

활성탄 충전층에서 벤젠 증기의 흡착특성

김성수[†] · 김종현* · 박상욱**

부산가톨릭대학교 환경행정학과
609-757 부산시 금정구 부곡3동 9번지
*동서대학교 신소재공학과
617-716 부산시 사상구 주례2동 산69-1
**부산대학교 화학공학과
609-735 부산시 금정구 장전동 산 30
(2009년 4월 28일 접수, 2009년 7월 18일 채택)

Adsorption Analysis of Benzene Vapor in a Fixed-Bed of Granular Activated Carbon

Seong-Soo Kim[†], Jong-Hyun Kim* and Sang-Wook Park**

Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan, 9, Bugok 3-dong, Gumjung-gu, Busan 609-757, Korea

*Department of Advanced Materials Engineering, Dongseo University, San 69-1, Churye-2-dong, Sasang-gu, Busan 617-716, Korea

**Division of Chemical Engineering, Pusan National University, San 30, Jangjun-dong, Gumjung-gu, Busan 609-735, Korea

(Received 28 April 2009; accepted 18 July 2009)

요 약

고정층 반응기에서 활성탄 흡착제를 사용하여 질소 기류에서 벤젠 증기의 파과곡선을 측정하였다. 흡착실험은 흡착 온도 25~50 °C, 질소 가스의 유량 80~150 cm³/min, 흡착제의 공급량 3~5 g, 그리고 벤젠 증기의 농도는 포화조의 온도를 25~40 °C로 변화시켜 행하였으며, 파과곡선의 비선형해석으로부터 비활성화 모델의 흡착속도상수와 비활성속도상수를 구하고 비활성화 모델과 흡착 등온 모델과의 상관관계를 고찰하였다.

Abstract – Activated carbon was used as an adsorbent to capture benzene vapor from gaseous stream of nitrogen in a fixed-bed to obtain the breakthrough data. The deactivation model is used to analyze the adsorption kinetics of benzene vapor using the experimental breakthrough data. The experimental breakthrough data are fitted very well to the deactivation model than the adsorption isotherm models in the literature.

Key words: Benzene, Activated Carbon, Adsorption, Breakthrough Curve, Deactivation Model

1. 서 론

휘발성 유기화합물(Volatile organic compounds, VOCs)은 고분자 물질의 용제, 인조피혁, 접착 또는 점착용 테이프제조, 인쇄, 페인트, 필름 코팅 등 매우 광범위한 분야에서 유용하게 사용되고 있지만 건조 공정에서 휘발되어 발생하는 증기는 덕트를 통해 대기로 배출된다. 이렇게 배출되는 VOCs는 에너지 손실과 제품의 비용 상승을 초래할 뿐만 아니라 최근 문제가 되고 있는 대도시 지역의 오존 발생 등의 환경을 오염시키고 화재, 폭발 사고와 인체 장애의 원인이 되고 있다.

VOCs 제어기술은 파괴와 회수기술로 대별된다. 최근 전 지구적인 환경문제가 최대 쟁점으로 부각되어 VOCs의 회수에 대한 필요성이 증대됨에 따라 이를 효율적으로 회수할 수 있는 공정이나 장

치의 개발이 요구되고 있다. VOCs를 회수하는 방법에는 응축법, 흡수법, 흡착법, 막분리법 등이 있으나, 공정 배기가스로부터 저농도의 VOCs를 회수하기 위하여 흡착법이 효율적이고 경제적인 것으로 보고되고 있다[1].

일반적인 흡착 공정에서 흡착제로 비표면적이 넓고 복잡한 세공 구조 및 소수특성을 지니고 있는 활성탄이 가장 많이 사용하고 있으며[2], 활성탄을 사용하여 기상의 VOCs를 흡착 제거하는 연구가 오래전부터 많은 연구자에 의해 수행되고 있다[3-5].

활성탄 흡착공정의 성능에 영향을 미치는 인자로서 활성탄의 종류, 흡착질의 종류, 농도, 및 유입유속 등이 있다. Nelson 등[6,7]은 농도, 유량, 용제의 증기압 및 수증기 등이 활성탄의 성능에 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였으며, 다른 연구자들도 다른 조건에서 오염물질들에 대한 활성탄의 성능을 평가하였다[8,9].

