

## 활성탄소섬유 흡착bed에서의 톨루엔 흡착특성

### Adsorption Characteristics of Toluene in the Adsorption Bed Packed with Activated Carbon Fiber

김 상 국\* · 장 예 림<sup>1)</sup>

한국에너지기술연구원 화석에너지환경연구본부, <sup>1)</sup>한양대학교 화학공학과  
(2007년 10월 2일 접수, 2008년 1월 24일 채택)

Sang Guk Kim\* and Ye Rim Chang<sup>1)</sup>

*Fossil Energy & Environment Research Department, Korea Institute of Energy Research,*  
<sup>1)</sup>*Department of Chemical Engineering, Han Yang University*

(Received 2 October 2007, accepted 24 January 2008)

#### Abstract

Toluene adsorption characteristics in the adsorption bed packed with activated carbon fiber (ACF) were studied. Experimental apparatus is composed of VOC generation equipment, adsorption bed, and analytical instrument. Breakthrough characteristics were investigated with length of the adsorption bed which consisted of 3 or 5 sheets of the ACF and flow rate when toluene concentration are 400 ppm and 800 ppm respectively. When mass transfer zone (MTZ) comes out of the adsorption bed, toluene concentration is increased sharply and reached plateau region by saturation. Experimental results are compared with semi-empirical gas adsorption model proposed by Yoon and Nelson. In order to investigate the movement of the MTZ with adsorption time in the adsorption bed packed with ACFs, weight increment of each ACF was measured with the location of ACF at each run. When the weight increment of ACF by toluene adsorption which located at the exit of the bed reaches about 20%, toluene started to be detected.

**Key words :** Activated carbon fiber, Adsorption bed, Toluene, Breakthrough point, Mass transfer zone

#### 1. 서 론

휘발성유기화합물 (VOC)은 알려진 바와 같이 질소산화물과 공존시 태양광의 영향으로 광화학스모그를 유발하는 물질의 총칭이다. 국내에는 환경부고시

에 따라 벤젠, 부타디엔 등 37개 물질을 규제대상으로 하고 있다. 인위적인 VOC (Anthropogenic VOC: AVOC)의 국내 배출량은 2001년 기준으로 약 966천 톤이며 발생원으로는 용제 특히 도장부분에서의 배출량이 제일 많다 (김조천, 2006). 휘발성유기화합물을 처리하는 공정으로 열에 의한 산화 (축열연소, 촉매연소 등), 생물학적 제어, 흡수, 흡착, 응축 (고농도 VOC), 막분리방법 등이 있다 (임 평, 2003). 흡착

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)42-860-3632, E-mail : sgkim@kier.re.kr

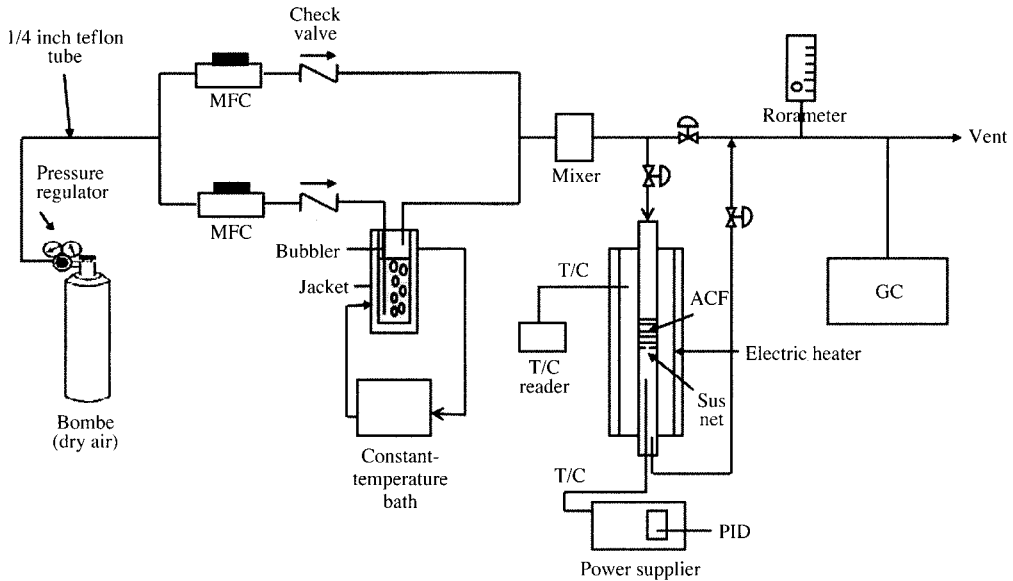


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

방법으로 활성탄 또는 활성탄소섬유가 사용된다. 활성탄(Activated Carbon: AC)은 흡착속도가 느린 반면에 활성탄소섬유(Activated Carbon Fiber: ACF)는 표면에 미세공이 발달하여 기상흡착시 내부에서의 확산저항이 매우 작기 때문에 흡착속도가 매우 빠르다(조순행, 2006). VOC 제거공정에서 흡착 및 탈착공정이 연속적으로 교대로 행하여지며 ACF는 일반적으로 스팀으로 가열하기 쉬운 온도인 150°C에서 신속하면서 완전하게 탈착이 가능하지만 AC는 이 온도에서 탈착율이 상대적으로 낮다.

