유전자열물질을 코팅한 활성탄소섬유의 휘발성 유기화합물 흡착 및 마이크로파 인가에 의한 탈착 연구

A Study on Adsorption of Volatile Organic Compound by Activated Carbon Fiber Coated with Dielectric Heating Element and Desorption by Applying Microwave

김 상 국* · 장 예 림¹⁾

한국에너지기술연구원 기후변화기술연구본부, ¹⁾한양대학교 화학공학과

(2008년 12월 12일 접수, 2009년 4월 2일 채택)

Sang Guk Kim* and Ye Rim Chang¹⁾

Climate Change Technology Research Division, Korea Institute of Energy Research

¹⁾*Department of Chemical Engineering, Han Yang University*

(Received 12 December 2008, accepted 2 April 2009)

Abstract

Adsorption of toluene by activated carbon fiber (ACF) coated with dielectric heating element and desorption by applying microwave were investigated. In order to prepare adsorbent so that VOC can be desorbed by microwave heating, fine dielectric heating element with nano size was coated on the surface of the ACF using hybrid binder. Eight adsorbents (ACF-DHE, Activated Carbon Fiber coated with Dielectric Heating Element) were prepared with different amount of dielectric heating element, kinds of hybrid binder, and solvent. In order to investigate adsorption characteristics, BET surface area, pore volume, and average pore size were measured for each adsorbent including ACF. Breakthrough experiments with toluene concentration, flow rate, bed length using fixed bed reactor were performed to investigate adsorbability of adsorbent, and results were compared with that of the ACF. Desorption reactor was constructed with modified microwave oven to investigate heating effect on ACF-DHE by applying microwave power. Each adsorbent saturated with toluene were put into desorption reactor. Composition of desorbed gas generated by applying controlled microwave power to reactor was measured. Up to now, hot air desorption method has been used. Experimental results showed that desorption method with new adsorbent prepared by coating dielectric heating element on ACF can be used for industrial application.

Key words : Activated carbon fiber, Dielectric heating element, Hybrid binder, Microwave, Desorption

---

*Corresponding author.

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

1. 서 론

생활수준의 향상에 따라 환경의 질에 대한 관심이 높아지면서 생활의 필요에 의해 새로 생성되어지는 많은 양의 복합물질에 의한 오염은 또 다른 관심의 대상이 되기 시작하였고 그 중 휘발성 유기화합물(VOC: Volatile Organic Compound)에 대한 관심은 점점 증가하고 있다. 현재 환경부고시(제2001-36호)에 따라 휘발유, 벤젠, 톨루엔 등 37종의 제품·물질이 규제대상이 되었다. VOC는 인체 및 생태계에 미치는 영향이 커서 대기유해물질로 분류되고 있으며 또한 광화학반응을 통하여 오존 등과 같은 2차물질인 광화학산화물을 생성하고 낮은 농도에서 자극성이 있으며 스모그의 주요 성분이기도 하다(Vineet and Nishith, 2002).

VOC를 제거하는 기술로서 흡착법을 포함한 다양한 방법이 사용되고 있다(김조천, 2006). 흡착제는 활성탄 특히 아자각 활성탄이 많이 사용되어 왔으며 단 성분계 흡착질뿐 아니라 다성분계 흡착질에 대한 흡착특성 연구결과가 발표되고 있다(노순영 등, 2008). 최근에는 섬유상활성탄소섬유(ACF) 흡착제의 사용이 증가되고 있다. ACF는 활성탄에 비하여 미세하고 균일한 기공크기 분포로 흡착질과의 강한 상호작용, 작고 균일한 섬유 직경에 의한 빠른 흡착과 탈착, 혹은 높은 강도와 탄성의 특징을 가지고 있다(조순행, 2006). ACF는 표면에 미세공이 잘 발달되어 있어 섭씨 150도에서 BTX계열의 VOC가 거의 완전 탈착되며 흡착 및 탈착 사이클을 반복하여도 흡착능이 오래 지속되는 특징이 있다(Das *et al.*, 2004; Fuertes *et al.*, 2003).