흡착제의 성능을 평가하는 방법은 흡착제의 흡착 평형 실험결과로부터 Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich, BET 모델 등에 의한 흡착 등온식[10]을 제시하여 흡착제의 흡착용량과 파과시

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: sskim@cup.ac.kr

[‡]이 논문은 부산대학교 박상욱 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

간을 예측하는 데 사용한다. 그러나 흡착제의 특징(표면적, 기공크기)과 피흡착질의 종류, 흡착제와 피흡착질의 상호작용 등이 복잡하여 피흡착질의 농도에 대한 흡착량의 관계를 예측하기 위하여 많은 수학적 모형으로 흡착등온선을 묘사하였으나 흡착등온선의 평형실험에 많은 시간이 소요되고 적절한 수학적 모형을 선정하기가 쉽지 않아 보다 간단하고 편리하게 흡착공정의 파과곡선을 예측할 수 있는 등온식의 개발이 요구된다. 전체적인 파과곡선을 예측할 수 있는 간단한 경험식[11]이 제시되었지만 측정한 파과곡선을 해석하여 흡착제의 흡착용량을 예측하고 흡착 등온시간과의 상관관계를 고찰한 연구는 매우 미비하다.

본 연구에서는 활성탄이 충전된 충전층에서 대표적인 VOCs 물질 중 하나인 벤젠의 흡수실험으로부터 측정한 벤젠 증기의 파과곡선을 비활성 모델(deactivation model)로 해석하여 벤젠의 흡착특성을 살펴보았으며 기존의 흡착 등온식과 비교하였다.

2. 이 론

Yasyerli 등[12]은 기체-고체 무촉매 반응으로 인하여 고체 생성물이 형성될 경우 반응물의 표면에 형성되는 고체 생성물에 의해 확산 저항이 증가하여 반응속도가 감소하는 현상을 비활성 모델을 사용하여 해석하였다. 본 연구에서 벤젠 증기에 의한 활성탄의 흡착능 저하로 인한 활성탄의 비활성 모델을 사용하여 다음과 같이 벤젠 증기의 파과곡선을 제시하였다.

활성탄이 벤젠 증기를 흡착함에 따라 벤젠 증기가 활성탄 표면에 접근하는데 확산 저항을 증가시켜 활성탄의 흡착속도가 감소한다고 가정하면 흡착이 진행함에 따라 활성탄 고체의 기공 구조, 활성표면적, 활성도에 큰 변화를 초래한다. 이와 같은 모든 변화는 활성탄의 활성도를 감소시킨다. 비활성 모델에서는 벤젠 증기의 흡착으로 인하여 활성탄에 의한 벤젠 증기의 포집(capture) 속도 감소에 영향을 미치는 이들 인자들을 활성저하로 연관시키고, 입자와 입자사이의 전달 효과를 무시하고 충전탑의 축방향 분산(axial dispersion)과 물질전달저항을 무시할 경우 등온과정과 준 정상상태에서 충전탑의 벤젠 증기(A)에 대한 물질수지식은 다음과 같다.

$$-Q_o \frac{dC_A}{dS} - k_d C_A \alpha = 0 \quad (1)$$

활성탄의 활성도(α)의 활성속도를 다음과 같이 나타낸다.

$$-\frac{d\alpha}{dt} = k_d C_A^n \alpha^m \quad (2)$$

식 (2)에서 활성탄의 활성도(α)의 속도가 벤젠 증기의 농도에 무관하고($n=0$), 활성도에 1차($m=1$)이면, 식 (2)의 적분은 다음과 같다.

$$\alpha = \exp(-k_d t) \quad (3)$$

식 (3)의 α 를 식 (1)에 대입하면, 흡착시간(t)에서 질소기류에서 벤젠 증기의 무차원 농도 $a=(C_A/C_{A0})$ 는 다음과 같다.

$$a = \exp\left[-\frac{k_d S_o}{Q_o} \exp(-k_d t)\right] \quad (4)$$

한편, 식 (2)에서 활성탄의 활성도의 속도가 벤젠 증기의 농도에 1차($n=1$), 활성도(α)에 1차($m=1$)이면,

$$a = \exp\left\{\frac{\left(1 - \exp\left[\frac{k_d S_o}{Q_o} [1 - \exp(-k_d t)]\right]\right)}{1 - \exp(-k_d t)} \exp(-k_d t)\right\} \quad (5)$$

