

## 고정층 활성탄 흡착반응기에서 기상 톨루엔의 흡착특성

임진관·이송우·감상규·이동환\*·이민규  
부경대학교 응용화학공학부, \*제주대학교 토목환경공학부, \*\*동의대학교 물질과학부  
(2004년 5월 20일 접수; 2005년 1월 25일 채택)

## Adsorption Characteristics of Toluene Vapor in Fixed-bed Activated Carbon Column

Jin-Kwan Lim, Song-Woo Lee, Sang-Kyu Kam\*, Dong-Whan Lee\*\* and Min-Gyu Lee

Division of Applied Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

\*Division of Civil and Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

\*\*Division of Material Science, Donggeui University, Busan 614-714, Korea

(Manuscript received 20 May, 2004; accepted 25 January, 2005)

Adsorption characteristics of toluene vapor, which is one of important source of volatile organic compounds (VOCs), by activated carbon were investigated using a fixed bed adsorption column. The operating parameters such as breakthrough curve, adsorption capacity, mass transfer zone (MTZ), and length of unused bed (LUB) were studied. The experimental results showed that the breakthrough time decreased with increasing inlet toluene concentration and gas flow rate. MTZ and LUB increased with the increase of inlet concentration, gas flow rate, and particle size of activated carbon. The adsorption capacity increased with the increase of inlet toluene concentration, while it decreased with increasing particle size. However, it was kept at constant value regardless of the increase of gas flow rate. Adsorption isotherm of toluene vapor could be represented by the Freundlich adsorption equation fairly well. From the adsorption experiments using some VOC gases such as toluene, xylene, butyl acetate, butanol and acetone, it was also found that the adsorption capacity was higher in the case of gas with higher boiling point and lower vapor pressure.

Key Words : Activated carbon, Adsorption, Toluene, Adsorption capacity, Mass transfer zone, Length of unused bed

### 1. 서론

휘발성 유기화합물(Volatile organic compounds, VOCs)은 고분자의 용해나 인조피혁, magnetic 및 접착용 테이프 제조, 인쇄, 페인트, 필름 코팅 등 매우 광범위한 분야에서 사용되고 있는데, 대개 건조 공정 중에서 휘발되어 덕트를 통해 대기로 배출된다. 이렇게 배출되는 VOCs는 에너지 손실과 제품의 비용 상승을 초래할 뿐만 아니라 환경을 오염시키고 화재, 폭발 등의 사고와 인체 장애의 원인이 되고 있다.<sup>1)</sup>

최근 환경오염에 대한 관심이 높아지고 작업환경

에 대한 법적 규제가 엄격해지면서 VOCs 회수에 대한 필요성이 증대됨에 따라 이를 효율적으로 회수할 수 있는 공정이나 장치의 개발이 요구되고 있다. VOCs를 회수하는 방법에는 응축법, 흡수법, 흡착법 등이 있으나, 공정 배기가스로부터 저농도의 VOCs를 회수하기 위하여 흡착법이 가장 효율적이고 경제적인 것으로 보고되고 있다.<sup>2)</sup>

일반적인 흡착공정에서 흡착제로 비표면적이 넓고 복잡한 세공구조 및 소수특성을 지니고 있는 활성탄이 가장 많이 사용되고 있다.<sup>3)</sup> 활성탄을 이용하여 기상의 VOCs를 흡착제거하는 연구는 많은 연구자<sup>4-6)</sup>들에 의해 수행되고 있으며, 국내에서도 Lee 등<sup>7)</sup>은 methl ethyl ketone(MEK)의 흡착 및 탈착 특성, Yoo 등<sup>8)</sup>은 methanol의 흡착특성, Kim 등<sup>9)</sup>은 벤젠의 흡착특성을 연구하였다, 또한 Seong 등<sup>10)</sup>과 Kim 등<sup>11)</sup>은 활성탄소섬유(ACF)에 의한 VOCs의 흡

Corresponding Author : Min-Gyu Lee, Division of Applied Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea  
Phone: +82-51-620-1468  
E-mail: mglee@pknu.ac.kr

착특성을 고찰하였다.

활성탄 흡착공정의 성능에 영향을 미치는 인자로서 활성탄의 종류, 흡착질의 농도 및 유입유속 등이 있다. Nelson 등<sup>12,13)</sup>은 농도, 유량, 용제의 증기압 및 수증기 등이 활성탄의 성능에 미치는 영향에 대해 연구를 하였으며, 다른 연구자들도 다른 조건에서 많은 오염물질들에 대한 활성탄의 성능을 평가하였다.<sup>14,15)</sup>

한편 Wood와 Moyer<sup>16)</sup>, Vahdat 등<sup>17)</sup>은 Langmuir 식, Dubinin-Radushkevich 식 그리고 Freundlich 식과 같은 몇 가지 상관관계식들을 고찰하고 이들 식이 실험결과와 잘 일치한다고 하였다. Wood와 Moyer<sup>16,18)</sup>, Chuang 등<sup>19)</sup>, Lucas 등<sup>20)</sup> 그리고 Cui 등<sup>21)</sup>과 같은 많은 연구자들은 이론적인 모델식을 기초로 하여 오염물질들에 대한 활성탄의 흡착용량 및 파과시간을 예측하기 위한 많은 시도를 하였다. 그러나 Yoon과 Nelson<sup>22)</sup>은 전체적인 파과곡선을 예측할 수 있는 간단한 경험식을 제안하였는데 실제 현장에서는 복잡한 수학적식 보다는 간단한 경험식이 보다 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 고정층 활성탄 흡착반응기를 이용하여 대표적인 VOCs 물질 중의 하나인 톨루엔의 흡착특성에 관해 살펴보았다. 실험변수로는 유입농도, 유입유속, 및 활성탄 입자 크기를 달리하여 파과특성, 흡착용량, 물질전달영역(MTZ) 및 미사용 길이(LUB) 등을 살펴보고, 흡착평형관계와 파과특성에 대한 모델식을 검토하였다. 또한, 몇 가지 VOCs 물질들의 활성탄 흡착시 흡착특성과 각 물질의 물리적 특성에 따른 흡착량의 상관관계를 조사하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

