

## 활성탄 충전탑에서 물질전달계수 측정에 관한 연구

권준호, 김기열, 민병훈<sup>1</sup>, 서성섭\*  
 홍익대학교 화학공학과, <sup>1</sup>수원대학교 화학공학과  
 (suhss@wow.hongik.ac.kr\*)

## A Study on Measurement of Mass Transfer Coefficient in Activated Carbon Packed Bed.

Jun-Ho Kwon, Gi-Yeol Kim, Byong-Hoon Min<sup>1</sup>, Sung-Sup Suh\*

Dept. of Chemical Engineering, Hongik University,  
<sup>1</sup>Dept. of Chemical Engineering, Suwon University  
 (suhss@wow.hongik.ac.kr\*)

### 서론

대기 중의 오염 입자의 증가는 대기의 광화학 반응 상승으로 이어져 인류에게 큰 피해를 주고 있다. 이러한 광화학 반응의 전구물질 중 가장 대표적인 것이 VOCs(Volatile Organic Compounds)이고 자동차, 전기, 전자공업, 기계공업, 금속공업 등에서 세정제, 도료나 접착제등의 화학반응 용매나 화학제품의 중간원료로 사용되고 있으며 사용 중에 혹은 사용 후에 기체나 액체상태로 배출되어 심각한 환경오염을 일으키고 있다. 대기로 방출되는 VOCs의 양을 줄이거나 제거하는 기술로 여러 가지가 있지만 유기화합물을 효과적으로 제거하고 회수 할 수 있는 방법 중의 하나가 흡착공정을 이용하는 것이다.<sup>[1],[2]</sup> 그러나 흡착에 의한 회수기술은 기존의 공기분리 등에서 얻어진 기초데이터를 바탕으로 급진적으로 연구가 이루어질 수 있는 배경을 형성하고는 있으나 대기중에 기상으로 확산되는 VOCs가 응축하는 성질로 인해 흡착량 측정의 어려움과 온도의 변화에 따라 상변화가 발생하는 공정상의 문제점으로 인해 정확한 공정 설계 및 조업조건을 구하기가 힘들다는 단점을 갖고 있다. 설계에 필요한 기초적인 데이터의 부족은 흡착공정에서 탑 이용률의 감소를 가져오게 되고 이는 장치 제작상의 비용 상승을 초래하게 된다. 이와 같은 기초 데이터로서 각 성분들마다 상이하게 얻어지는 흡착량과 기상의 확산에 관계되는 물질전달 계수 및 열전달 계수들은 실험적으로 구해지는 것이 보편적이다<sup>[3],[4]</sup>.

따라서 본 연구에서는 이러한 설계데이터를 구하기 위하여 VOCs(Volatile Organic Compounds)의 대표물질인 벤젠의 흡착량 측정을 정적흡착 방법으로 흡착량을 구하고, 활성탄 흡착탑을 통과할 때 시간에 따라 얻어지는 출구 농도조성 변화를 실험적으로 구하고자 하였다. 동적흡착 방법으로 벤젠을 증기화하여 흡착질의 농도와 흡착탑의 온도를 다르게 하면서 과과실험을 진행하였다. 국부평형모델을 이용한 shock wave의 이동 속도 식으로 부터 얻어지는 이론적인 과과시간과 실제 실험 데이터를 비교하고 실제 실험 데이터를 이용하여 전산모사를 진행한 결과로 부터 물질전달계수를 조사하였다. 물질전달 계수와 온도와의 상관관계를 알아 보았다.

### 이론

흡착량을 나타내는 등온흡착식에는 여러 형태가 있다. 그러나 VOCs의 흡착 특성이 포화흡착량에 도달하는 과정에서 압력변화에 따라 흡착량이 급하게 상승하는 형태를 보이므로 흔히 Toth식에 의하여 표현된다. 그러나 본 연구에서는 물질수지식을 푸는 과정에서 이용이 간단하고 본 연구의 실험데이터를 적용할 때에 Toth식과 별로 차이가 나지

않는 Langmuir 등온흡착식을 아래의 식의 형태로 사용하였다. 본 연구에서는 질소를 carrier gas로 사용하였기 때문에 흡착등온식을 이 성분에 대한 식으로 바꾸어 사용하였다.