3. 실험

3-1. 실험장치

Fig. 1의 내경 2 cm, 높이 30 cm의 파이렉스로 제작한 충전층 반응기[13]에서 활성탄의 존재 하에 벤젠 증기의 흡착실험을 행하였다. 흡착장치는 온도 조절기가 부착된 길이 30 cm, 내경 2 cm의 관형로(tubular furnace) 내에 설치하였으며, 흡착층의 길이는 1.5~2.5 cm 범위이었다. 흡착 실험은 25~50 °C 범위에서 행하여졌고, 반응기 외벽에 부착한 열선(heating coil)과 흡착장치 내의 활성탄의 중간 부분에 각각 설치한 열전대를 사용하여 흡착온도를 조절하였으며, 흡착장치 내의 온도분포는 측정하지 않았다. 사용된 비활성 기체, N₂의 유량은 질량조절기(mass flow controller)를 사용하여 유량 범위, 80~150 cm³/min(25 °C에서 측정)에서 조절하였으며, 벤젠 증기는 포화조에서 벤젠 액체를 증발시켜 비활성 기체에 혼합하여 흡착장치로 유입시켰다. 흡착장치의 출구에서 나오는 질소와 벤젠 증기의 혼합기체의 유량은 비누막 유량계를 사용하여 측정하고, 벤젠 증기 농도는 기체 크로마토그래프 법(gas chromatography: GC)을 사용하여 측정하고 6-way valve를 사용하여 온라인으로 조작하였다. 포화조, 유량조절기, 흡착장치 사이와 흡착장치와 GC 사이의 연결관에 가열테이프를 부착하여 기화된 벤젠 증기의 응축을 방지하였다. 본 실험에 사용한 GC는 일본 Shimadzu 회사제품(GC 8A)이며 검출기(detector)는 열전도도(thermal conductivity) 검출기이며, 컬럼(column)은 직경 1/8 inch, 길이 10 ft의 Haysep D를 사용하고, 분석조건은 주입 온도, 160 °C, 검출기 온도, 190 °C, He 기체의 유량은 25.7 cm³/min 이었다. N₂와 벤젠 증기의 혼합기체에 대한 GC peak로부터 체류시간은 각각 1.238분과 1.627분이었다. 본 연구에서 사용한 충전층은 Park 등[13]이 사용한 것과 동일하다.

3-2. 실험방법

일정량의 활성탄을 충전층 내에 투입하고 활성탄의 위와 아래 부분을 유리 섬유로서 지지한 후 충전층의 온도를 일정온도로 조절한다. 흐름시간(stream time)이 경과함에 따라 흡착장치 출구

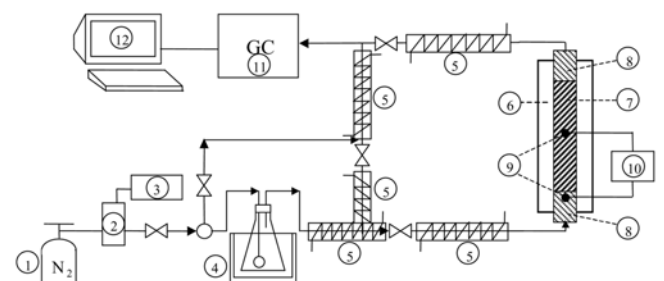


Fig. 1. Schematic flow diagram of a fixed bed apparatus.

- | | |
|-------------------------|----------------------------|
| 1. Gas bomb | 7. Sample |
| 2. Mass flow controller | 8. Glass wool |
| 3. Flow indicator | 9. Temperature probe |
| 4. Saturator | 10. Temperature controller |
| 5. Heating line | 11. GC(gas chromatography) |
| 6. Furnace | 12. Personal computer |

에서 벤젠 증기 농도와 유량을 측정하여 벤젠 증기의 파과곡선 실험값을 구하는데 사용한다. 매 실험조건마다 3회 반복하여 실험하였으며, 각 모델에서 구한 흡착속도론 값은 반복실험으로 얻어진 값을 평균하였다. 측정방법은 Park[14]이 사용한 것과 동일하다.

3-3. 재료

N_2 가스는 순도 99.9 % 이상(하나가스)의 가스를 사용하였다. 벤젠(Aldrich Chem. Co., Ltd.)은 시약급이며, 활성탄은 삼천리 제조회사의 입자형이며, 입자의 크기(d_p)는 0.575~5.6 mm 범위의 체 분석법(sieve analysis), 총괄밀도(ρ_B)는 ethanol 액체로 구성된 비중병, 고정층에서 입자간 기공률(f_{bed})은 매스 실린더(mass cylinder)를 사용하여 측정하였으며, $d_p=3.51$ mm, $\rho_B=485$ kg/m³, $f_{bed}=0.79$ 이었다. 활성탄의 비표면적, 기공부피, 평균기공직경 등은 BET 법(Micromeritics; ASAP 2000)으로 측정하였으며, 각각, 804.59 m²/g, 0.4734 cm³/g, 23.54Å이었다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 혼합기체의 유량 변화

벤젠 증기와 N_2 의 혼합기체(이하 혼합기체라 칭함)의 유량 변화가 벤젠 증기의 파과곡선에 미치는 영향을 고찰하였다.

활성탄의 주입량, 3 g, 벤젠 증기의 포화조 온도, 25 °C, 흡착온도, 30 °C를 대표적으로 하여 질소의 유량을 80~150 cm³/min(25 °C 기준)범위에서 변화시켜 벤젠 증기를 흡착하여 충전층 출구에서 측정 한 벤젠 증기의 농도로부터 파과곡선을 구하였다. 벤젠 증기의 파과곡선을 흡착시간 변화에 대해 Fig. 2에 도시하였다.

Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 기체의 유량이 증가함에 따라 파과곡선을 보다 짧은 시간 쪽으로 이전시켰다. 이는 유량이 증가함에 따라 충전층 내에서 벤젠 증기의 체류시간이 감소하여 반응 전회율이 감소한 결과이다. 비선형 최소자승법을 사용하여 벤젠 증기의 파과곡선 계산값이 측정값에 가장 접근할 수 있는 k_o 와 k_d 를 구하여 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 알 수 있는 바와 같이 이들 매개변수는 상관관계 계수가 0.996 이상이었으며, 유량의 변화에 대하여 k_o 와 k_d 가 큰 차이 없이 대응하였다.

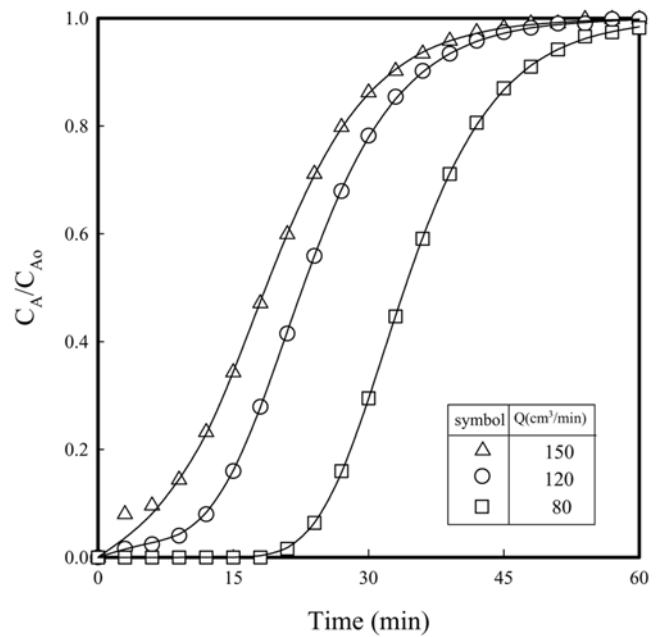


Fig. 2. Effect of flow rate of inert gas on the breakthrough curves of benzene vapor at T=30 °C, w=3 g and T_s=25 °C.

4-2. 활성탄의 첨가량 변화

활성탄의 주입량이 벤젠 증기의 파과곡선에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 흡착온도, 30 °C, 질소의 유량, 120 cm³/min, 포화조의 온도, 25 °C의 실험조건을 대표적으로 하여 활성탄의 주입량을 3.0~5.0 g 범위에서 변화시켜 충전층의 출구에서 벤젠 증기의 농도를 측정하였다. 이로부터 벤젠 증기의 파과곡선을 구하여 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 활성탄의 주입량이 증가함에 따라 파과곡선은 오른쪽으로 이동하였다. 식 (5)로부터 산출한 파과곡선이 상관관계 계수 0.996 이상으로 측정값에 잘 접근하는 반응상수 매개변수를 얻을 수 있었으며, 그 값들을 Table 1에 나타내었다. 활성탄의 주입량의 변화에 대하여 k_o 와 k_d 가 큰 차이 없이 대응하였다.

Table 1. Rate parameters for various experimental conditions

T(°C)	Q(cm ³ /min)	w(g)	T _s (°C)	P _{A0} (atm)	k _o ×10 ⁷ (m/min)	k _d (m ³ /kgmol·min)	r ²
30	80	3	25	0.1252	1.817	0.146	0.997
30	100	3	25	0.1252	1.818	0.143	0.999
30	120	3	25	0.1252	1.828	0.149	0.997
30	150	3	25	0.1252	1.824	0.142	0.996
30	120	3	25	0.1252	1.828	0.149	0.997
30	120	4	25	0.1252	1.819	0.146	0.996
30	120	5	25	0.1252	1.817	0.144	0.998
30	120	3	25	0.1252	1.828	0.149	0.997
30	120	3	30	0.1570	1.831	0.152	0.997
30	120	3	40	0.2405	1.830	0.141	0.998
25	120	3	25	0.1252	1.718	0.129	0.995
30	120	3	25	0.1252	1.828	0.149	0.997
40	120	3	25	0.1252	2.753	0.184	0.997
50	120	3	25	0.1252	4.210	0.225	0.998