본 연구에 사용된 활성탄은 S 화학에서 제조하여 공급하는 코코넛계 활성탄으로 이를 분쇄하여 일정 크기로 체분리 한 다음 건조기에서 105°C로 24시간 건조한 후 테시케이터에 보관하여 사용하였다. 사용한 활성탄의 물성치는 Table 1에 나타내었다. 실험장치는 Fig. 1과 같으며, 흡착 반응기는 내경 16 mm의 pyrex 유리관으로 제작하였다. 먼저 air pump (Young Nam Yasunaga Co. Ltd. LP-40A)를 이용하여 일정유량의 실내공기를 실리카겔 층을 통과시켜 수분을 제거시켰다. 이때 상대습도의 확인은 온도센서와 습도센서(Model : 0563445)가 연결된 습도분석기(Testo, Testo 445)로 측정온도에서의 상대습도(relative humidity, %RH)를 측정하여 상대습도를 5% 이내로 유지하였다. 수분을 제거시킨 건조공기 흐름내로 액상 톨루엔을 실린지 펌프(Cole Parmer International, U.S.A p-74901-10)를 이용하여 일정 유량으로 유입시킴으로써 액상 톨루엔이 기화되도록 하였다.

Table 1. Characteristics of activated carbon used

Properties	Value
Raw material	coconut cell
Type	granular
Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	0.45
Particle size (mesh)	7~10
Iodine adsorption (mg/g)	1,100
Specific surface area (m <sup>2</sup> /g)	945
Total pore volume (cm <sup>3</sup> /g)	0.41
Average pore diameter (Å)	19~20

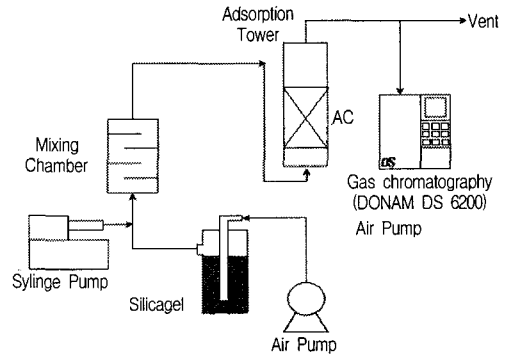


Fig. 1. Schematic diagram of adsorption system.

록 하였다. 기화된 톨루엔 가스는 mixing chamber를 통과시켜 충분히 혼합된 후 반응기의 하부로 유입되도록 운전하였다. 톨루엔 가스의 농도 분석은 FID가 장착된 gas chromatography(Donam, DS-6200)를 이용하여 분석하였다. 먼저 유입부의 톨루엔 농도를 분석한 다음 유출부의 농도는 three-line valve를 이용하여 10분 간격으로 분석하였다. GC의 분석조건은 Table 2에 나타내었다.

활성탄의 크기는 5/7~10/16 mesh, 유입되는 톨루엔 가스의 농도는 30~120 ppm으로 하였으며, 가스유속은 0.33~0.49 m/s로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

활성탄의 비표면적 및 세공구조는 BET 분석장치(Micromeritics, Gemini III 2375 surface area analyzer)를 이용하여 77K에서의 N<sub>2</sub> 흡착자료로부터 구하였다. 비표면적은 P/P<sub>0</sub>를 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3으로 잡고 BET식으로 구하였다. 활성탄의 세공부피

Table 2. Analysis condition of gas chromatography

GC	DONAM DS 6200
Detector	FID (Flame Ionization Detector)
Oven temperature	130°C
Injector temperature	250°C
Detector temperature	200°C
Flow rate (N <sub>2</sub> :H <sub>2</sub> :Air)	30 : 30 : 300

와 분포는 Barret, Joyner 및 Hallenda(BJH) 방법으로 계산하였으며, 활성탄의 요오드 흡착능은 KS M-1802의 활성탄 시험방법에 의거하여 측정하였다.

### 3. 이 론

#### 3.1. 흡착평형

일반적으로 흡착연구에서 대표적으로 사용되는 흡착 등온식은 Freundlich 식과 Langmuir 식이 있으며, Freundlich 식은 다음과 같이 표현된다.<sup>11)</sup>

$$q = KC^n \quad (1)$$

여기서  $q$ 는 평형 흡착량(mg/g),  $C$ 는 평형 농도(ppmv),  $K$ 는 흡착능,  $n$ 은 흡착세기를 나타낸다. 또한 Langmuir 식은 다음과 같이 표현된다.<sup>11)</sup>

$$q = \frac{q_{\max} bC}{1 + bC} \quad (2)$$

여기서  $q_{\max}$ 는 이론적인 최대 흡착량을 나타내며,  $b$ 는 흡착으로 인한 자유도 감소와 에너지 상태의 차이를 반영하는 평형상수를 나타낸다.