$$q_A^* = \frac{K_A \cdot P_A}{1 + b_A \cdot P_A + b_B \cdot P_B} = \frac{K_A \cdot P \cdot y_A}{1 + b_A \cdot P \cdot y_A + b_B \cdot P \cdot (1 - y_A)}$$

$$= \frac{K_{AO} \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \cdot P \cdot y_A}{1 + b_{AO} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta H_A}{RT}\right) \cdot P \cdot y_A + b_{BO} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta H_B}{RT}\right) \cdot P \cdot (1 - y_A)}$$

강 흡착질인 성분 A에 대한 물질수지식과 물질전달속도식<sup>[5]</sup>을 각각 다음과 같이 표현하였다.

$$\frac{\partial\left(u \cdot \frac{P \cdot y_A}{T}\right)}{\partial Z} + \frac{\partial\left(\frac{P \cdot y_A}{T}\right)}{\partial t} + \frac{(1 - \epsilon_e)}{\epsilon_e} \cdot \rho_p \cdot R \cdot \frac{\partial q_A}{\partial t} = 0$$

아래에서  $q_A$ 는 실제 흡착량이며  $q_A^*$ 는 평형흡착량이다. 탑의 전체 길이에 비하여 반경이 작으므로 축방향으로 확산은 무시하였고 실험을 등온으로 수행하였으므로 온도에 따른 항은 무시하였다. 또한 흐름이 plug flow로 가정하여 전산모사를 수행하였다. 물질전달식으로는 직렬로 이어지는 여러 물질전달 과정을 단순화시킨 형태인 LDF model을 사용하였다. LDF model의 물질전달계수인  $k_A$ 는 온도, 압력, 선속도 등에 따라 변화하지만 본 연구에서는 탑 안에서 흡착과정 진행 도중에 온도, 압력, 선속도의 변화가 적기 때문에 일정하다고 가정하였다.

$$\frac{\partial q_A}{\partial t} = k_A (q_A^* - q_A)$$

**실험**

본 연구의 흡착실험장치를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 정적흡착 실험장치를 이용하여 액상의 VOCs를 기화시켜 로딩셀에 저장한 후 P-V-T관계를 이용하여 흡착전물수를 측정한다. 그 후 흡착제가 넣어져 있는 흡착공간에 물 수를 알고 있는 VOCs를 확산시켜 감소된 물 수를 이용하여 흡착량을 계산<sup>[6]</sup>하였다.

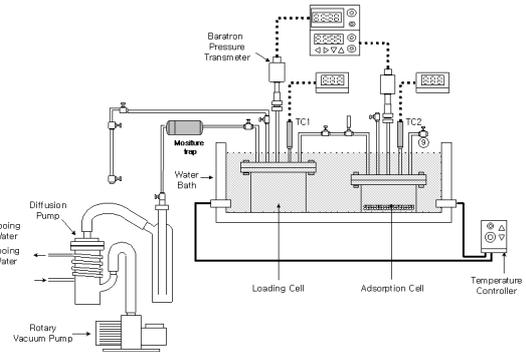


Figure 1. Schematic diagram of static adsorption experimental apparatus.

Fig. 2에서는 동적흡착실험<sup>[6]</sup>장치를 나타내었다. 동적흡착실험장치에서는 운반가스인 질소를 MFC(Mass Flow Controller, Bonkhost Co., F-201C-FA-22-V)를 이용하여 유량을 조절한 후 벤젠을 기화시켰다. 벤젠 량의 조절은 LFC(Liquid Flow Controller, Bronkhost Co., L1FAC-22-O)로 유량을 조절하였고 완전한 혼합 기화를 위하여 CEM(Controlled Evaporator Mixer, Bronkhost Co., W-102-120-K)을 이용하였다. 탑 출구에서는 분석을 위하여 기체 크로마토그래피(Donam instrument Co., DS6200)를 사용하였고 Auto Injection Valve(Valco instrument Co., KCA-20-32-3-I)를 이용하여 2분 간격으로 배출가스를 자동으로 채취하면서 분석하였다. 탑 내 온도 변화 및 원료 물질의 전달 속도를 알기 위하여 탑의 상부·중부·하부

에 열전대를 삽입하여 측정하였다. 온도와 압력은 ADAM data acquisition board를 사용하여 값들을 저장하여 결과를 기록하였다. 물질전달계수를 구하기 위한 실험의 조건으로서 강흡착질의 농도, 탑의 온도 등을 선정하였다.