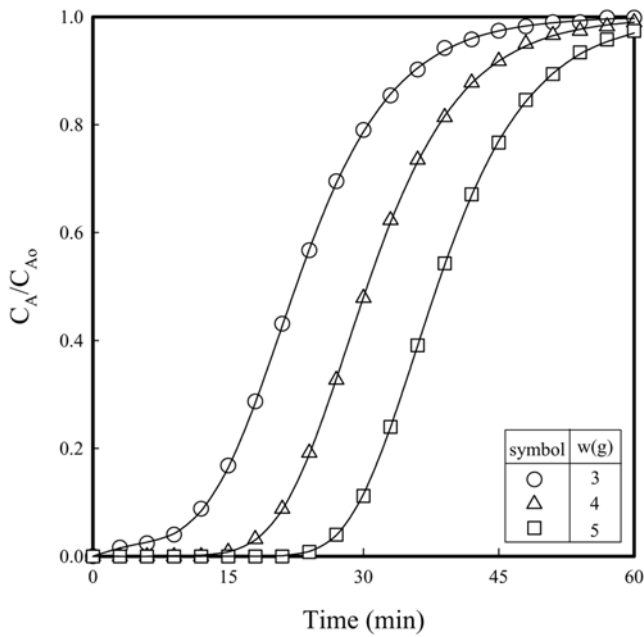


Fig. 3. Effect of amount of activated carbon on the breakthrough curves of benzene vapor at $Q=120 \text{ cm}^3/\text{min}$, $T=30 \text{ }^\circ\text{C}$ and $T_s=25 \text{ }^\circ\text{C}$.

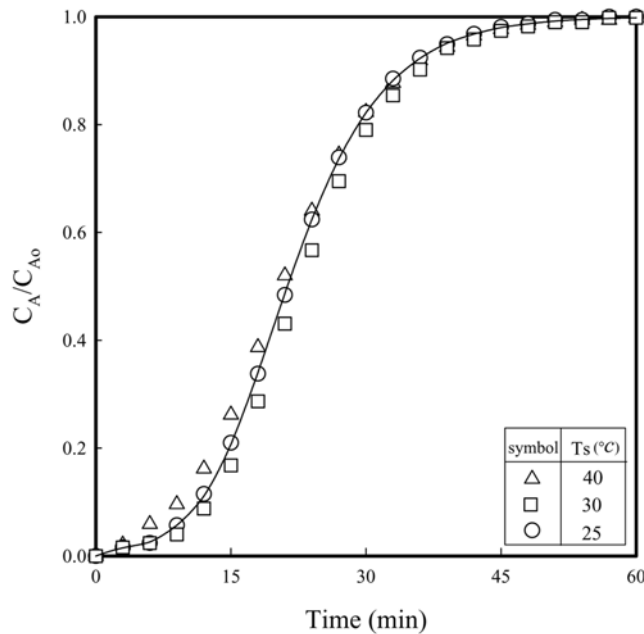


Fig. 4. Effect of saturation temperature on the breakthrough curves of benzene vapor at $Q=120 \text{ cm}^3/\text{min}$, $w=3.0 \text{ g}$ and $T=30 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.3. 벤젠 증기의 농도 변화

벤젠 증기의 농도가 벤젠 증기의 파과곡선에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 흡착온도, $30 \text{ }^\circ\text{C}$, 질소의 유량, $120 \text{ cm}^3/\text{min}$, 활성탄의 주입량, 3 g 의 실험조건을 대표적으로 하여 포화조의 온도를 $25\sim40 \text{ }^\circ\text{C}$ 범위에서 변화시켜 충전층의 출구에서 벤젠 증기의 농도를 측정하였다. 이로부터 벤젠 증기의 파과곡선을 구하여 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이 포화조의 온도변화에 따른 파과곡선의 변화는 없는 것으로 나타났다. 이는 포화조의 온도가 다르면 벤젠

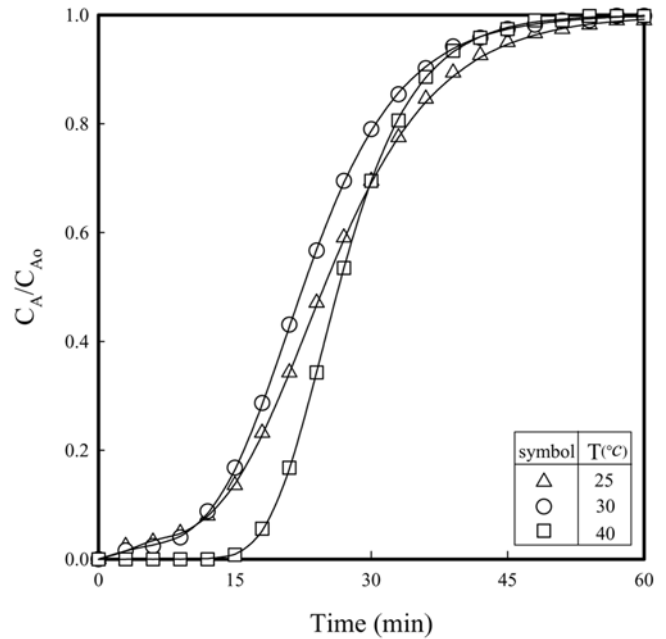


Fig. 5. Effect of adsorption temperature on the breakthrough curves of benzene vapor at $Q=120 \text{ cm}^3/\text{min}$, $w=3.0 \text{ g}$ and $T_s=25 \text{ }^\circ\text{C}$.