#### 3.2. MTZ, LUB 및 파과곡선

연속식 고정층 흡착실험을 통해 시간에 따른 흡착층 출구 농도를 분석하여 이 농도를 흡착층 입구 농도로 나눈 값( $C/C_0$ )으로 나타내면 파과곡선이 얻어진다. 이러한 고정 흡착층 파과곡선으로부터 도출할 수 있는 실험적 자료들은 고정 흡착층의 흡착성에 관계되는 흡착층의 흡착용량(adsorption capacity,  $q$ )과 미사용길이(length of unused bed, LUB) 및 물질전달 영역(mass transfer zone, MTZ)이다.

고정층 흡착실험으로 얻어지는 파과곡선상에서 흡착제가 더 이상 흡착하지 않고 포화에 도달한 시간까지 흡착된 흡착질의 양을 나타내는 흡착용량은 이론적으로 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>9)</sup>

$$q = \frac{1}{W} C_0 Q \left( t_T - \frac{1}{C_0} \int_0^{t_T} C_i dt \right) \quad (3)$$

여기서,  $t$ 는 시간(min),  $q$ 는 평형 흡착량(mg/g),  $C_0$ 는 흡착층 입구에서의 톨루엔 농도(ppmv),  $C_i$ 는 임의 시간에서의 흡착층 출구에서의 톨루엔 농도(ppmv),  $W$ 는 흡착제 충전량(g),  $t_T$ 는 흡착제가 더 이상 흡착하지 않고 포화에 도달한 시간(min),  $Q$ 는 유입되는 톨루엔가스의 유량( $\ell$ /min)을 나타낸다.

또한, 흡착층의 미사용 길이 LUB는 다음 식으로부터 계산할 수 있다.<sup>11)</sup>

$$LUB = \left(1 - \frac{t_b}{t^*}\right)L \quad (4)$$

여기서,  $t_b$ 는 파과시간(breakthrough time),  $t^*$ 는 파과곡선에서 흡착질의 농도가 초기농도의 절반이 되는 점까지의 시간(min),  $L$ 은 고정 흡착층의 길이(cm)이다.

MTZ는 흡착영역으로 흡착이 실제로 일어나는 bed의 활성부분으로써 다음 식으로 표시된다.<sup>23)</sup>

$$MTZ = \left(\frac{V_z}{V_t - 0.5V_z}\right)L = \left(\frac{t_z}{t_t - 0.5t_z}\right)L \quad (5)$$

여기서  $t_z = V_t - V_b = t_t - t_b$ 로 정의된다. 이때  $L$ 은 흡착층의 길이(cm),  $V_b$ 는 유출부에서  $0.1C_0$ 가 검출될 때 까지 처리된 가스의 부피( $\ell$ ),  $V_t$ 는 유출부에서  $0.90C_0$ 가 검출될 때 까지 처리된 가스의 부피( $\ell$ ),  $V_z$ 는 검출부에서  $0.1C_0$ 가 검출되는 시점부터  $0.90C_0$ 가 검출되기까지 처리된 가스의 부피( $\ell$ )로 정의된다. 또한  $t_b$ 는 유출부에서  $0.1C_0$ 가 검출될 때까지의 시간(min),  $t_t$ 는 유출부에서  $0.90C_0$ 가 검출될 때까지의 시간(min),  $t_z$ 는 검출부에서  $0.1C_0$ 가 검출되는 시점부터  $0.90C_0$ 가 검출될 때까지의 시간(min)으로 정의된다.

전체적인 파과곡선은 Yoon과 Nelson<sup>22)</sup>에 의해 제안된 다음과 같은 간단한 경험식을 이용하여 예측할 수 있다.

$$C = C_0 \left( \frac{1}{1 + e^{k(t-\theta)}} \right) \quad (6)$$

여기서,  $k$ 는 반응속도 상수(1/min)이고,  $t^*$ 는  $C_0/2$ 가 될 때의 시간(min)이다.

### 4. 결과 및 고찰

톨루엔 모사가스의 유입농도 변화에 따른 흡착특성을 살펴보기 위하여 활성탄을 2 g 정량하여 column내에 충전하고 톨루엔 가스의 유속은 0.42 m/s으로 고정한 후 유입 농도를 30, 60, 90 및 120 ppmv으로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 실험결과로부터 얻어진 파과곡선은 Fig. 2와 같으며, 이 파과곡선에서 유입 톨루엔 가스농도의 90%가 제거되는 시간 즉, 유입되는 톨루엔 가스 농도의 10%가 유출되기 시작하는 시간을 파과시간으로 하여 구한 파과시간  $t_b$  및 흡착용량  $q$ 의 결과를 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 보듯이 유입농도가 30, 60, 90 및 120 ppmv로 증가함에 따라 파과시간은 500, 330, 250 및 170 min으로 감소하였으며, 반면에 흡착제의 흡착용량은 260, 294, 339 및 349 mg/g으로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 흡착질의 농도가 높을수록 흡착 가능한 분자들이 증가할 뿐만 아니라 활성탄 세공으로의 확산속도와 흡착속도가 증가

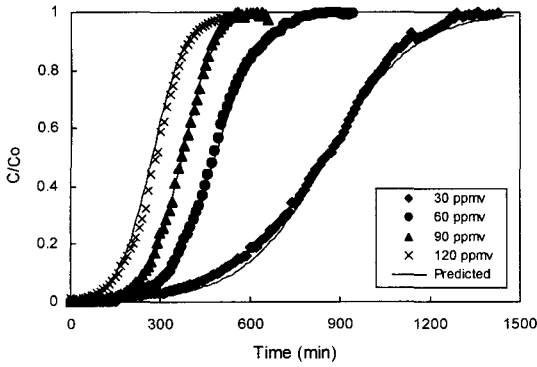


Fig. 2. Effect of inlet toluene concentration on breakthrough curves (linear velocity : 0.42 m/s, activated carbon : 2 g).