ACF를 이용한 흡착특성 연구는 선행 연구자들에 의하여 연구된 바 있다(Cheng *et al.*, 2004; Das *et al.*, 2004; Dwivedi *et al.*, 2004; Navarri *et al.*, 2001). 이들은 ACF에 의한 VOC의 흡착/탈착 특성을 연구하였으며 주목적은 각종 운전조건에서 ACF가 VOC를 흡착하는 데 적합하다는 것을 실험적으로 입증하는데 있으며 아울러 VOC과 특성을 예측할 목적으로 수확모델식을 개발하였다. Yoon and Nelson (1984)은 가스흡착속도식을 사용하여 간단하면서도 dynamic 흡착실험에 적용가능한 반경험적 가스흡착모델을 제시하였다. 또한 Huang *et al.* (2003)은 상이한 비표면적을 가진 레이온제 ACF를 사용하여 흡착 bed에서 저농도의 methylethylketone (MEK)과 benzene기체의

과과특성을 조사하였으며 Yoon and Nelson의 가스흡착모델을 실험적으로 구한 과과곡선과 비교한 결과 모델이 실험값을 잘 묘사하였음을 보여주었다. 또한 김연수 (2004)는 ACF를 이용한 휘발성유기화합물의 흡·탈착특성 및 기능성 침착 ACF제조에 관한 연구를 수행한 바 있다. 본 연구에서는 VOC제거 공정개발을 위하여 ACF를 이용한 톨루엔의 흡착특성을 조사하였다. 흡착bed에 ACF를 다수 장입하되 갯수를 변화하는 방법으로 흡착bed 길이를 조절하였고 흡착 시간, 농도, 유량, bed 길이에 따른 과과특성과 아울러 흡착시간에 따라 각 위치에 따른 각각의 ACF 무게변화를 측정하여 물질전달영역 (Mass Transfer Zone: MTZ)의 이동특성을 조사하였으며 MTZ가 흡착층 외부로 배출되면서 VOC가 검출되는 시간을 과과곡선과 비교검토했다.

## 2. 실험장치 및 방법

활성탄소섬유 흡착bed층에서의 톨루엔 흡착특성을 조사하기 위하여 그림 1과 같은 실험장치를 사용하였다. 실험장치는 크게 VOC발생장치, 흡착장치인 흡착bed, 분석장치로 구성된다.

**Table 1. Toluene vapor pressure with temperature.**

Temp. (°C)	Vapor pressure (mmHg)	Temp. (°C)	Vapor pressure (mmHg)
-26.7	1	40.3	60
-4.4	5	51.9	100
6.4	10	69.5	200
18.4	20	89.5	400
31.8	40	110.6	760

Air cylinder에서 산소와 질소의 혼합물인 전공기가 압력조절기를 통하여 2.5 [kgf/cm<sup>2</sup>] 압력으로 공급된다. 분기점에서 bubbler를 통과하는 공기와 by-pass 공기가 나누어지며 각각의 비율에 따라 공기중 톨루엔 농도가 조절되며 혼합기에서 혼합된다. 정밀한 공기 유량제어를 위하여 MFC (Mass Flow Controller)를 설치하였으며 MFC 바로 뒤에 역류흐름을 방지하는 check valve를 설치하였다. MFC용량은 by-pass라인이 1000 [cc/분], bubbler를 통과하는 라인이 100 [cc/분]이었다. Bubbler가 포함된 원통형 용기는 재질이 스테인리스스틸이며 길이가 25 cm, 내부직경 2.5 cm, 외부직경 5.5 cm인 2중관으로 제작되었으며 외부는 자켓으로 항온조에서 일정한 온도로 조절된 순환수가 자켓을 순환하게 하여 용기내 톨루엔용액 온도를 일정하게 유지하였다. 원통용기내 bubbler는 1/4인치 스테인리스스틸로 제작하였으며 밑에서 5 cm까지 직경이 0.4 mm인 구멍을 2 mm 간격으로 20 줄 천공하였고 한줄에서 4개의 구멍을 천공하였다. 물론 구멍이 천공된 부분은 톨루엔 용액에 잠기게 된다. 톨루엔 증기압은 온도에 따라 변화하며 표 1에서 보는 바와 같다.