증기의 공급농도가 다르지만 출구농도를 무차원으로 나타내었으므로 동일한 것이 된다. Fig. 4에서 실선은 각 T_s 에서 측정된 k_o 와 k_d 의 평균값($k_o=1.830 \times 10^{-7} \text{ m/min}$, $k_d=0.147 \text{ m}^3/\text{kgmol} \cdot \text{min}$)을 이용하여 식 (5)로부터 계산한 값이다. 이 값들과 포화조의 온도에서 증발하는 벤젠 증기의 증기압을 Antoine 식으로부터 구하여 Table 1에 나타내었으며 계산값과 측정값은 0.997의 상관관계로 접근하였다. 벤젠 증기의 농도 변화에 대하여 k_o 와 k_d 가 큰 차이 없이 대응하였다.

4.4. 흡착온도의 변화

흡착온도가 k_o 와 k_d 에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 질소의 유량, $120 \text{ cm}^3/\text{min}$, 활성탄의 주입량, 3 g , 포화조의 온도, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 대표적인 실험조건에서 흡착온도, $25\sim50 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 범위에서 흡착실험을 행하여 파과곡선을 구하여 Fig. 5에 나타내었다. 입상활성탄을 이용하여 톨루엔의 파과곡선을 측정된 Park 등[13]의 연구에 의하면 흡착온도가 증가함에 따라 파과곡선이 왼쪽으로 이동하였으나 본 연구에서는 실험온도 범위에서 파과곡선이 교차하는 현상으로 나타났다. 이는 Table 1에서 나타난 바와 같이 흡착온도 증가에 따라 흡착 반응속도와 반응물의 비활성속도가 이전의 실험과 비교하여 크게 증가한 때문으로 생각된다. 앞서와 동일방법으로 k_o 와 k_d 를 구하여 Table 1에 나타내었으며, 흡착온도 변화에 대한 k_o 와 k_d 의 Arrhenius 플롯을 Fig. 6에 나타내었다.

플롯은 직선을 잘 만족하였으며, 직선의 기울기와 절편으로부터 다음과 같은 실험식을 구하였으며, 흡착반응과 비활성반응의 활성화 에너지는 각각 30.72 , 15.03 kJ/mol 이었다.

$$k_o = 3.95 \times 10^{12} \exp\left(-\frac{30.72 \times 10^3}{RT}\right) \quad (6)$$

$$k_d = 156.4 \exp\left(-\frac{15.03 \times 10^3}{RT}\right) \quad (7)$$

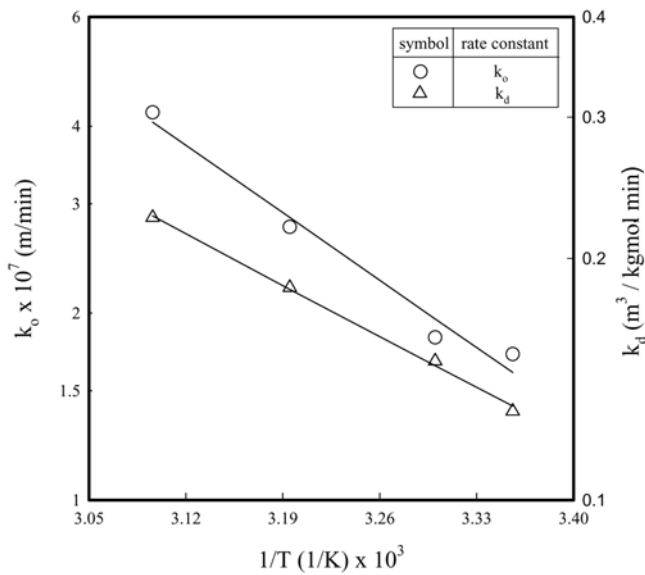


Fig. 6. Arrhenius plots of k_o and k_d at $Q=120 \text{ cm}^3/\text{min}$, $w=3.0 \text{ g}$ and $T_s=25 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.5. 흡착 등온선 모델과의 비교

흡착제의 흡착용량, 흡착열 등의 흡착특성을 예측하기 위하여 여러 형태의 흡착등온관계를 나타내는 평형모델이 사용되고 있으며 이들 모델은 흡착제에 흡착된 피흡착제의 흡착량을 수식화한 모델이다[15]. 그러나 이들 등온식을 작성하는데 필요한 평형실험은 많은 시간이 요구되므로 본 연구에서 사용한 비활성 모델과 기존에 사용하고 있는 흡착 등온선을 다음과 같이 비교하여 파과곡선의 해석으로부터 흡착 등온식을 구하는 방법을 제시하였다.

