

## 활성탄소섬유를 이용한 휘발성유기화합물 (VOCs-BTX)의 흡착특성

### Adsorption Characteristics of Volatile Organic Compounds-BTX on Activated Carbon Fiber

김 한 수 · 박 영 성

대전대학교 공과대학 환경공학과

(1999년 5월 6일 접수, 2000년 1월 4일 채택)

Han-Soo Kim and Yeong-Seong Park

*Department of Environmental Engineering, Taejon University*

(Received 6 May 1999; accepted 4 January 2000)

#### Abstract

Adsorption characteristics of volatile organic compounds (VOCs) by activated carbon fiber (ACF) were investigated using a continuous system for benzene, toluene, xylene (BTX) generation. Studied characteristics for adsorption were equilibrium capacity, accumulative adsorption, and breakthrough curve. Operating variables were adsorption temperature (25~45°C) and partial pressure (1.2~12 mmHg) of BTX. The experimental results show that the adsorption equilibrium capacity increases with increasing partial pressure of BTX and decreases with increasing temperature. It was also found that the break point was decreased with increasing partial pressure, temperature and gas flow rate due to an effect of mass transfer of adsorbates.

**Key words** activated carbon fiber, volatile organic compounds, adsorption equilibrium capacity, breakthrough curve

#### 1. 서 론

휘발성 유기화합물질 (volatile organic compounds : VOCs)은 탄화수소화합물의 총칭으로 중독이나 발암성 등의 인체유해물질, 지구온난화와 성층권 파괴의 원인물질, 대기 중 악취 물질로서 환경 및 건강에 영향을 초래하는 물질을 말한다. 특히 대기 중에서 태양빛을 받아 광화학반응을 일으켜 ground

level ozone을 만들고 스모그를 형성하는 물질로 20°C에서 증기압이 0.13kPa보다 크고 101 kPa보다 작은 유기물질로 정의된다.

특히, 벤젠과 같은 VOC물질은 인간에서의 발암성이 입증된 독성이 매우 강한 물질로서 화학, 제약, 석유화학 분야에서 벤젠을 제조하거나 사용하는 사업장의 근로자는 약 10만명으로 추정될 정도로 광범위하게 이용되고 있다. 따라서 우리나라를 포함한 대부분의 나라에서는 사업장에서의 벤젠 사용을

엄격히 통제하고 있는 실정이며 미량의 벤젠을 포함하고 있는 석유제품 사용시 지속적인 폭로는 현실적으로 통제하기가 어렵기 때문에 아직까지도 벤젠은 사업장 뿐만 아니라 일반환경의 중요한 문제로 남아 있다. 그리고 톨루엔은 벤젠과 달리 글수장에는 없는 것으로 알려져 있으나 사업장과 같은 환경에서 100 ppm 이상의 고농도 톨루엔에 폭로되던 눈, 목, 기도 및 피부의 자극증상과 함께 마취에 이르기 전단계의 지구증상이 나타난다고 알려져 있다 (장성기, 1997).

따라서 보다 효과적이고 경제적인 벤젠 및 톨루엔과 같은 VOCs 처리기술개발이 요구되는 실정이며 현재 소각을 이용한 방법이 가장 널리 사용되고 있으나 산업 유기용제의 회수, 에너지 절약 및 순환의 관점에서 흡착법이 비교적 유리한 기술로 평가되고 있다. 증기상 흡착은 배출가스에서 많은 화합물을 회수하거나 감축시킬 수 있는 효율적인 수단으로 용매회수를 할 때 주로 사용되며, 또한 배출가스 오염물질의 농도가 극히 낮을 때와 오염물질이 비가역성일 때도 사용할 수 있으며 각종 유기화합물에 95~99% 이상의 높은 제거효율을 보인다 (한화진 등, 1991).

흡착공정에서 지금까지는 주로 활성탄이 흡착제로 사용되어 왔지만, 최근에는 여러 가지 우수한 특성을 지닌 활성탄소섬유가 각광을 받고 있다. 활성탄소섬유는 활성탄에 비해 더 넓은 비표면적과 보다 큰 미세공 용적을 지니 흡착용량이 크며 확산거리도 짧아 보다 빠른 흡착속도를 보인다. 탈착성능 또한 우수하여 VOCs의 처리에 이용될 경우 회수율이 향상되며, 물질전달영역(MTZ)이 좁아 비사용층의 길이가 짧아 흡착제의 이용이 효율적이다.