일반적으로 고온의 공기를 사용하여 휘발성 유기화합물을 탈착 시 특징은 탈착 초기에 많은 양이 탈착되어 농도가 급격히 높아지고 시간이 경과함에 따라 탈착농도는 감소하는 경향을 보인다. 탈착농도가 순간적으로 급격히 높아지면 화재 발생 위험성이 증가한다. 탈착농도를 균일하게 유지하기 위해서는 초기에 탈착용 공기온도를 낮게 하고 시간이 경과함에 따라 온도를 높이는 방법이 있으며 이를 위하여 탈착용 공기 온도제어장치가 필요하다.

포화된 흡착제를 재생하기 위한 방법으로 마이크로파를 이용하는 방법이 연구되고 있다. 마이크로파

를 이용한 방법은 유전자열에 의한 방법이기 때문에 공간부는 전혀 가열하지 않고 마이크로파를 잘 흡수하는 물질로 제조된 흡착제를 직접 가열할 수 있으며 기존의 고온 스틱이나 고온 공기방법에 비하여 마이크로파 출력제어장치를 장착하면 외부에서 직접 가열하는 방법에 비하여 처리설비를 간단하게 구성할 수 있는 장점이 있다. 김기중과 안호근(2008)은 활성탄에 절연물질(활석, Ni-Zn ferrite)을 코팅하여 마이크로파 인가 시 발생할 수 있는 불꽃방전을 방지할 목적으로 흡착소자를 제조하고 흡착특성 및 마이크로파 인가에 의한 탈착특성 연구를 수행하였다. 김범준과 최성우(2008)는 분말활성탄과 절연체인 벤토나이트를 일정비율로 혼합하여 구형으로 제작하고 500°C에서 소성하여 흡착제를 제조하였으며 마이크로파 인가에 의한 방전실험과 마이크로파 반복 조사 시 흡착등온선, 마이크로파 출력에 대한 톨루엔의 흡-탈착거동을 조사하였다.

본 연구에서는 미세공이 표면에 잘 발달되어 있는 활성탄소섬유에 유전자열물질을 코팅하여 활성탄소섬유에 비하여 낮은 마이크로파 인가전력에서 흡착된 VOC를 탈착할 수 있는 새로운 흡착소자를 제조하고 VOC 흡착 및 마이크로파 인가에 의한 탈착특성을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 하이브리드 바인더 제조

카본블랙은 나노크기의 미세한 입자이며 마이크로파를 잘 흡수하는 특징이 있다. 활성탄소섬유 자체도 탄소계 물질이므로 마이크로파를 흡수하여 발열하는 특징이 있지만 카본블랙은 손실전류가 커서 발열특성이 더욱 우수하다. 활성탄소섬유 표면에 카본블랙을 코팅하면 마이크로파 인가 시 카본블랙 입자가 가열되면서 활성탄소섬유에 흡착된 VOC를 더욱 빠르게 탈착할 수 있다.

카본블랙을 활성탄소섬유 표면에 고착시키기 위하여 코팅제가 필요하다. 유기코팅제는 수지로 제조되기 때문에 코팅이 매우 잘 되지만 활성탄소섬유 표면에 발달된 미세공을 막아버리기 때문에 흡착제로의 기능을 상실하게 된다. 실리카 등의 무기코팅제를 사용하면 소성온도가 높기 때문에(유윤중 등, 2002)

활성탄소섬유가 연소된다.

상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여 유, 무기 복합재료인 하이브리드바인더 2종을 제조하였으며 방법은 솔-젤의 화학반응을 이용하였다(전인주 등, 2005; Brinker, 1990). 첫 번째 바인더(HB-1)는 TiO_2 졸과 SiO_2 졸 혼합물에 알콕사이드 전구체로 TMOS (tetramethoxysilane)를 넣고 교반을 하면서 55°C 로 가열을 하면 가수분해 반응이 일어나고 이후 냉각과 정에서는 중합이 일어나며 이때 용제를 가하여 제조하였다. 용제는 butyl cellulose와 isopropyl alcohol를 혼합하여 사용하였다. TiO_2 와 실란과의 반응속도가 빨라 기포가 발생하므로 서서히 혼합하였으며 가수분해에서 중합 및 축합으로 가는 속도가 매우 빠르므로 안정화제를 첨가하였다. 안정화제를 넣지 않으면 저장 안정성이 떨어져 상품가치를 상실하게 된다. 두 번째 바인더(HB-2)는 HB-1과 제조과정이 동일하지만 TiO_2 졸과 SiO_2 졸 혼합물 대신에 Al_2O_3 졸을 사용하였다.