흡착bed인 반응기에 유입되는 공기중 톨루엔 농도는 순환수온도와 bubbler 통과공기/by-pass 공기비에 의하여 결정된다. 장치와 장치사이를 연결하는 관은 테프론 재질의 1/4인치 관을 사용하였다. 반응기는 길이가 30 cm이며 내경이 5.1 cm인 원통형의 전기히터내에 위치하며 내경이 2.3 cm인 스테인리스스틸로 제작된 원통형튜브이다. 반응기 상부는 개폐할 수 있도록 하여 활성탄소섬유(ACF)를 장입 또는 제거할 수 있으며 공기가 새지 않은 구조로 제작하였다. 반응기 하부에서 10 cm되는 지점에 ACF를 지지할 수 있는 그물망을 설치하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 공기는 반응기 상부에서 들어와서 하부로 배출된다. ACF를 직경이 2.3 cm가 되도록 원형으로 오려서

3장 내지 5장을 그물망 위에 장입하였다. 이때 다수의 ACF를 반응기에 장입시 ACF와 반응기벽 사이에서 틈이 생기는 경우 bed층을 통과시 압력손실이 발생하는 것에 비하여 틈새로 공기가 흐르는 것이 쉽기 때문에 발생하는 channeling현상을 방지하기 위하여 ACF와 벽사이에 공간이 형성되지 않도록 특별히 유의하였다. 직경이 2.3 cm인 ACF 1장의 무게는 약 0.09 g이었으며 각각의 무게에 다소의 편차가 존재하였다. 전처리과정으로 ACF를 130°C로 유지되는 건조기에서 1시간 동안 건조시켜 수분을 사전에 제거하였다. 운전인자는 톨루엔 농도, 공기유량, 활성탄소 섬유 개수, 반응기온도, 흡착시간이다. ACF는 일본 T사 제품으로 BET면적이 1,525 [m<sup>2</sup>/g], pore volume 0.62 [cc/g], pore 평균직경 16.2 [Å]이다. 반응기 하부는 구경이 3/8인치인 2개의 관으로 분기되며 하나는 공기가 흘러가는 관이며 다른 하나는 열전대를 설치하는 관이다. 반응기 온도를 제어하기 위하여 전기히터 내부 공간부와 반응기 내부에 열전대를 설치하였고 히터에 전기를 공급하는 power supply의 제어기와 연계되어 반응기내 온도를 제어하였다. 반응기를 나온 공기는 로타미터를 통과하며 로타미터와 MFC 유량을 비교하여 라인에서 공기가 새는 여부를 쉽게 알 수 있도록 하였다. 공기내 톨루엔 농도는 HP 6890 가스크로마토그래프(GC)와 설치된 FID검출기를 이용하여 분석하였다. 칼럼은 capillary column으로 Agilent DB-WAX 30 m, 0.53 mm, 1.0 µm을 사용하였다. 검량선 작성을 위하여 농도가 각각 50 ppm, 300 ppm, 1,000 ppm인 표준가스를 사용하였다. 반응기에서 외부로 배출되는 vent line에 가스분석을 위하여 1/8인치 관을 분기하여 GC로 연결하였으며 GC에 설치된 6 port valve를 이용하여 배출되는 톨루엔 농도를 일정한 시간 간격으로 자동으로 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

톨루엔이 포함된 공기를 흡착bed층을 통과시키면서 농도, 유량, 흡착bed 길이에 따라 반응기 출구에서 톨루엔농도를 측정하여 파과특성을 조사하였다. 특히 고정상 흡착제(ACF)가 흡착질에 의해 포화되는 과정에서 흡착bed 내에서의 물질전달영역(MTZ: Mass Transfer Zone) 이동특성을 조사하기 위하여 흡착실

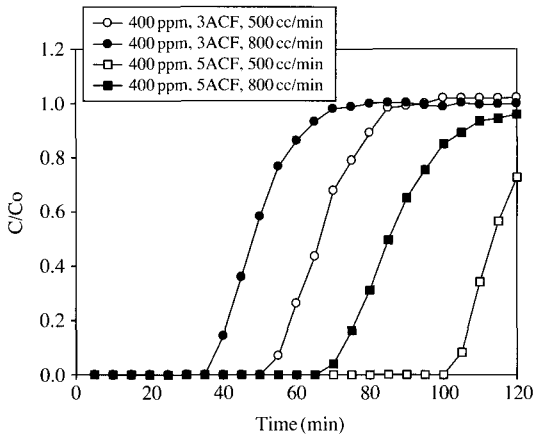


Fig. 2. Breakthrough curve with number of ACF and flow rate at 400 ppm.

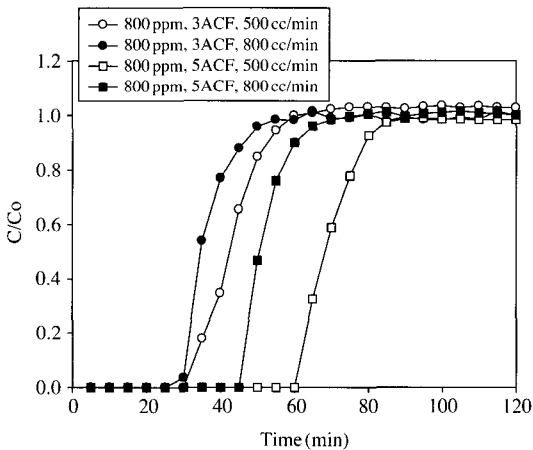


Fig. 3. Breakthrough curve with number of ACF and flow rate at 800 ppm.

험에서 흡착시간과 bed 길이를 조절하여 흡착 전후 각각의 ACF무게를 측정하였다. 각각의 ACF무게 증가분을 원래의 ACF무게로 나눈값은 톨루엔 흡착량을 나타내며 흡착조건에 따라 위치에 따른 활성적영역의 변화를 나타낸다.