활성탄소섬유가 새로운 흡착제로 각광을 받으며 그 사용이 증가되고 있지만 활성탄소섬유를 재생하고 VOCs를 회수하는 방법에 관해서는 아직 명확하게 밝혀지지 않았다. 경제적인 측면을 고려할 때 흡착제의 재사용과 VOCs의 회수는 흡착공정의 장점을 부각시킬 수 있으며, 환경적인 측면에서도 VOCs로 포화된 흡착제의 폐기는 또 다른 공해문제를 유발시키므로 재생이 필수적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 פע늘계의 활성탄소섬유(activated carbon fiber : ACF)를 흡착제로 사용하여 방향족계 등의 VOCs 중의 벤젠, 톨루엔 그리고 크실렌에 대

한 흡착온도와 흡착가스의 유속 및 흡착질의 농도에 따른 흡착 및 파과특성을 고찰하였다.

## 2. 이론 고찰

흡착평형에 대한 연구는 속도론적 접근방법, 열역학적 접근방법, potential 이론을 이용한 방법 등의 3 가지 방법을 이용하여 진행되어 왔다. 그 중 속도론적 접근방법은 모델의 단순성에도 불구하고 가스 흡착데이터를 잘 예측하므로 흡착을 이용한 가스 분리 공정에 많이 쓰이고 있다. 이러한 모델식의 대표적인 예로는 Langmuir 평형식 외에도 BET 평형식이 있다. Langmuir 평형식은 균일한 흡착에너지를 가지는 흡착점에 흡착질이 monolayer로 흡착한다는 가정하에서 유도되었으며 BET 평형식은 multilayer 까지 확장한 것이다. 실제로 흡착제 표면의 에너지는 균일하지 않으므로 Langmuir 평형식의 적용 범위는 제한적이다. 이러한 Langmuir 평형식의 단점을 극복하기 위해 많은 형태의 모델식이 제시되고 있으며, Freundlich 평형식은 흡착제 표면이 불균일할 경우에 잘 맞지만 낮은 압력에서 Henry의 법칙을 만족하지 못하는 단점이 있다. Redlich and Peterson은 Langmuir 평형식과 Freundlich 평형식을 조합하여 낮은 압력에서 Henry의 법칙을 만족하는 평형식을 제시하였다. 이상 세가지 등온평형에 대한 기본적인 관계식은 다음과 같다.

### 2.1 Langmuir isotherm

물리적인 흡착과 화학적인 흡착에서 가장 간단하면서도 가장 유용하게 사용되는 식이 Langmuir isotherm이며, 균일표면에서의 단층흡착의 경우에 적용될 수 있다. 이러한 등온흡착식은 흡착과 탈착속도식 사이의 동적 평형에 개념적인 기초를 두고 있다. 흡착이 일어난 흡착점에서는 더 이상 흡착되지 않으므로 단위표면적당 흡착속도는  $\alpha v(1 - \theta)$ 이다. 여기서  $\alpha$ 는 sticking probability이며,  $v$ 는 collision frequency이고,  $\theta$ 는 흡착분율이다. Langmuir isotherm은 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$\theta = \frac{q}{q_{\max}} = \frac{bP}{1 + bP} \quad (2-1)$$

$q$ 와  $q_{\max}$ 는 각각 흡착몰수와 최대평형흡착몰수이

며,  $b$ 는 흡착평형정수,  $P$ 는 압력이다.

2.2 Freundlich isotherm

무정형 표면에서 흡착이 일어날 경우에 표면의 흡착률이 증가함에 따라서 흡착열이 지수함수로 감소한다고 가정하면 Langmuir isotherm을 통계적으로 처리하여 Freundlich isotherm을 이론적으로 유도할 수 있다. 이 식은 원래 실험적으로 구하였으며 다음과 같이 나타낸다.

$$q = k P^{1/n} \tag{2-2}$$

여기서 항상  $n > 1$ 이며, 온도가 증가함에 따라서  $n$ 과  $k$ 는 감소한다 이 식은 Langmuir isotherm이 적용되지 않는 경우에 넓은 범위의  $q$  값에 대해 잘 맞는다.