2.2 유전자열물질을 이용한 흡착제 제조

활성탄소섬유로부터 수분을 제거하기 위하여 건조기에 넣고 130°C 에서 1시간 동안 전 처리하였다. 나노크기의 미세한 카본블랙(C/B)을 하이브리드바인더와 용제가 혼합된 코팅액에 균일하게 분산하기 위하여 초음파분산기(Sonics & Materials사 제품, 모델 VCX 130)를 사용하였다. 코팅액 조성은 표 1과 같다. 9번은 코팅하지 않은 활성탄소섬유이다.

ACF표면에 카본블랙을 코팅하기 위하여 그림 1과 같은 코팅장치를 사용하였다. 코팅액을 용기에 넣고 초음파분산기를 코팅기간 중 가동하여 카본블랙이 가라앉지 않고 코팅액에 계속 분산된 상태를 유지하도록 하였다. 진공코팅조 내에 직경이 2.3cm인 활성탄소섬유 4장을 원판 위에 넣고 진공펌프를 가동하여 코팅조 내부를 진공상태로 하였다. 코팅액을 활성탄소섬유표면에 분산하기 위하여 full cone형 내부혼합식 이류체 분무노즐을 이용하였다. 코팅액의 용제는 필터를 거쳐 급속냉각기(cold trap)에서 다시 용제로 회수되므로 진공펌프가 손상되는 것을 방지할 수 있다. 코팅을 하면서 중간에 원판을 뒤집어 주어 ACF양면에 유전자열물질을 코팅하였다. 진공코팅조 하부는 후렌지로 제작하여 코팅 후 청소가 가능하게 하였으며 상부에 진공압력계이치를 부착하여 진공도

Table 1. Composition of coating fluid.

No.	Composition		
	C/B (g)	Binder (cc)	Solvent (cc)
1	1	HB-1, 10	IPA, 140
2	2	HB-1, 10	IPA, 140
3	2	HB-1, 20	IPA, 130
4	1	HB-1, 5	IPA, 145
5	1	HB-2, 10	ethanol, 140
6	2	HB-2, 10	ethanol, 140
7	2	HB-2, 20	ethanol, 130
8	1	HB-2, 5	ethanol, 145
9	0	0	0

Fig. 1. Schematic diagram of the coating apparatus.

를 확인할 수 있도록 하였다. 하이브리드바인더는 열경화가 필수적이며 코팅이 끝난 후 카본블랙이 코팅된 활성탄소섬유는 건조기에서 상온에서 120°C 까지 승온하면서 10분마다 한 번씩 뒤집어 주면서 1시간 동안 건조하여 새로운 흡착소자인 유전-흡착제(ACF-DHE)를 제조하였다.

2.3 흡착 및 탈착 실험

유전자열물질이 코팅된 유전-흡착제의 흡착특성을 조사하기 위하여 고정층 흡착 bed에 유전-흡착제를 장입하고 파과특성을 조사하였다. Dynamic 실험을 하기 위한 실험 장치는 그림 2와 같은 VOC발생장치, 흡착장치인 흡착bed, 분석 장치로 구성된 실험 장

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental apparatus for adsorption.

치를 사용하였으며 자세한 내용은 김상국과 장예림 (2008)에 소개된 바와 같다. 휘발성 유기화합물로 톨루엔을 사용하였다. 반응기 하부에서 10 cm되는 지점의 그물망 위에 장입된 유전-흡착제를 통과하고 배출된 톨루엔 가스 농도는 6 port valve가 장착된 HP 6890 가스크로마토그래프(GC) FID검출기를 이용하여 5분 간격으로 측정하였다.

마이크로파 인가에 의한 탈착 및 온도측정 장치는 마이크로파 발생장치 본체로 시중에서 판매되는 출력이 1 kW인 마이크로웨이브 오븐을 사용하였으며 내부를 일부 개조하였다. 마이크로웨이브 오븐은 출력이 고정되어 있으며 오직 on-off기능과 인가시간 조절만이 가능하다. 마이크로웨이브 오븐을 개조하여 위상제어 방식으로 출력을 조절할 수 있도록 하였으며 출력제어를 위하여 PID 제어방식의 Yamatake Honeywell DigitroniK Line SDC 30 Digital Indicating Controller를 부착하였다. 그림 3에 탈착반응기 및 온도측정 장치 공정도를 나타내었다.