항온조 온도와 공기유량비를 조절하여 농도 400 ppm의 톨루엔이 포함된 공기를 반응기로 흘려보내면서 ACF가 3장 또는 5장 반응기에 장입된 상태에서 흡착실험을 하였다. 이때 유량은 500 [cc/min]와 800 [cc/min]이었으며 반응기내 온도는 29°C를 유지

하였다. 5분 간격으로 톨루엔 농도를 측정하였으며 결과적으로 측정된 파과곡선은 그림 2와 같다.

파과점을 C/Co=0.1로 하였을 때 흡착bed 길이가 짧고 (ACF=3장) 유량이 많은 (800 cc/min) 조건에서 파과점이 38.5분으로 가장 빨랐으며 흡착bed 길이가 길고 (ACF=5장) 유량이 적은 (500 cc/min) 조건에서 파과점이 105.3분으로 제일 느렸다. 그림에서 보는 바와 같이 MTZ가 흡착bed 하부를 통과하여 검출기에서 검출되면서 톨루엔 농도는 급격히 증가하다가 반응기 입구 농도인 400 ppm에 가까워지면서 증가속도가 급격히 감소하는 S자형 형태의 흡착특성을 나타내었다. 상기 실험조건에서 파과점이 상대적으로 긴 2개 곡선 (ACF5장 800 cc/min, ACF5장 500 cc/min)은 아직 흡착질에 의하여 흡착제가 완전히 포화상태에 도달하지 않았음을 보여주었다.

그림 3은 그림 2와 동일한 조건이지만 주입되는 톨루엔 농도가 800 ppm일 때 측정된 파과곡선이다. 흡착질인 톨루엔 농도가 증가함에 따라 파과시간이 빨라지는 것을 볼수있으나 톨루엔이 검출되는 순서는 그림 2와 동일하였다.

흡착조건이 ACF3장 800 cc/min일 때 파과점은 30.6분, ACF3장 500 cc/min은 32.9분, ACF5장 800 cc/min은 46.1분, ACF5장 500 cc/min은 66.5분이었다. 파과곡선 형태는 고정층인 흡착bed 길이에 무관하게 S자형 형태를 나타내었다.

등온조건하에서 고정상흡착제 (ACF)에 대하여 흡착질 (VOC)의 시간에 따른 농도변화를 예측하는 수학적모델이 다수 소개된 바 있으며 Yoon과 Nelson는 간단한 반경험식 가스흡착모델을 아래와 같이 제시하였다.

$$C = C_0 \frac{1}{1 + \exp[k'(\tau - t)]} \quad (1)$$

여기에서 C는 출구농도, Co는 입구농도, k'는 반응상수, t는 시간, τ는 50% 파과시간이다. 상기식에서 반응상수를 제외한 값은 파과곡선으로부터 알 수 있으나 반응상수가 온도, 수분, 흡착물의 화학적 특성을 포함하고 있기 때문에 이론적으로 구하는 계산과정이 복잡하다. 따라서 반응상수 k'를 파과곡선을 가장 잘 모사하는 곡선으로부터 구하면 편리하다. Yoon and Nelson식은 비교적 간단하고 dynamic 흡착결과를 잘 모사할 수 있어 사용하였다. 그림 4는 k'값이

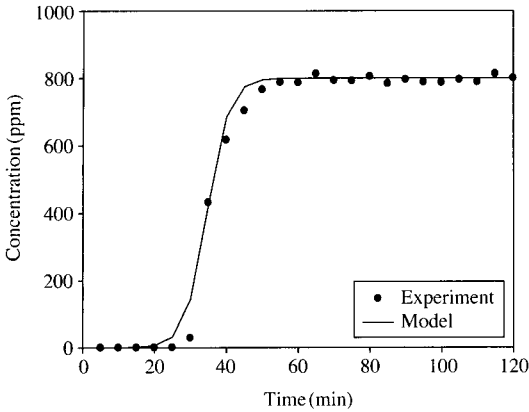


Fig. 4. Breakthrough curve calculated from eq. (1) and experimental data (3ACF, 800 cc/min).

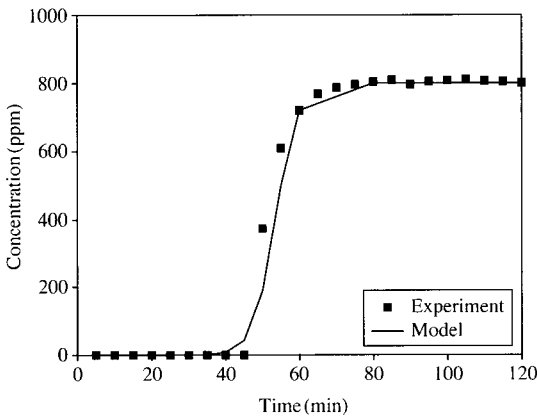


Fig. 5. Breakthrough curve calculated from eq. (1) and experimental data (5ACF, 800 cc/min).