2.3 Langmuir-Freundlich isotherm

단약에 한 개 분자가  $n$ 개의 흡착점을 차지하면서 각각의 활성점이 다른 에너지를 갖고 있다면 다음 식으로 표시되며, 이를 Langmuir-Freundlich isotherm이라고 한다(박영태, 1996; 전영웅, 1995).

$$\theta = \frac{q}{q_{max}} = \frac{b P^{1/n}}{1 + b P^{1/n}} \tag{2-3}$$

3. 실험

3.1 흡착제 및 흡착질

본 실험의 흡착제로는 페놀계의 활성탄소섬유를 이용하였으며, forced convection drying oven (Chang Shin Scientific, C-DF)에서 150°C, 2시간 이상 전처리 한 후 사용하였다. 비표면적이 약 1,500 m<sup>2</sup>/g, 섬유경이 9~11 μm, 세공경이 15~35 Å, 그리고 섬유강도가 30~40 kg/mm<sup>2</sup>의 물리적인 특성을 갖고 있다. 또한 흡착질로는 Junsei Chemical Co., Ltd.의 벤젠, 톨루엔 및 크실렌을 사용하였으며 모두 99.5% 순도의 Guaranteed Reagent를 사용하였다.

3.2 흡착실험장치

통상 흡착제의 용매증기 흡착성능은 U자관에 충전한 흡착제에 일정온도, 유속조건에서 용매증기를 통과시켜 흡착제의 무게변화를 측정하고 아울러 기체 크로마토그래피 (gas chromatography, GC)를 통한 가스분석을 통해 산출한다. 본 실험에 적용된 실험장치는 그림 1과 같다. 실험장치는 크게 VOC 발생부분, 흡착제 충전층(U자관), GC부분 등으로 구성된다. VOC 발생부분은 온도조절용 수조 (water bath), 용제를 담은 세척병과 유량계 등이 포함된다

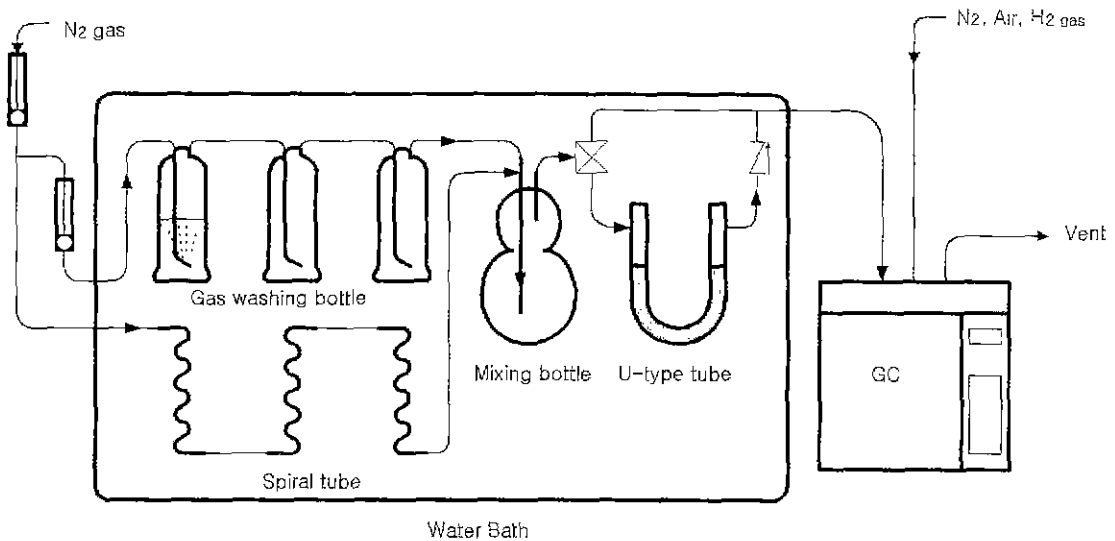


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

(한국산업규격, 1993).

### 3.3 실험방법

수목조의 온도를 일정하게 설정한 다음, 대상 VOC시료의 용제가 담긴 가스세척병 속으로 일정량의 불활성 carrier 가스(질소)를 보내줌으로써 가스상태의 VOC가 발생되는데, 이때 가스세척병으로 공급되는 질소가스량과 spiral tube로 공급되는 희석용 질소가스량을 변화시킴으로써 VOC 발생농도가 조절된다. 발생된 VOC가스를 by-pass line으로 통과시키면서 GC로 분석하여 해당 VOC 농도가 설정치의  $\pm 1\%$  이내로 유지될 때 three way valve를 조절하여 U자관 내로 시료가스를 통과시키면서 흡착 실험을 수행하였다. 시료로 공급되는 VOC의 발생농도는 4.8~48 mg/liter (분압환산치, 1.2~12 mmHg)이며 U자관내로 공급되는 혼합가스의 유량은 1~4 liter/min 범위에서 적용되었다.