Table 3. Effect of initial toluene gas concentration on adsorption capacity  $q$  and breakthrough time  $t_B$  (10%  $C_0$ ) (linear velocity : 0.42 m/s, activated carbon : 2 g)

$C_0$ (ppmv)	$t_B$ (min)	$t^*$ (min)	$k'$ (1/min)	$q_t$ (mg/g)
30	500	860	0.0069	260
60	330	480	0.0138	294
90	250	370	0.0187	339
120	170	270	0.0185	349

하게 되므로 흡착이 그만큼 빠르게 진행되어 평형에 도달하는 시간이 단축되기 때문에 사료된다.<sup>25,26)</sup> 또한, 흡착질의 농도가 증가함에 따라 흡착제의 흡착용량이 증가하는 것은 물질전달의 driving force인 농도차가 증가하기 때문으로 생각된다.

실험에서 얻어진 파과곡선을 Yoon과 Nelson<sup>22)</sup>의 경험식으로 모사하기 위하여 실험결과를 식 (6)에 대입하여 비선형회귀로부터 구한  $k'$ 값을 Table 3에 나타내었으며, 이를 이용하여 구한 파과곡선과 실험에서 얻은 파과곡선을 Fig. 2에 비교하여 나타내었다. 그림에서 보여 지는 바와 같이 실험치와 계산값은 잘 일치함으로써 Yoon과 Nelson에 의해 제안된 식 (6)의 경험식은 본 연구에서의 파과곡선을 잘 묘사해주었다.

Fig. 3은 톨루엔 가스의 유입농도 변화에 따른 평형 흡착량의 변화를 나타낸 것이며, 가스의 농도가 증가할수록 평형 흡착량이 증가하였다. 실험 결과를 식 (1)과 (2)에 대입하여 비선형회귀법으로 각 파라미터값들을 구한 결과 Langmuir 식에서  $q_{max} = 363$ ,  $b = 0.1011$  ( $r^2 = 0.98$ ), Freundlich 식에서  $K = 114.3$ ,  $n = 4.254$  ( $r^2 = 0.998$ )로 얻어졌다. 결과에서 보면 본 연구에서 사용된 활성탄에 의한 톨루엔가스의 흡착은

Langmuir 식보다는 Freundlich 식에 더 잘 부합하는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 톨루엔 가스의 유입농도에 따른 MTZ와 LUB의 변화를 식 (3)과 (4)를 이용하여 구하여 나타낸 것이다. 가스의 농도가 60 ppmv 일때 MTZ와 LUB는 2.18 및 0.83 cm이나, 톨루엔 가스의 농도를 120 ppmv로 2배 증가시켰을 경우 MTZ와 LUB는 각각 2.8 및 1.2 cm로 나타났으며 유입농도가 2배 증가함에 따라 MTZ와 LUB는 1.3배 정도 증가하였다. 여기서 미사용 길이가 증가할수록 고정 흡착층의 이용효과는 저하됨을 나타낸다.

Fig. 5는 톨루엔 가스의 농도를 90 ppmv로 고정하고서 가스의 유속을 0.33, 0.42 및 0.49 m/s로 변화시킨 경우에 얻어진 파과곡선을 나타낸 것으로, 이로부터 구한 실험자료들을 Table 4에 요약하였다. 톨루엔 가스의 유속이 0.33, 0.42 및 0.49 m/s로 증가함에 따라 파과시간은 340, 260 및 180 min으로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 유속이 증가할수록 단위시간에 더 많은 양의 가스가 흡착층내로 유입되기 때문이며, 유속이 빨라질수록 활성탄 입자의

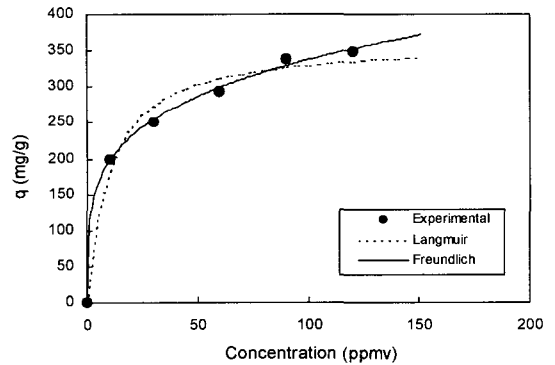


Fig. 3. Comparison of adsorption isotherms of toluene on activated carbon.

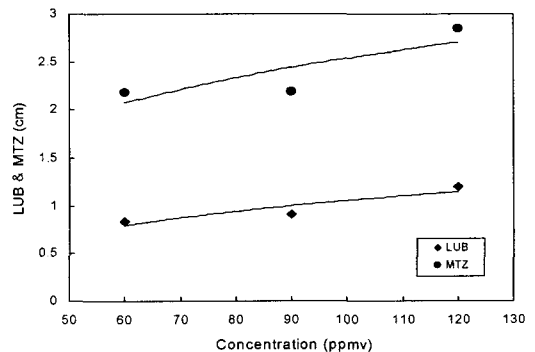


Fig. 4. Effect of concentration on MTZ and LUB.