흡착평형에서 기체상과 고체상에서 존재하는 벤젠 증기의 농도 (각각 x 와 y)와 충전층에서 측정된 파과곡선에서 구한 벤젠 증기의 농도(a)와의 관계는 다음과 같다[14].

$$x = \frac{\int_0^t a(t) dt}{\int_0^\infty a(t) dt} \quad (8)$$

$$y = \frac{t - x \int_0^\infty a(t) dt}{\int_0^\infty dt - x \int_0^\infty a(t) dt} \quad (9)$$

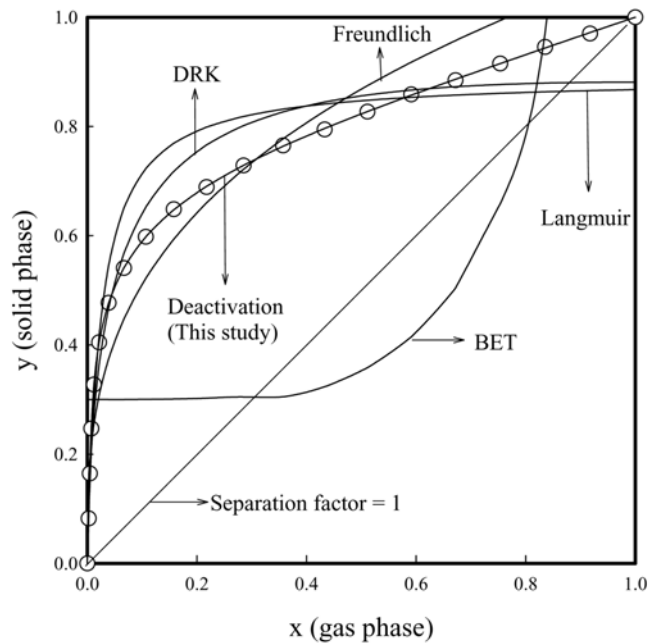


Fig. 7. Comparison of the models in describing to the breakthrough curves of benzene vapor according to Table 2.

Langmuir, Freundlich, BET(Brunauer-Emmett-Teller), DRK(Dubinin-Radshkevich-Kagener) 모델의 흡착 평형을 나타내는 흡착 등온식을 Table 2에 나타내었다. 흡착온도, $30 \text{ }^\circ\text{C}$, 포화온도, $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 질소의 유량, $120 \text{ cm}^3/\text{min}$, 흡착제, 3 g 의 대표적 실험조건에서 구한 충전층의 파과곡선에서 무차원농도(a)를 사용하여 식 (8)과 (9)로부터 x 와 y 를 산출하였다. 상기의 각 모델을 선형으로 전환한 후 최소자승법으로 상수를 구하여 Table 2에 수록하였으며, x 변화에 대한 y 를 도시하여 Fig. 7에 나타내었다. 아울러 파과곡선에서 구한 농도(a)로부터 얻은 측정값을 Fig. 7(○ 표)에 나타내었다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 측정값은 비활성 모델에서 산출한 값에 상관관계계수, 0.998로서 잘 일치하였다. 흡착등온 모델에서 비활성 모델 다음으로 DRK, Freundlich 순으로 높은 상관관계를 나타내었다. 이와 같은 결과는 본 연구에서 사용한 활성탄에 벤젠 증기가 흡착한 현상은 활성탄 표면의 단층보다는 다단층으로 흡착한 것으로 판단되며, 동일한 실험조건에서 활성탄에 흡착한 톨루엔 증기의 흡착결과[13]

Table 2. Selected adsorption isotherms to fit the breakthrough data of benzene vapor for comparison with the deactivation model

Adsorption isotherms	Mathematical representation of adsorption isotherms	Linearized forms	Parameters and correlation coefficients
Langmuir	$y = \frac{ax}{(1+bx)}$	$\frac{1}{y} = \frac{1}{ax} + \frac{b}{a}$	$a = 36.26$ $b = 40.80$ $r^2 = 0.9599$
Freundlich	$y = ax^b$	$\ln(y) = \ln(a) + b \ln(x)$	$a = 1.0913$ $b = 0.3298$ $r^2 = 0.9685$
Brunauer-Emmett-Teller	$y = \frac{x}{(1-x)(a+bx)}$	$\frac{x}{y(1-x)} = a + bx$	$a = -0.7222$ $b = 7.1235$ $r^2 = 0.3901$
Dubinin-Radshkevich-Kagener	$y = a \exp[-b \ln^2(x)]$	$\ln(y) = \ln(a) - b \ln^2(x)$	$a = 0.8811$ $b = 0.0602$ $r^2 = 0.9788$
Deactivation model (this study)	x according to Eq. (8) y according to Eq. (9)		$k_o \tau = 3.110$ $k_d = 0.147$ $r^2 = 0.9983$

와 동일하였다.