또한 건조된 흡착제 약 1.5g을 내경 18mm, 길이 85mm의 U자관에 충전한 후 설정된 농도의 흡착질 가스를 주입하여 흡착실험을 진행하였다. 흡착이 진행되는 동안 약 10분 간격으로 GC를 이용하여 가스농도를 분석하였으며, digital balance (Muttler 300)를 이용하여 흡착제의 무게 변화량을 측정하였다. GC의 분석조건은 아래의 표 1에 나타내었으며, U자관의 출구에서 유출가스의 농도(Co)가 유입가스

농도(Ci)와 거의 같은 수준( $Co/Ci \approx 1$ )이 되고 흡착제의 무게변화가 거의 없을 때를 흡착평형으로 간주하고 흡착실험을 종료한다. 실험조건은 표 2와 같다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 누적흡착량

그림 2는 주어진 온도와 서로 다른 분압조건에서 활성탄소섬유 흡착제에 대한 벤젠의 누적흡착량을 나타낸 것이다. 여기서 벤젠의 분압을 2.4, 4.8, 9.6 mmHg로 변화시키며 실험한 결과, 분압이 증가할수록 누적흡착량이 증가되면서 좀더 짧은 시간에 포화량(평형치)에 이르는 것을 보여주고 있다. 이러한 현상은 벤젠의 분압이 증가할수록 유입되는 기체중의 벤젠의 농도가 커지므로 흡착제의 기공내 물질이동이 빨라져 흡착속도가 크게 증진되기 때문인 것으로 볼 수 있다(최익수, 1991).

여기서 벤젠의 분압이 9.6 mmHg일 경우에 평형 흡착량은 약 480 mg/g에 달하지만 김한수 등(1998)이 제시한 결과에서 활성탄에 대한 평형흡착량은 약 310 mg/g 정도로 활성탄소섬유의 흡착능이 더 우수함을 알 수 있었다.

그림 3은 주어진 분압하에서 온도에 따른 크실렌의 누적흡착량을 나타낸 것이다. 흡착온도가 높을수록 시간에 따른 누적흡착량이 증가되면서 포화흡착

Table 1. Analysis condition of gas chromatography.

GC	DONAM DS 6200
Detector	FID(flame ionization detector)
Column	GS-Alumina Capillary
Carrier gas	N <sub>2</sub>
Oven temperature (°C)	165
Injector temperature (°C)	200
Detector temperature (°C)	200
Range (10 <sup>n</sup> )	n=2
Flow rate (N <sub>2</sub> :H <sub>2</sub> : Air, ml/min)	30 30 300

Table 2. Adsorption experimental parameter.

Parameter	Application
Adsorbent	Activated carbon fiber (ACF)
Adsorbates	benzene, toluene, xylene
Temperature range (°C)	25~45
VOC concentration (mg/liter)	4.8~48
VOC partial pressure (mmHg)	1.2~12
Mixed gas flow rate (l/min)	1~4

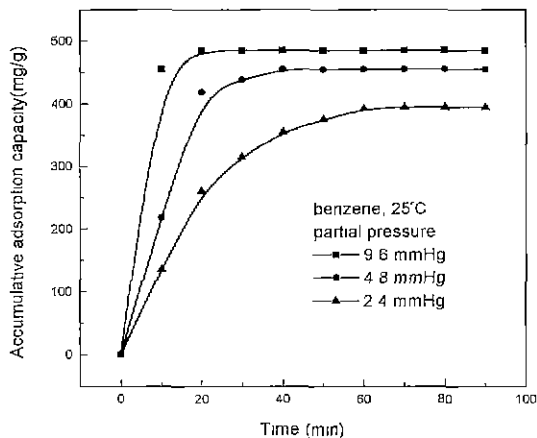


Fig. 2. Accumulative adsorbed amounts for different partial pressures of benzene.

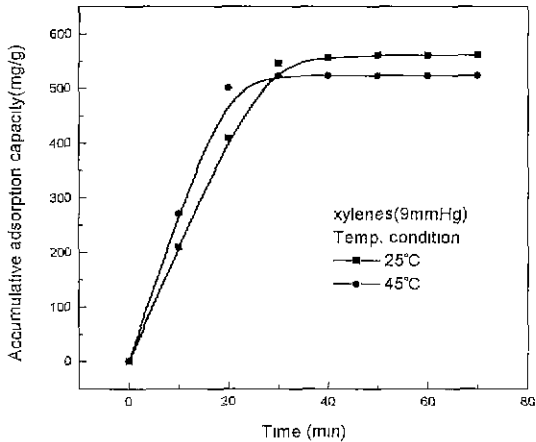


Fig. 3. Accumulative adsorbed amounts for different temperatures of xylenes.

