuir isotherms," *Chem. Eng. Sci.*, **44**(10), 2407-2410 (1989).
11. Kang, S. W., "Adsorption and Desorption Characteristics of Benzene on Activated Carbon and Zeolite 13X in Fixed Bed," Ph.D. Dissertation, Hongik University, Seoul, 2005.