0.3299일 때 식(1)로부터 계산한 출구농도와 그림 3의 실험결과(800 ppm, 3ACF, 800 cc/min)를 비교한 그래프이다.

적절한 반응상수  $k'$ 을 반경험식 가스흡착모델에 대입시 실제 파과곡선에 근접한 파과곡선을 얻을 수 있었다. 그림 5는  $k'$ 값이 0.337일 때 식(1)로부터 계산한 출구농도와 그림 3의 실험결과(800 ppm, 5ACF, 800 cc/min)를 비교한 그래프이다. 동일한 조건에서 흡착bed 길이가 증가하였으므로 파과곡선이 파과시간이 증가하는 오른쪽으로 이동하였으며 반응상수  $k'$ 값을 그림 4와 동일한 방법으로 구하였으며 실제

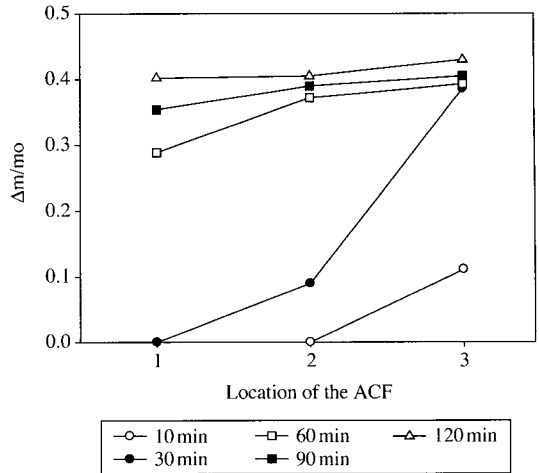


Fig. 6. Weight increment of each ACF according to location and adsorption time (400 ppm, 3ACF, 500 cc/min).

파과곡선에 근접한 파과곡선을 얻을 수 있었다.

흡착bed에서 흡착시간에 따라 물질전달영역 이동에 의하여 활성적영역이 변화하며 이를 계량적으로 나타내는 방법중 하나는 흡착위치에 따른 흡착제의 무게변화를 측정하는 방법이다. 그림 6은 흡착에 의하여 각각의 ACF 무게변화 즉 무게증가( $\Delta m$ )를 원래의 ACF무게( $m$ )로 나눈값을 각각의 흡착제 위치에 따라 나타내었으며 흡착시간을 10분에서 120분으로 증가시키면서 활성적영역의 변화를 조사하였다. 흡착조건은 톨루엔농도 400 ppm, ACF 3장, 500 cc/min이다. ACF 위치는 3이 흡착bed 최상단 지점을 나타내며 톨루엔가스가 상부로부터 들어오는 입구에 위치하고 1은 흡착bed 하단으로 톨루엔가스가 하부로 배출되는 지점에 위치한다. 흡착시간이 10분일 때 상부(3)에 위치하는 ACF는 약 11% 무게가 증가하였으나 중부(2) 및 하부(1)에 위치한 ACF의 무게증가는 관찰되지 않았다. 흡착시간이 30분일 때에는 상부 ACF는 포화상태에 근접하여 무게증가비가 약 39% 이었고 중부 ACF는 9%이었지만 하부 ACF는 무게증가가 없었다.

따라서 MTZ가 흡착층 외부로 배출되지 않아 흡착bed를 나가는 가스중 톨루엔은 그림 2에서 보는 바와 같이 검출되지 않았다. 흡착시간이 60분일 때 상부와 중부에 위치한 ACF의 무게증가비는 각각

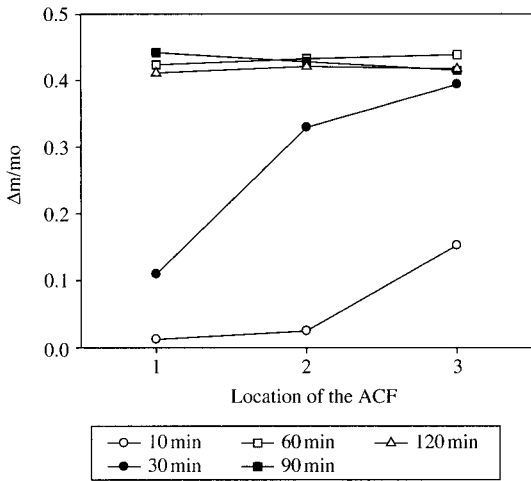


Fig. 7. Weight increment of each ACF according to location and adsorption time (800 ppm, 3ACF, 500 cc/min).

39%, 37%이었으며 하부 ACF는 29%이었다. 이때 MTZ가 흡착층 외부로 배출되면서 톨루엔이 검출되기 시작하였으며 이는 그림 2에서 55분 위치에서 톨루엔이 검출되기 시작한 것으로부터 확인할 수 있다. 흡착시간이 90분일 때 지점 3, 2, 1에서 무게증가비는 각각 41%, 39%, 35%로 흡착bed 내 모든 지점에서 포화상태에 근접하는 것을 알 수 있으며 흡착시간이 120분인 경우 지점 3, 2, 1에서 무게증가비는 43%, 41%, 40%로 포화상태에 도달하였으며 이는 그림 2의 파과곡선에서 C/Co가 1에 도달하여 톨루엔은 더 이상 흡착되지 않고 배출되는 것을 알 수 있다. 흡착조건이 톨루엔농도 800 ppm, ACF 3장, 유량이 500 cc/min일 때 흡착위치 및 흡착시간에 따른 각각의 ACF 무게증가비는 그림 7과 같다.