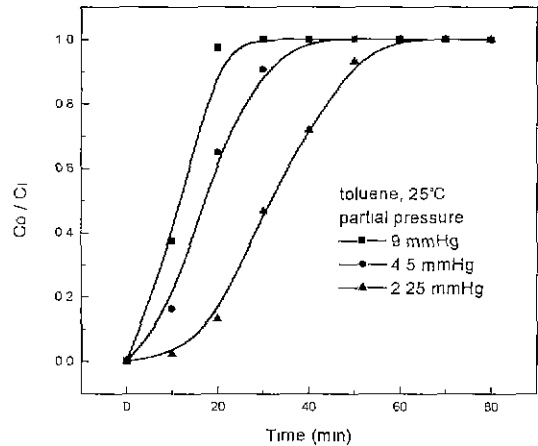


Fig. 5. Breakthrough curves for different partial pressures of toluene.

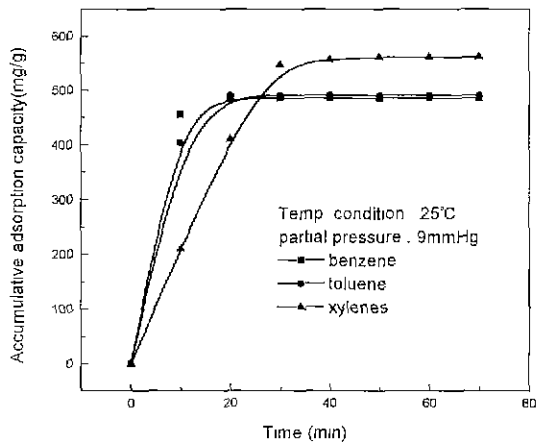


Fig. 4. Accumulative adsorbed amounts for different adsorbates.

에 빨리 도달됨을 보여주고 있다. 이러한 현상은 온도 증가시 흡착질의 확산계수가 증가하여 흡착제의 세공내에서의 확산이 용이해지기 때문인 것으로 판단된다(최익수, 1991). 한편, 온도가 높을수록 흡착질의 휘발성량이 증대되면서 포화흡착량이 약간 감소됨을 보이고 있다

그림 4는 BTX의 시간에 따른 누적흡착량을 표시한 것으로 주어진 온도조건에서 흡착속도는 벤젠, 톨루엔, 크실렌의 순으로 나타나 분자량에 반비례함을 보여주고 있다. 이처럼 크실렌의 경우 흡착속도

가 가장 느린 것은 벤젠이나 톨루엔에 비해 흡착제의 기공내부로의 확산이 느려지기 때문으로 볼 수 있다(심희중, 1996).

#### 4.2 파과특성

그림 5는 분압에 따른 톨루엔의 파과특성을 나타낸 것이다. y축은 초기유입농도에 대한 유출농도의 비( $C_o/C_i$ )로 표시하였고 파과점(break point)은 유출농도의 비가 10%일 때의 시간으로 간주할 경우, 톨루엔의 분압조건이 9 mmHg에선 흡착을 시작한 약 2~3분이내에, 4.5 mmHg에선 5분, 2.25 mmHg일 경우는 17분 정도에서 파과가 이루어졌으며 파과점을 지난 후에 포화상태( $C_o/C_i=1.0$ )에 이르는 시간이 각각 약 30분, 50분, 70분 정도를 나타내고 있다. 분압이 높을수록 파과시간이 빨라지는데 이는 분압이 증가할수록 VOC의 확산이 용이해져 흡착속도가 증가하면서 보다 빨리 흡착이 포화상태에 이르게 되므로 파과시간이 단축되는 것으로 볼 수 있다(황계순 등, 1998).