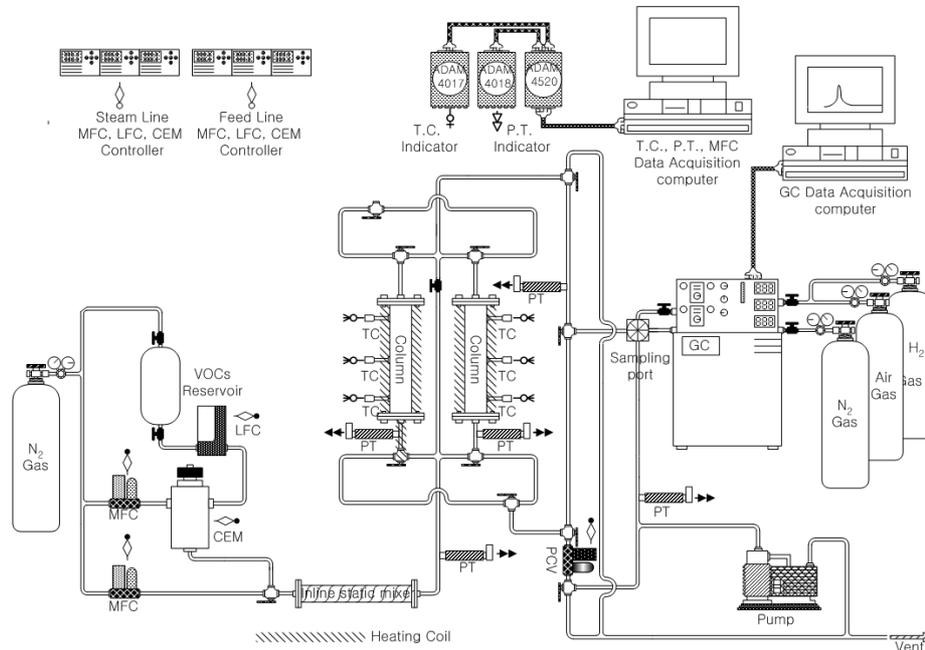


Figure 2. Schematic diagram of dynamic adsorption experimental apparatus.

### 결과 및 결론

정적흡착실험장치를 이용하여 활성탄에 대한 벤젠의 흡착량 측정 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Langmuir 상수는 온도 상관관계식인 arrhenius식을 따르는 것으로 간주하였으며, 온도를 변화시키면서 실험한 결과로부터  $K_{A0}$ 는  $3.99 \times 10^{-5} \text{ gmol/g} \cdot \text{atm}$ 이고  $b_{A0}$ 는  $8.98 \times 10^{-2} \text{ atm}^{-1}$ 으로 얻어졌다. 활성탄의 물성치는 BET표면적이  $722.5 \text{ m}^2/\text{g}$ 이고 평균공극률이 0.6921, 평균밀도는  $1.274 \text{ g/cm}^3$ 이었다. 정적흡착실험과 BET실험을 통하여 얻어진 기초데이터를 가지고 전산모사에 필요한 기초 데이터를 구축하였다. Fig. 4에서는 carrier gas의 유량을  $0.3 \text{ NL/min}$ 으로 고정시키고 들어가는 벤젠의 농도를 10000ppm, 15000ppm, 20000ppm으로 다르게 했을 때의 결과를 나타내었다. 농도가 증가할수록 파과시간이 단축되고 파과곡선이 변화됨을 알 수 있었다. Fig. 5은 carrier gas  $0.3 \text{ NL/min}$ , 벤젠의 농도가 20000ppm인 경우로 흡착탑의 온도를 다르게 유지시켜주면서 흡착 시 파과곡선을 나타낸 그래프이다. 선형 흡착이면 농도에 따라 파과시간이 무관하게 나타나지만 본 연구에서 벤젠의 흡착은 비선형흡착으로 농도가 증가할수록 파과시간이 선형적으로 비례하지 않음을 알 수 있었다. 흡착질 농도의 증가가 벤젠의 흡착탑 내 경계면의 전진속도를 변화시키는 것이다. 이와 동시에 물질전달 계수값도 변화되어야 하는데 실제 실험데이터를 이용하여 시뮬레이션 값으로 물질전달 계수값을 찾을 수 있었다. 높은 온도에서 조업이 이루어질수록 파과시간은 빨라지면서 물질전달계수 값이 크게 얻어졌으며 얻어진 실험데이터를 통하여 각 온도에서의 물질전달계수 값을 구하였고 온도상관관계식인 arrhenius식에 대입하여 온도와 물질전달계수 사이 상관관계를 Fig. 6에서 얻을 수 있었다. 정적 흡착과 동적 흡착 실험을 통하여 얻은 실험 데이터로부터 전산모사를 수행하여 얻은 물질 전달계수는 조업조건이 달라짐에 따라 흡착공정의 효율이 변하는 것을 예측하는데 활용 될 수 있을 것이다.