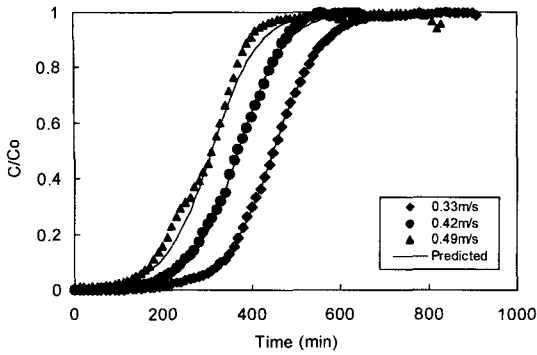


Fig. 5. Effect of flow rate on breakthrough curve (Inlet toluene concentration : 90 ppmv, activated carbon : 2 g).

Table 4. Effect of toluene flow rate on adsorption capacity  $q$  and breakthrough time  $t_B$  (10%  $C_o$ ) ( $C_o$  : 60 ppmv, activated carbon : 2 g)

Linear velocity (m/s)	$t_B$ (min)	$t^*$ (min)	$k'$ (1/min)	$q_t$ (mg/g)
0.33	340	450	0.0181	334
0.42	250	370	0.0187	339
0.49	180	310	0.0187	331

표면에서의 농도 구배인 기체막이 얇아지고 기체막에서의 물질전달계수가 증가됨으로써 흡착속도가 빨라지기 때문으로 생각된다.<sup>2,27,28)</sup> 또한, 그림에서 보듯이 식 (6)으로 구한 파곡선은 실험결과를 잘 묘사해 주었다.

Fig. 6은 톨루엔 가스의 유속의 변화에 따른  $MTZ$ 와  $LUB$ 의 변화를 나타낸 것이다. 가스의 유속이 0.33 m/s일 때  $MTZ$ 는 1.86 cm로 전체 충전층의 약 66%에 해당하지만 유속이 0.49 m/s일 경우에는 2.69 cm로 약 30% 증가하며,  $LUB$ 도 톨루엔 모사가스의 유속이 증가할수록 0.68에서 1.17cm로 약 72%정도 증가하였다. Fig. 7은 평형 흡착량의 변화를 나타낸 것으로 톨루엔 가스의 유입유속이 증가하더라도 평형 흡착량은 거의 변화가 없으며 약 330 mg/g의 평형 흡착량을 나타내었다.

Fig. 8은 활성탄의 입자크기를 변화시킨 경우에 얻어진 파곡선을 나타낸 것이며, 이로부터 구한 실험 자료들을 Table 5에 나타내었다. Fig. 8에서 보여 지듯이 활성탄의 입자크기가 감소할수록 톨루엔 가스의 흡착량과 파곡시간이 증가하는데, 이는 입자크기가 작을수록 단위 g당의 표면적, 즉 비표면적이 증가하기 때문에 톨루엔 가스를 흡착할 수 있는 면적이 증가하기 때문으로 생각된다. 이러한 결

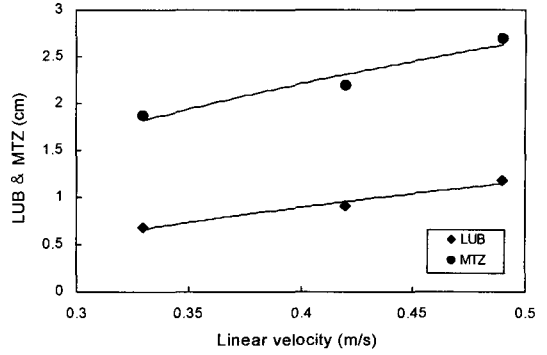


Fig. 6. Effect of linear gas velocity on  $MTZ$  and  $LUB$ .

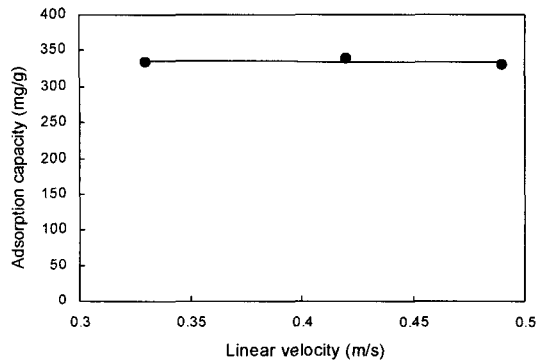


Fig. 7. Effect of linear gas velocity on adsorption capacity.

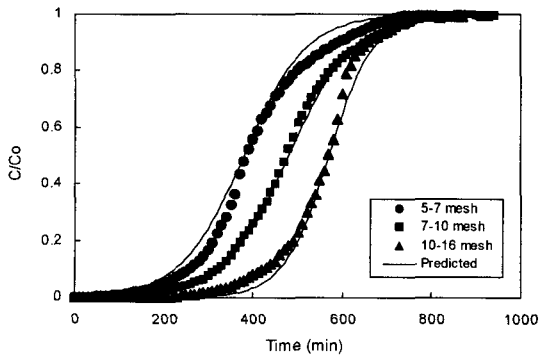


Fig. 8. Effect of particle size on breakthrough curve (Inlet toluene concentration : 60 ppmv, activated carbon : 2 g).