그림 6은 활성탄소섬유 흡착제에 있어서 온도변화시 벤젠에 대한 파과특성을 나타낸 것이다. 온도가 높을수록 파과시간의 단축과 함께 포화흡착상태에 쉽게 도달하는 것으로 나타났다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 온도 증가시 흡착속도는 증가되는 대신에 흡착포화용량이 줄어들기 때문에 파과시간이 짧아지고 포화상태에 이르는 시간이 크게 단축

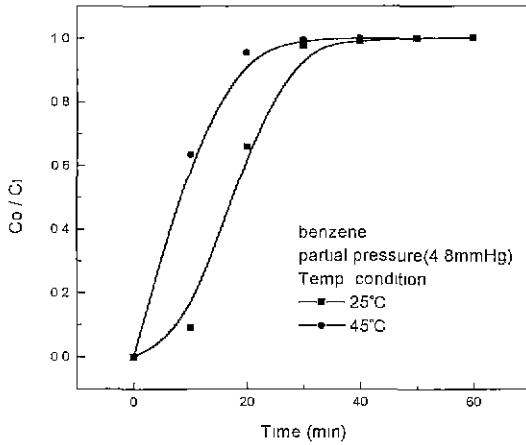


Fig. 6. Breakthrough curves for different temperatures of benzene.

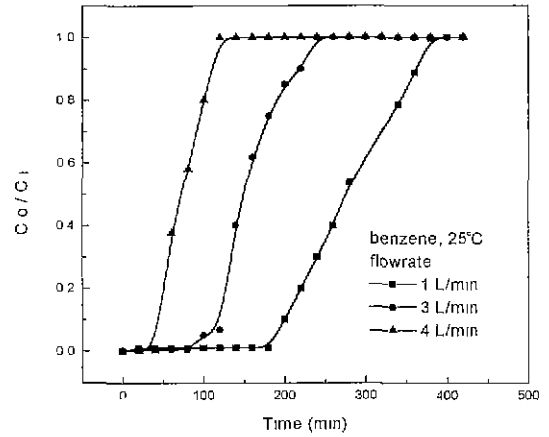


Fig. 8. Breakthrough curves for different inlet gas flow rates.

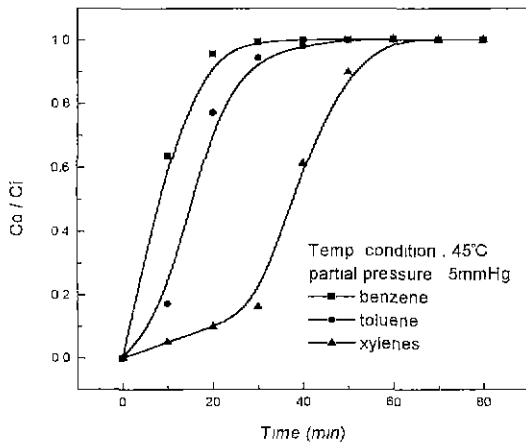


Fig. 7. Breakthrough curves for different adsorbates.

되는 것으로 판단된다(이재광 등, 1997; 유승곤, 1993).

그림 7은 45°C, 분압이 약 5 mmHg 조건에서 벤젠, 톨루엔, 크실렌의 파과특성을 나타낸 것이다. 앞에서 정의한 파과점에 이르는 시간이 크실렌이 가장 느린 약 20분 후에 파과에 도달하였고, 파과점을 지나 흡착 포화상태(Co/Ci = 1.0)에 도달하는 시간이 벤젠, 톨루엔, 크실렌 각각 약 40분, 60분, 70분으로 나타나 크실렌이 벤젠이나 톨루엔에 비해 파과점에 도달하는 시간이 느림을 알 수 있었다. 이러한 현상은 벤젠이나 톨루엔에 비해 크실렌의 평형흡착

량이 훨씬 큰데 반해 분자량이 상대적으로 크므로 흡착제 기공 내부로의 확산이 느리기 때문인 것으로 간주된다(이재광 등, 1997; 심희중, 1996).

그림 8은 동일한 분압 조건에서 전체 유입되는 유량의 변화에 따른 흡착특성을 나타낸 것으로 전체 유입량이 증가할수록 평형흡착량에 이르는 시간이 빠름을 보이고 있다. 이는 흡착가스 유속이 증가함에 따라 가스막에서 물질전달계수의 증가와 함께 흡착질의 기공내 이동이 촉진되기 때문이다(민병무, 1993).

### 4.3 평형흡착능 (adsorption equilibrium capacity)

그림 9는 벤젠의 분압과 온도에 따른 평형흡착량 곡선을 나타낸 것이다. 여기서 분압이 증가할수록, 온도가 낮을수록 평형흡착량은 20~30% 증가하는 경향을 보이므로 평형흡착량은 온도에 반비례하고 분압에 비례하는 함수적인 관계를 나타내고 있다. 평형흡착량이 온도에 반비례함은 온도가 증가할수록 흡착질의 휘발성향이 증대되면서 흡착을 방해하기 때문인 것으로 볼 수 있다(문기호 등, 1995). 그리고 주어진 온도에서 시료 가스의 분압에 비례하여 평형흡착량이 증가하는 것은 Langmuir나 Freundlich의 등온흡착식에서 제시된 일반적인 흡착특성에 부합되는 것이다(김명숙 등, 1997; 이영준 등, 1996).