흡착시간이 10분일 때 지점 3, 2, 1에서의 ACF 무게증가비는 15%, 2.5%, 1%이었으며 톨루엔농도가 400 ppm이었을 때 지점 2, 1에서의 무게증가가 각각 0%이었음과 비교하면 MTZ 이동속도가 증가하였음을 알 수 있다. 흡착시간이 30분일 때 출구측에 위치한 지점 1에서의 ACF 무게증가비는 11%이었으며 그림 3에서 보는 바와 같이 이때에는 톨루엔이 검출되지 않았지만 35분에서 톨루엔이 검출되기 시작하였으며 그림 7에서 보는 바와 같이 흡착시간이 30~60분 사이에 지점 1에서의 ACF 무게증가비가 급증하였

Table 2. Toluene concentration with ACF weight increase ratio at 800 ppm, 3ACF, 500 cc/min.

Time (min)	Weight increase ratio (Δm/mo)			Toluene conc. (ppm)	
	1	2	3	Inlet	Outlet
10	0.013	0.025	0.153	812	0
30	0.110	0.329	0.394	799	0
60	0.424	0.433	0.439	793	799
90	0.442	0.429	0.415	814	819
120	0.411	0.421	0.417	817	820

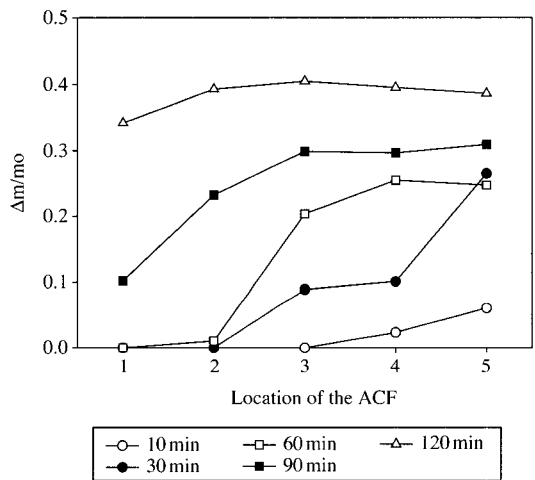


Fig. 8. Weight increment of each ACF according to location and adsorption time (400 ppm, 5ACF, 500 cc/min).

다. 흡착시간이 60분 이상에서는 ACF 무게증가가 더 이상 관찰되지 않으므로 모든 위치에서 ACF가 포화상태에 도달하였음을 알 수 있다. 그림 3에서의 파과곡선과 그림 7에서의 ACF 무게증가비를 비교하여 정리하면 표 2와 같다.

그림 8은 흡착조건으로 톨루엔농도 400 ppm, ACF 5장, 유량이 500 cc/min일 때 흡착위치 및 흡착시간에 따른 각각의 ACF 무게증가비를 나타낸다. ACF의 위치는 흡착bed에서 5가 톨루엔가스가 들어오는 입구측에 위치한 지점을 나타내며 1은 출구측에 위치한 지점을 나타낸다. 흡착시작 후 초기 60분 영역에서 ACF 무게증가비는 입구측에 가까운 순서대로 빠르게 증가하였다: 지점 5 > 지점 4 > 지점 3. 그림 6과 비교하면 동일한 흡착조건에서 흡착bed 길이가 증가

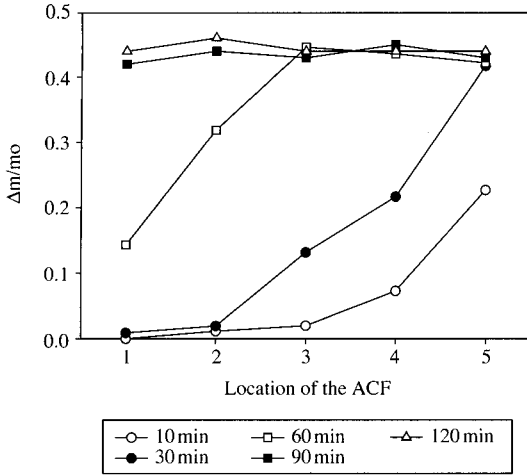


Fig. 9. Weight increment of each ACF according to location and adsorption time (800 ppm, 5ACF, 500 cc/min).

Table 3. Toluene concentration with ACF weight increase ratio at 800 ppm, 5ACF, 500 cc/min.