과는 Jeon 등<sup>(28)</sup> 및 Oh 등<sup>(29)</sup>의 연구결과와 동일한 결과를 나타내었다. 또한, 식 (6)에 의해 구한 파곡선은 실험결과를 잘 묘사해 주었다.

Fig. 9는 활성탄의 입자크기 변화에 따른  $MTZ$ 와  $LUB$ 의 변화를 나타낸 것이다. 입자크기가 10~16 mesh (1.9~1.1 mm)일 경우에는  $MTZ$ 와  $LUB$ 가

Table 5. Comparison of breakthrough time  $t_B$  (10%  $C_0$ ) for the different particle size

Particle size		$t_B$ (min)	$t^*$ (min)	$k'$ (1/min)	$q_t$ (mg/g)
Mesh	(mm)				
5~7	4.0~2.8	260	380	0.0143	250
7~10	2.8~1.9	330	470	0.0138	294
10~16	1.9~1.1	430	570	0.02	335

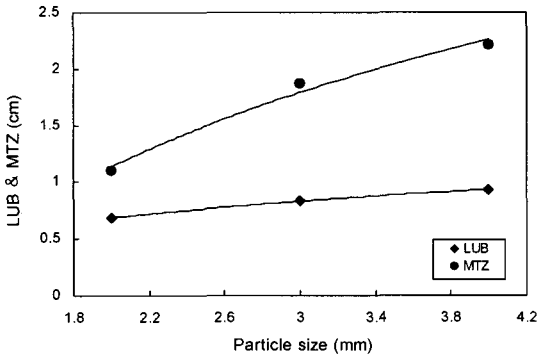


Fig. 9. Effect of particle size on *LUB* and *MTZ*.

1.09 및 0.69 cm이나, 활성탄의 입자크기가 5~7 mesh (4.0~2.8 mm)일 때는 *MTZ*와 *LUB*는 2.21 및 0.93 cm이었다. 이러한 결과는 활성탄의 입자크기가 증가할수록 비표면적이 감소하기 때문에 *MTZ*는 활성탄의 입자크기가 증가할수록 증가하며, 또한 *LUB*도 활성탄의 입자크기가 증가할수록 증가하는 것으로 생각된다.

Fig. 10은 활성탄 입자크기의 변화에 따른 톨루엔 가스의 최대 흡착량을 나타낸 것으로 그림에서 보면 활성탄 입자크기가 감소함에 따라 흡착능이 조금씩 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 입자크기가 작을수록 단위 g당 표면적이 증가하여 톨루엔 가스를 흡착할 수 있는 면적이 증가하기 때문으로 생각된다.<sup>27)</sup> 활성탄의 입자크기에 따른 파과시간 및 최대 흡착량 등의 결과를 Table 5에 요약하여 나타내었다.

Fig. 11은 VOCs의 물리적 특성이 활성탄의 흡착에 미치는 영향에 대해 알아보기 위하여 방향족 물질인 톨루엔과 자일렌, 에스테르 계열의 부틸 아세테이트, 케톤 계열인 아세톤, 알콜 계열인 부탄올 가스에 대한 각각의 파과특성을 살펴본 결과이다. 각 물질들의 유입농도는 60 ppmv, 유입유속은 0.42 m/s로 일정하게 유지하여 운전하였다. 각 물질들의 물성치와 실험에서 구한 파과시간 및 흡착량을 Table 6에 나타내었다. 표에서 보여 지듯이 흡착량은 자일렌이 735 mg/g으로 가장 높았고, 다음으로

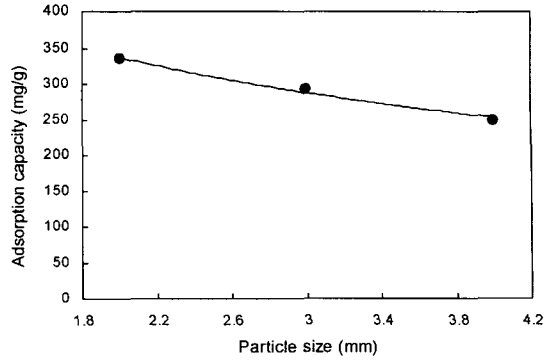


Fig. 10. Effect of particle size on adsorption capacity.

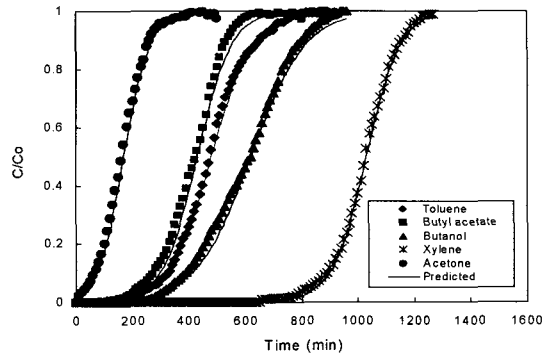


Fig. 11. Comparison of breakthrough curves for various VOCs. (Inlet concentration : 60 ppmv, activated carbon : 2 g).

부틸 아세테이트, 부탄올, 톨루엔 및 아세톤 순으로 나타났다. 또한, 파과시간도 흡착량의 크기 순으로 길게 나타났다.