5. 결 론

내경 2 cm, 높이 30 cm의 파이렉스로 제작한 충전층을 사용하여 여러 실험조건(흡착온도; 25~50 °C, N₂의 유량, 80~150 cm³/min, 활성탄의 주입량, 3.0~5.0 g)에서 활성탄에 의한 벤젠 증기의 흡착실험을 행하여 벤젠 증기의 파과곡선을 측정하였다. 파과데이터로부터 평형에서 고체상과 기체상에 존재하는 벤젠 증기의 농도를 구하여 흡착등온 모델로서 해석하였으며, 검토한 모델 중 비활성모델에 가장 잘 일치하였고, 다음으로 DRK, Freundlich 모델 순으로 높은 상관관계를 나타내었다. 비활성 모델에 적용하여 흡착속도론을 해석하였으며, 비활성 모델의 흡착반응과 비활성반응의 활성화 에너지는 각각 30.72, 15.03 kJ/mol이었다.

사용기호

C_A : concentration of benzene vapor in the gas phase(kgmol/m³)
 f_{bed} : bed voidage
 k_d : deactivation rate constant(m³/kgmolmin)
 k_o : adsorption rate constant(m/min)
 Q : volumetric flow rate of inert gas(m³/min)
 Q_o : volumetric flow rate of inert gas and benzene vapor(m³/min)
 R : ideal gas law constant(J/mol)
 S : vacant surface area of the adsorbent(m²)
 t : adsorption time(min)
 T : adsorption temperature(K)
 T_s : saturator temperature(°C)
 w : weight of activated carbon(g)

그리스 문자

α : adsorption activity of solid sorbent(-)
 ρ_B : bulk density of activated carbon(kg/m³)

아래첨자

A : benzene vapor
 o : initial value

감 사

이 논문은 2008년도 부산가톨릭대학교 교내연구비에 의하여 연구되었으며, 학교의 연구비 지원에 감사드립니다. 늘 후학들에게 진정한 선생으로서의 모범을 보여주셨던 박상욱 선생님의 영예로운 정년퇴임을 축하드리며 퇴임 후에도 늘 건강하시고 행복한 시간 보내시길 기원합니다.

참고문헌

1. Kim, H. S. and Park, Y. S., "Binary Component Adsorption Characteristics of Benzene and Toluene at the Fixed-bed Adsorption Column with Activated Carbon," *J. of KSEE*, **25**, 977-983(2003).
2. Ruhl, M. J., "Recover VOCs Via Adsorption on Activated Carbon," *Chem. Eng. Prog.*, **37**, 1344-1350(1993).
3. Noll, K. E., Gounaris, V. and Hou, W. S., *Adsorption technology for air and water pollution control*, Lewis Publishers, Inc., Michigan(1992).
4. Kim, D. J., Shim, W. G. and Moon, H., "Adsorption Equilibrium of Solvent Vapors on Activated Carbons," *Korean J. Chem. Eng.*, **18**, 518-524(2001).
5. Lee, M. G., Lee, S. W. and Lee, S. H., "Comparison of Vapor Adsorption Characteristics of Acetone and Toluene Based on Polarity in Activated Carbon Fixed-bed Reactor," *Korean J. Chem. Eng.*, **23**, 773-778(2006).
6. Nelson, G. O. and Harde, C. A., "Respirator Cartridge Efficiency Studies : V. Effect of Solvent Vapor," *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **37**, 391-410(1974).
7. Nelson, G. O. and Harde, C. A., "Respirator Cartridge Efficiency Studies : VI. Effect of Concentration," *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **37**, 205-216(1976).
8. Wood, G. O., "Estimating Service Lives of Organic Vapor Cartridges," *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **55**, 11-15(1994).
9. Son, M. S., Kim, S. D., Woo, K. J., Park, H., Seo, M., Lee, S. and Ryu, S. K., "Adsorption Characteristics of Three-components Volatile Organic Compounds On Activated Carbonaceous Adsorbents," *Korean Chem. Eng. Res.*, **44**, 669-675(2006).
10. Ruthven, D. M., *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*, John Wiley, New York(1984).
11. Yoon, J. H. and Nelson, G. O., "Application of Gas Adsorption Kinetics : I. A Theoretical Model for Respirator Cartridge Service Life," *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **45**, 509-516(1984).
12. Yasyerli, S., Dogu, T., Dogu, G. and Ar, I., "Deactivation Model for Textural Effects on Kinetics of Gas-solid Non-catalytic Reactions; Char Gasification with CO₂," *Chem. Eng. Sci.*, **51**, 2523-2528(1996).
13. Park, S. W., Choi, B. S. and Lee, J. W., "Breakthrough Data Analysis of Adsorption of Toluene Vapor in a Fixed-bed of Granular Activated Carbon," *Sep. Sci. Technol.*, **42**, 2221-2233(2007).
14. Park, S. W., Sung, D. H., Choi, B. S., Oh, K. H. and Moon, K. H., "Sorption of Carbon Dioxide Onto Sodium Carbonate," *Sep. Sci. Technol.*, **41**, 2665-2684(2006).
15. Suzuki, M., *Adsorption Engineering*, Kodansha Ltd., Tokyo(1990).