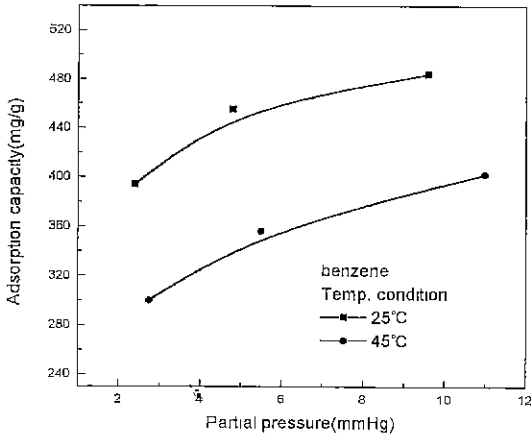


Fig. 9. Adsorption equilibrium capacity of benzene on activated carbon fiber.

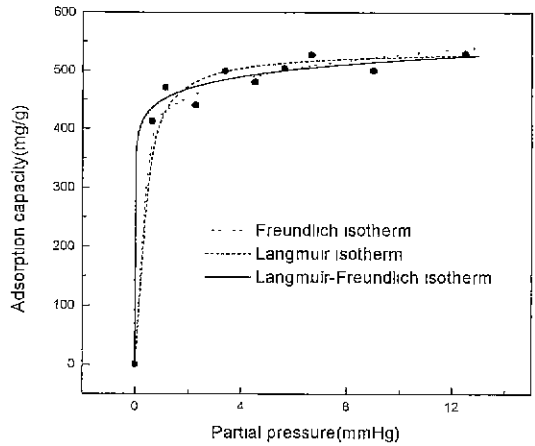


Fig. 11. Adsorption isotherm of toluene on activated carbon fiber.

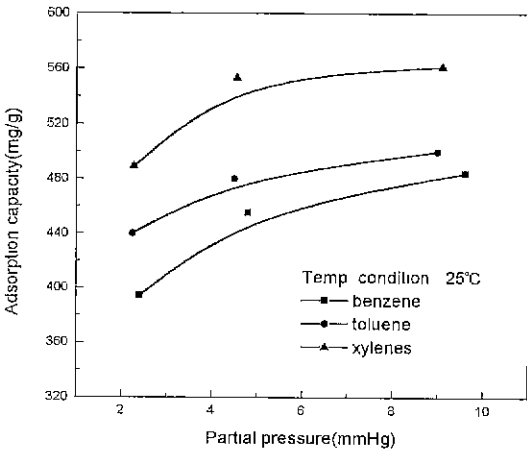


Fig. 10. Adsorption equilibrium capacity of adsorbates on activated carbon fiber.

그림 10은 흡착질의 종류에 따른 평형흡착량을 나타낸 것이다 온도조건이 25°C, 분압이 약 2 mmHg에서 벤젠의 평형흡착량이 390 mgVOC/gACF, 톨루엔이 440 mg VOC/gACF, 크실렌이 490 mgVOC/gACF 정도의 흡착량을 갖는 것으로 보아 평형흡착량은 벤젠 고리에 메틸기(CH<sub>3</sub>)가 하나나 둘이 도입된 크실렌(분자량=106.17)과 톨루엔(92.14)이 벤젠(78.11)에 비해 커다란 흡착량을 보임을 알 수 있다. 또한 이행자 등(1993)의 연구에 의하면 흡착량은 흡착제의 종류, 흡착질의 분자량, 관능기의 종

류 및 위치에 따라 크게 변화됨을 제시하고 있다.

또한 김한수 등(1999)이 제시한 활성탄, 활성탄소섬유 및 제오라이트에 대한 톨루엔의 평형흡착량관계에서도 활성탄소섬유의 평형흡착능은 활성탄에 비해 약 1.43배, 제오라이트에 대해서는 약 50배의 월등한 성능을 보이고 있다.