이들 VOCs 성분들의 비점이나 증기압 등과 같은 물리적 특성이 흡착에 미치는 영향을 살펴보았다. 각 물질의 비점과 흡착량과의 관계를 나타낸 Fig. 12에서 보면 각 물질의 비점이 높아질수록 흡착량이 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 물질의 비점이 높아질수록 휘발성이 약하여 흡착제에 잔류하려는 성질이 강하고 활성탄과 결합력이 강하여 흡착능이 증가하는 것으로 사료된다. 이러한 결과는 활성탄을 이용하여 여러 가지 종류의 VOCs의 흡착실험을 수행하여 분자량과 비점이 높은 것이 낮은 물질에 비해 높은 흡착능성이 있음을 보여준 Chiang 등<sup>30)</sup>의 결과에서도 뒷받침해 주고 있다.

Fig. 13은 증기압과 흡착능의 관계를 나타낸 그림으로 증기압과 흡착능과는 반비례하는 관계를 보였다. 증기압은 물질이 공기중으로 휘발하려는 정도를 나타내는 것으로 휘발성이 강할수록 흡착능이 현저하게 떨어지는 것을 의미한다. 이러한 성질 때문에

## 고정층 활성탄 흡착반응기에서 기상 톨루엔의 흡착특성

Table 6. Effect of boiling point and vapor pressure on adsorption capacity  $q$  and breakthrough time  $t_B$  (10%  $C_0$ ) ( $C_0$ : 60 ppmv, linear velocity : 0.42 m/s)

Material	Formula	M.W	density (g/cm <sup>3</sup> )	boiling point(°C)	Vapor pressure (mmHg)	$t_B$ (min)	$t^*$ (min)	$k'$ (1/min)	$q_t$ (mg/g)
Acetone	CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>	57.07	0.79	56.3	227.4	50	170	0.0217	64
Toluene	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	92.14	0.866	110.8	19.6	330	480	0.0069	294
Butyl acetate	C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	116.16	0.882	125	7.5	270	430	0.0166	310
Butanol	C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> OH	74.12	0.810	117	29.9	380	620	0.0104	294
Xylene	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	106.16	0.867	139.3	7.1	850	1030	0.0167	735

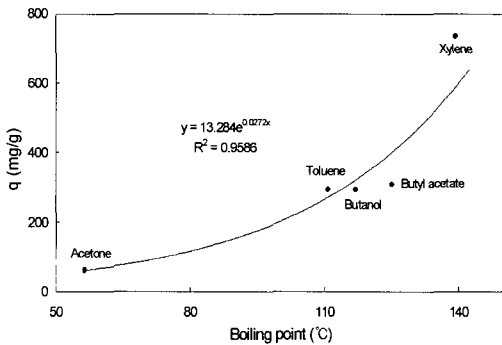


Fig. 12. Relationship between boiling point and adsorption capacity.

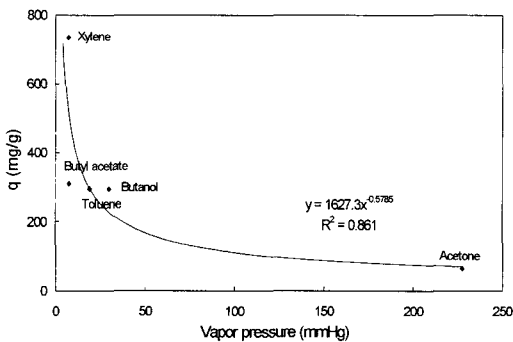


Fig. 13. Relationship between vapor pressure and adsorption capacity.

증기압이 큰 물질은 활성탄과의 흡착이 안정되지 못하여 흡착이 잘 이루어지지 않거나 흡착이 이루어진 후에도 쉽게 탈착이 일어나는 것으로 생각된다.

### 5. 결 론

대표적인 VOCs 중의 하나인 톨루엔의 활성탄 흡착실험을 통해 다음의 결과를 얻었다. 활성탄을 충전한 고정 흡착탑에서 얻어진 과과곡선의 과과점은 톨루엔 가스의 농도, 유속이 증가할수록 감소하였다. MTZ와 LUB는 톨루엔 가스의 농도, 유속 및

활성탄의 입자크기가 증가할수록 증가하였고, 흡착량은 유입되는 톨루엔 가스의 농도가 증가할수록 증가하였다. 그러나 유속의 변화에 대해서는 흡착량의 변화가 없이 거의 일정하였으며, 활성탄의 입자크기가 증가하는 경우에는 흡착량이 감소하였다.

활성탄에 의한 톨루엔 가스의 흡착은 Langmuir 식보다는 Freundlich 식에 더 잘 부합하는 것으로 나타났으며, Yoon과 Nelson에 의해 제안된 경험식은 본 연구에서의 과과곡선을 잘 묘사해주었다. 또한, VOCs 성분들의 물리적 특성이 활성탄의 흡착에 미치는 영향에 대해 알아보기 위하여 방향족 물질인 톨루엔과 자일렌, 에스테르 계열의 부틸 아세테이트, 케톤 계열인 아세톤, 알콜 계열인 부탄올 가스에 대한 각각의 과과특성을 살펴본 결과, 끓는점이 크거나 증기압이 작은 가스일수록 흡착능은 커지는 경향을 나타내었다.

### 참 고 문 헌

- 1) Park, J. T. and J. S. Kim, 1994, Adsorption breakthrough characteristics of organic solvent vapors in an activated carbon fixed bed, J. of KSWES, 11(4), 569-577.
- 2) Kim, H. S. and Y. S. Park, 2003, Binary component adsorption characteristics of benzene and toluene at the fixed-bed adsorption column with activated carbon, J. of KSEE 25, 977-983.
- 3) Ruhl, M. J., 1993, Recover VOCs via adsorption on activated carbon, Chem. Eng. Prog., 37, 1344-1350.
- 4) Noll, K. E., V. Gournaris and W. S. Hou, 1992, Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control, Lewis, Chelsea, MI, 1804-1810pp.
- 5) Ahmadpour, A. and D. D. Do, 1995, Characterization of modified activated carbons, equilibria and dynamics studies, Carbon, 33(10), 1393-1398.