Time (min)	Weight increase ratio (Δm/mo)					Toluene conc. (ppm)	
	1	2	3	4	5	Inlet	Outlet
10	0	0.011	0.020	0.073	0.227	795	0
30	0.009	0.019	0.132	0.217	0.417	793	0
60	0.143	0.319	0.446	0.436	0.422	793	0
90	0.420	0.440	0.430	0.450	0.430	795	790
120	0.440	0.460	0.440	0.440	0.440	793	787

함에 따라 (ACF 개수 3장 → 5장) 흡착시간이 60분 일 때 MTZ이 지점 1에 도달하지 않아 ACF 무게증가가 관찰되지 않았다. 흡착시간이 90분일 때 지점 1에서의 무게증가비는 10%이었으며 당해지점에서 ACF가 포화상태에 도달하지 않아 그림 2에서 보는 바와 같이 톨루엔은 검출되지 않았다. 흡착시간이 120분일 때 지점 2에서 5 사이의 ACF가 포화상태에 도달하였으며 지점 1의 ACF도 무게증가비가 34%로 포화상태에 근접하였음을 알 수 있다. 그림 2에서 톨루엔이 검출되기 시작한 시간이 105분이었으며 이는 그림 8에서 흡착시간이 90~120분 사이에서 지점 1의 ACF 무게증가비가 급격히 증가하는 기간에 해당하는 것을 볼 수 있다.

그림 9는 흡착조건으로 톨루엔농도 800 ppm, ACF

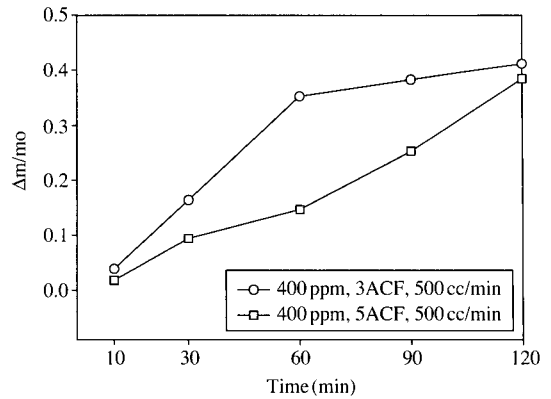


Fig. 10. Weight increment of ACF with adsorption time (400 ppm, 500 cc/min).

5장, 유량이 500 cc/min일 때 흡착위치 및 흡착시간에 따른 각각의 ACF 무게증가비를 나타내었다. 그림 8과 비교하면 입구측 톨루엔 농도가 증가함에 따라 흡착시간이 60분 이내일 때 특히 입구에 근접하게 위치한 ACF의 무게증가비가 급증하였으며 입구측 ACF가 포화상태에 이르러 흡착능을 상실함에 따라 MTZ가 빠르게 출구측으로 이동하면서 출구측 ACF 무게증가비가 증가하였다. 흡착시간이 60분일 때 지점 1의 ACF 무게증가비는 14%이었고 흡착시간이 90분일 때 42%로 급증하였으며 이 기간중인 65분에서 톨루엔이 검출되었다. 입구측 톨루엔 농도 800 ppm, 유량 500 cc/min에서 흡착bed 길이가 3장에서 5장으로 증가하여 MTZ 이동거리가 증가함에 따라 그림 7에서는 흡착시간 60분대에서 모든 지점의 ACF가 포화상태에 도달하였으나 그림 9에서는 이때 지점 1, 2의 ACF가 포화상태에 도달하지 않았으며 이 구간에서 MTZ가 머물러 있어 흡착bed 출구에서 톨루엔이 검출되지 않았다.

그림 3에서의 파과곡선과 그림 9에서의 ACF 무게증가비를 비교하여 정리하면 표 3과 같다.

그림 6에서 9까지의 실험결과를 종합하여 보면 반응기 출구에 위치한 ACF의 Δm/mo가 약 0.2에 도달하는 시점에서 MTZ가 흡착층 외부로 배출되면서 파과곡선에서 톨루엔이 나타나기 시작하였다.

그림 6에서 9까지 주어진 흡착조건에서 흡착시간에 따라 각각 ACF가 위치한 지점에서의 무게증가비를 나타내어 활성적영역의 이동 특성을 보여주었다.

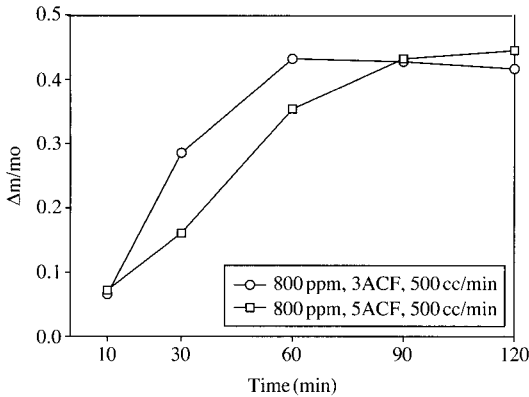


Fig. 11. Weight increment of ACF with adsorption time (800 ppm, 500 cc/min).