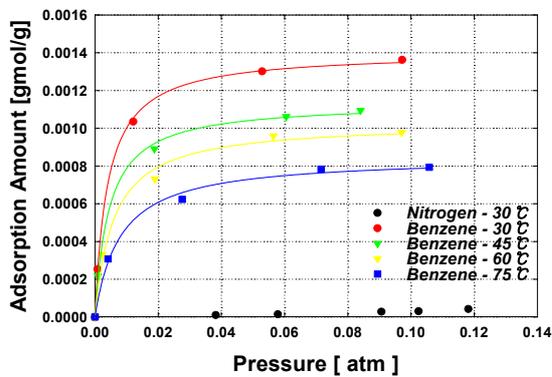


Figure 3. Adsorption amount of benzene on activated carbon

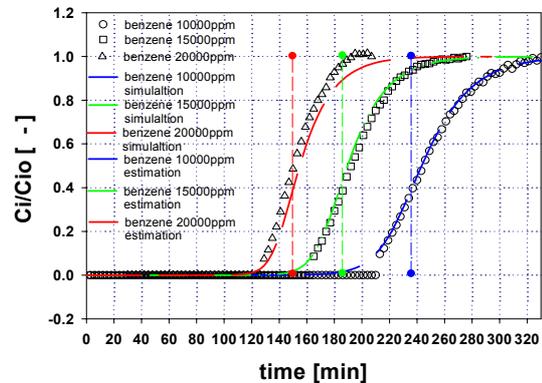


Figure 4. Comparison among the breakthrough curves obtained by experiment, simulation and LDF model for benzene.

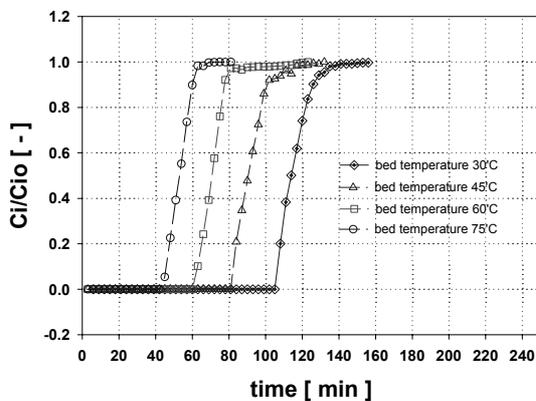


Figure 5. Breakthrough curves for benzene in activated carbon bed.

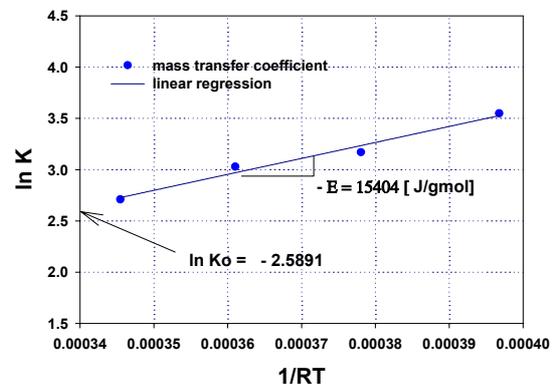


Figure 6. Temperature dependency of mass transfer coefficient on activated carbon.

## 참고문헌

1. Ralph T. Yang, "Adsorption and purification technology", Wiley-interscience.(2003)
2. 강성원 · 민병훈 · 서성섭, 활성탄을 충전한 흡착탑에서 벤젠의 회수를 위한 세정공정의 연구, 한국 유화학회, 19,108(2002)
3. Jeong-Ho Yun, Dae-ki Choi and Sung-Hyun Kim, Equilibria and dynamics for Mixed Vapors of BTX in an Activated Carbon Bed, AIChE Journal, 45, 751(1999).
4. Mukhopadhyay, N. and Moretti, E.C.: "Current & Potential Future Industrial Practices for Reducing and Controlling Volatile Organic Compounds", American Institute of Chemical Engineers, New York(1993).
5. Robert C. Reid, John M. Prausnitz and Bruce E. Poling, "The Properties of GASES & LIQUIDS", 577~631, McGRAW-HILL Book Co, Singapore(1986)
6. R. Byron Bird, Warren E. Stewart and Edwin N. Lightfoot, "Transport Phenomena", 495~518, JOHN WILEY & SONS, INC., New York(1960)