#### 4. 4 등온흡착식(adsorption isotherm equation)

그림 11은 톨루엔에 대한 고정층 평형흡착량을 Langmuir, Freundlich 그리고 Langmuir-Freundlich의 식으로 모사한 것을 나타내고 있다 ACF에 대한 톨루엔의 흡착평형이 위로 불룩한 형태(favorable type)이고 Langmuir, Freundlich 그리고 Langmuir-Freundlich의 식 모두 실험치에 대한 모사가 가능함을 보이고 있다(황계순, 1998).

### 5. 결 론

활성탄소섬유를 이용한 휘발성유기화합물(VOC)의 흡착실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 활성탄소섬유에 대한 VOC의 흡착속도는 분압이 증가할수록, 온도가 증가할수록, 그리고 분자량이 작을수록 빨라짐을 알 수 있었다.
- 2) 벤젠, 톨루엔, 크실렌의 평형흡착량의 크기는 크실렌 > 톨루엔 > 벤젠 순으로 분자량에 비례하는

것을 알 수 있었다.

3) 동일한 분압 조건에서 유입 유량이 클수록 시료의 확산 속도가 빨라져 그에 따른 흡착속도가 증가함을 알 수 있었다.

4) 활성탄소섬유에 대한 파과특성은 온도가 높을수록, 흡착질의 분자량이 작을수록, 그리고 분압이 높을수록 파과시간이 짧아짐을 알 수 있었다.

5) 활성탄소섬유에 대한 톨루엔의 흡착평형은 Langmuir, Freundlich 그리고 Langmuir-Freundlich 식에 잘 부합됨을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- 김명숙, 송덕만 조향대, 최원길, 이형근(1997) 활성탄 고정층 반응기에서 BTX의 기상 흡착특성, 화학공학의 이론과 응용, 3, 2681-2684.
- 김한수, 장효섭, 박명배, 박영성, 민병무(1999) 방향족계통 휘발성 유기화합물(VOCs)의 흡착 특성, 대한환경공학회, 21(3), 481-488
- 김한수, 장효섭, 박영성(1998) 활성탄에 이용한 휘발성 유기화합물(VOCs-BTX)의 흡착특성, 대전대학교 환경문제연구소, 1(3), 59-68.
- 문기호, 나병기, 송형근, 서성섭(1995) 활성탄에 대한 CO<sub>2</sub>-CO-H<sub>2</sub> 혼합기체의 흡착평형, 화학공학, 33(5), 621-632
- 민병무(1993) 염화제 1구리를 함침시킨 활성탄 흡착제의 CO 및 CO<sub>2</sub> 흡착특성, 박사 학위논문, 서강대학교, 89-90
- 박영태(1996) 신티 활성탄-기초와 응용, 동화기술
- 심희중(1996) PAN계 활성탄소섬유에 의한 SO<sub>2</sub> 흡착과 활성탄에 의한 NOx 및 VOC 흡착특성에 관한 연구, 석사학위논문, 동국대학교, 47-55.
- 유승곤(1993) 흡착제와 그의 활용에 관한 WORKSHOP II, 한국화학공학회, 2, 127-150
- 이영준, 양재영, 이창하(1996) 제올라이트 5A와 활성탄에 대한 CH<sub>4</sub>와 CO의 흡착특성, 화학공학의 이론과 응용, 2, 1689-1692
- 이재광, 김경진, 김선영, 양병호, 유승곤(1997) 활성탄소섬유와 활성탄을 이용한 수중 잔류염소와 페놀의 흡착, 화학공학의 이론과 응용, 3, 2113-2116.
- 이행자, 최광재, 정영언, 손진언(1993) 임상활성탄에 의한 BTX 및 할로젠화알칸의 기상흡착특성, 동아대학교 대학원 논문집, 제18집, 425-444.
- 장성기(1997) 국내의 휘발성 유기화합물(VOC)의 관리현황, 한국대기보전학회 측정분석분과회 워크샵, 한국대기보전학회, 3-25.
- 진영웅(1995) Removal of toxic organic phenols from waste water solution by adsorption on organically modified clay, 제 2회 환경학술논문집, 연강재단, 435-485.
- 최익수(1991) 흡착제와 그의 활용에 관한 WORKSHOP I, 한국화학공학회, 1, 5-21
- 한국산업규격, "활성탄 시험 방법", KS, M 1802-1993
- 한화진, 최상기, 김승우, 조억수, 임보은(1991) VOC 배출원별 배출량산정 및 저감기술연구, 한국환경기술개발원 연구보고서 대한석유협회.
- 황계순, 최대기, 공성용(1998) 활성탄 흡착탑에서 휘발성 유기화합물의 열제생 특성(I): 흡착단계, 화학공학, 36(2), 159-168