그림 10은 입구측 톨루엔 농도가 400 ppm, 유량이 500 cc/min인 조건에서 흡착bed의 길이 (ACF 3장과 5장)가 상이할 때 흡착시간에 따라 흡착제인 ACF 전체 무게증가비를 나타내는 그래프이다. ACF를 3장 장입하였을 때 60분대에서 포화상태에 근접한 반면 ACF를 5장 장입한 경우는 120분에 이르는 전구간에서 지속적인 흡착이 일어나는 것을 볼 수 있다. 그림 11은 농도가 800 ppm, 유량이 500 cc/min인 조건에서 흡착bed 길이 (ACF 3장과 5장)와 흡착시간에 따라 흡착제인 ACF 전체 무게증가비를 나타내는 그래프이다. 반응기에 들어오는 톨루엔 농도가 그림 10에 비하여 높으므로 ACF를 3장 장입한 경우 60분대에서 흡착제가 포화상태에 도달하였으며 5장 장입한 경우에는 90분에 포화상태에 도달하였다. 동일한 흡착조건에서 톨루엔 농도가 400 ppm에서 800 ppm으로 증가함에 따라 그림 10에 비하여 MTZ 이동속도가 증가하여 포화상태에 빨리 도달하는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

톨루엔이 포함된 공기를 ACF가 장입된 흡착bed를 통과시키면서 농도, 유량, 흡착bed 길이, 흡착시간에 따라 파과특성을 조사하였다. 흡착bed 길이는 장입한 ACF 개수로 조절하였으며 흡착bed 내경은 2.3 cm이고 ACF 1장의 무게는 약 0.09 g이었다. 파과곡

선은 톨루엔이 검출되기 시작한 시점에서 농도가 급격히 증가하여 포화상태에 도달하는 경향을 나타내었다. 톨루엔농도가 400 ppm일 때 흡착bed 길이가 짧고 (ACF=3장) 유량이 많은 (800 cc/min) 조건에서 파과점이 38.5분이었으며 흡착bed 길이가 길고 (ACF=5장) 유량이 적은 (500 cc/min) 조건에서는 파과점이 105.3분이었다. Yoon과 Nelson이 제안한 반경험식 가스흡착모델을 적용한 결과 실제 파과곡선에 근접한 파과곡선을 얻을 수 있었다.

흡착 bed에서 물질전달영역의 이동에 따른 활성적 영역의 변화를 계량적으로 측정하기 위하여 흡착제인 ACF 위치에 따라 각각의 흡착제 무게변화를 측정하였다. 톨루엔이 포함된 공기가 흡착 bed와 접촉함에 따라 초기에는 입구측 흡착제의 무게만 증가하였다. 시간이 경과함에 따라 입구측 흡착제 무게가 급격히 증가하고 MTZ 이동에 의하여 다음에 위치한 흡착제의 무게가 차례대로 증가하였다. 출구방향에 위치한 흡착제 무게증가비가 약 20%에 달하였을 때 MTZ가 흡착층 외부로 배출되면서 ACF에 흡착되지 못한 톨루엔이 검출되기 시작하였다. 흡착시간이 더욱 경과함에 따라 출구측 흡착제가 포화상태에 도달하고 이때 흡착제에 흡착된 톨루엔무게가 흡착제 자체무게의 약 40%가 되었으며 출구측 톨루엔 농도는 입구측 농도와 같게 되어 더 이상 흡착이 일어나지 않은 상태에 도달하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국환경기술진흥원의 ‘차세대 핵심환경기술개발사업’ 지원에 의하여 연구되었습니다.

#### 참 고 문 헌

김연수 (2004) ACF를 이용한 휘발성 유기화합물 (VOCs)의 흡·탈착 특성 및 기능성 침착 ACF 제조 연구, 군산대학교 환경공학과 석사학위논문, 1-80.  
 김조천 (2006) 국내의 휘발성유기화합물 (VOC) 현황 및 관리기술, 한국대기환경학회지, 22(6), 743-757.  
 임 평 (2003) 흡착공학과 과학, 두양사, 292-293.  
 조순행 (2006) 흡착제 그 원리와 응용, 지구문화사, 118-125.  
 Cheng, T., Y. Jiang, Y. Zhang, and S. Liu (2004) Prediction



- of breakthrough curves for adsorption on activated carbon fibers in a fixed bed, *Carbon*, 42, 3081-3085.
- Das, D., V. Gaur, and N. Verma (2004) Removal of volatile organic compound by activated carbon fibre, *Carbon*, 42, 2949-2962.
- Dwivedi, P., V. Gaur, A. Sharma, and N. Verma (2004) Comparative study of removal of volatile organic compounds by cryogenic condensation and adsorption by activated carbon fiber, *Separation and Purification Technology*, 39, 23-37.
- Huang, Z.H., F. Kang, K.M. Liang, and J. Hao (2003) Breakthrough of methylethylketone and benzene vapors in activated carbon fiber beds, *Journal of Hazardous Materials*, B98, 107-115.
- Navarri, P., D. Marchal, and A. Ginestet (2001) Activated carbon fibre materials for VOC removal, *Filtration+Separation*, Jan./Feb., 34-40.
- Yoon, Y.H. and J.H. Nelson (1984) Application of gas adsorption kinetics I. A theoretical model for respirator cartridge service life, *AIHA Journal*, 45(8), 509-516.