- 6) Rodriguez-Reinoso, F., 1997, Introduction to Carbon Technologies, H. Marsh, E. A. Heintz, and F. Rodriguez-Reinoso, eds., Chap. 2, Univ. of Alicante, Alicante, Spain, 35pp.
- 7) Lee, H. U., J. S. Kim., H. K. Song and B. K. Na, 1999, Adsorption and desorption characteristics of MEK with activated carbon and polymer adsorbent, HWAHAK KONGHAK, 37(1), 120-125.
- 8) Yoo, K. S., J. W. Shin, S. W. Shin and J. H. Jeong, 2003, Characteristics of methanol adsorption over thermally treated activated carbon, HWAHAK KONGHAK, 41(4), 491-496.
- 9) Kim, H. S., Y. S. Park and B. M. Min, 2001, Adsorption characteristics of benzene at the fixed-bed adsorption column, J. of KSEE, 23, 1979-1988.
- 10) Seong, C. W., H. Y. Park, C. H. Lee and W. S. Kim, 1996, Adsorption of volatile organic compounds onto activated carbon fibers, Chem. Eng. Appl. and Theor., 4, 1653-1656.
- 11) Kim, B., J. H. Kim, H. Y. Park, C. H. Lee and W. S. Kim, 1998, Adsorption and desorption of volatile organic compounds onto activated carbon fibers, Chem. Eng. Appl. and Theor., 4, 2573-2576.
- 12) Nelson, G. O. and C. A. Harde, 1974, Respirator cartridge efficiency studies : V. Effect of solvent vapor, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 37, 391-410.
- 13) Nelson, G. O. and C. A. Harder, 1976, Respirator cartridge efficiency studies : VI. Effect of concentration, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 37, 205-216.
- 14) Wood, G. O., 1994, Estimating service lives of organic vapor cartridges, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 55, 11-15.
- 15) Cohen, H. J. and R. P. Garrison, 1989, Development of a field method for evaluating the service life of organic vapor cartridges : Results of laboratory testing using carbon tetrachloride, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 50, 486-496.
- 16) Wood, G. O. and E. S. Moyer, 1991, A review and comparison of adsorption isotherm equations used to correlate and predict organic vapor cartridge capacities, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 52, 235-242.
- 17) Vahdat, N., P. M. Swearingen, J. S. Johnson, S. Priante, K. Mathews and A. Neihart, 1995, Adsorption capacity and thermal desorption efficiency of selected adsorbents, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 56(1), 32-38.
- 18) Wood, G. O and E. S. Moyer, 1989, A review of the Wheeler equation and comparison of its applications to organic vapor respirator cartridge breakthrough data, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 50, 400-407.
- 19) Chuang, C. L., P. C. Chiang and E. E. Chang, 2003, Modeling VOCs adsorption onto activated carbon, Chemosphere, 53, 17-27.
- 20) Lucas, S., M. P. Calvo, C. Palencia and M. J. Cocero, 2004, Mathematical model of supercritical CO<sub>2</sub> adsorption on activated carbon effect of operating conditions and adsorption scale-up, J. of Supercritical Fluids, 32, 193-201.
- 21) Cui, X., R. Marc Bustin and D. Gregory, 2004, Selective transport of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> in coals : insight from modeling of experiment gas adsorption data, Fuel, 83, 293-303.
- 22) Yoon, J. H. and G. O. Nelson, 1984, Application of gas adsorption kinetics: I. A theoretical model for respirator cartridge service life, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 45 (8), 509-516.
- 23) McCabe, W. L., J. C. Smith and P. Harriot, 2001, Unit Operations of Chemical Engineering, 6th ed., McGraw Hill, 1114pp.
- 24) Reynolds, T. D. and P. A. Richards, 1998, Unit Operations and Process in Environmental Engineering, 2nd ed., PWD Publishing, 798pp.
- 25) Hwang, K. S., K. D. Choi and Y. S. Kong, 1998, The thermal regeneration characteristics of volatile organic compounds on an activated carbon bed ( I ) : Adsorption step, J. of KICChE, 36(2), 159-168.
- 26) Lee, J. J. and H. Y. Yu, 1998, Adsorption characteristics of BEAM by granular activated carbon(II), J. of KSSE, 20(4), 509-518.
- 27) Cho, K. C., B. H. Shon, Y. M. Jo and K. J. Oh, 1999, A study on the H<sub>2</sub>S removal using Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> impregnated activated carbon, J. of KSEE, 21(11), 2017-2025.
- 28) Jeon, Y. H., J. H. Young, B. H. Shon and S. W. Cho, 1996, A study on adsorption characteristics of SO<sub>2</sub> gas in a fixed-bed adsorber, J. of KSEE, 18, 961-969.



- 29) Oh, K. J., J. J. Kim, Y. H. Jeon and B. H. Son, 1996, Adsorption characteristics of SO<sub>2</sub> using soil bed, J. of KSEE, 18(2), 171-179.
- 30) Chiang, P. C., J. H. Yun, 1993, Evaluation of adsorbents for volatile organic chemicals, Stud. Surf. Sci. Cat., 80, 89-96.