마이크로파 출력이 증가함에 따라 유전-흡착제의 온도가 증가하고 탈착된 VOC의 농도도 증가하므로 화재위험성을 방지하기 위하여 탈착가스로 비활성가스인 질소를 사용하였다. 탈착반응기 자체의 재질은 테프론으로 제작하여 마이크로파가 투명하게 통과하도록 함으로써 반응기와의 상호작용으로 열이 발생

하지 않도록 하였다. 질소는 오븐 상부를 통하여 반응기내로 유입되도록 천공을 하였으며 이때 천공된 구멍을 통하여 마이크로파가 외부로 새어나가지 않도록 그물망을 설치하였다. 반응기는 좌우에 후렌지와 유니온으로 연결하여 탈, 부착이 가능하고 가스가 새지 않은 구조로 제작하였다. 반응기 내에 유전-흡착제가 위치하며 탈착가스는 오븐 좌측으로의 연결관을 통하여 외부로 배출된다. 탈착반응기 및 연결관은 테프론 재질을 사용하였지만 질소가스 입, 출구와 마이크로웨이브 오븐 벽과의 접합지점에 금속재질의 유니온을 사용하였으며 마이크로웨이브 오븐을 외부와 접지하여 마이크로파 인가 시 반사와 발생을 억제하여 안정적으로 운전할 수 있게 하였다. 탈착된 가스는 GC-FID를 사용하여 분석하였다.

마이크로파 인가에 의한 VOC 탈착은 유전-흡착제의 발열작용에 의하므로 탈착실험과 동일한 운전조건하에서 흡착제의 온도를 측정할 필요가 있다. 유전-흡착제 온도측정 장치는 탈착반응기와 동일한 재질의 테프론으로 제작하였다. 일반적으로 사용하는 열전대는 접지가 안 된 금속성 재질이므로 마이크로파 인가 시 전기 스파크를 발생하여 사용이 불가하다. 마이크로웨이브 오븐 상부 벽에 온도를 측정하기 위한 비접촉방식의 IR 센서를 부착하였으며 센서는 Eurotron사의 Rayomatic 14MK2를 사용하였다. 온도

Fig. 3. Diagram of the desorption and temperature measurement experimental apparatus by microwave.

측정장치 하우징 상부를 마이크로파가 투명하게 통과할 수 있도록 특별히 제작된 Zn-Se glass로 덮었으며 온도측정 시 일정한 유량의 질소를 공급하였다. 온도측정 시에 탈착실험과 동일한 마이크로파 출력, 동일한 흡착제, 동일한 유량의 질소를 흘려보내면서 시간에 따라 온도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유전-흡착제 특성

활성탄소섬유 표면에 나노크기의 미세한 카본블랙을 코팅하여 유전-흡착제를 제조하였으며 표 2에 유전-흡착제의 비표면적 및 세공특성을 나타내었다.

유전-흡착제의 비표면적(BET)은 원래의 활성탄소섬유의 1,644 m²/g에 비하여 다소 감소하여 918~1,456 m²/g이었으나 감소율이 크지 않았다. 이는 하이브리드바인더가 나노크기로 분산된 카본블랙입자 표면에 점착성을 부여하였으며 코팅액이 이류체 분무기를 통하여 활성탄소섬유 표면에 분사되면서 용제가 제거되고 건조과정에서 바인더의 열경화현상이 일어남에 따라 카본블랙 입자가 활성탄소섬유 표면에 분산되어 점착되는 과정에서 카본블랙 입자군의

Table 2. Physical characteristics of the ACF-DHE.

No.	BET			Pore volume (cm ³ /g)	Pore size (Å)
	Single point	BET	Langmuir		
1	1083	1102	1240	0.481	17.45
2	1223	1242	1399	0.518	16.69
3	904	918	1037	0.381	16.59
4	1316	1340	1495	0.554	16.54
5	1293	1313	1482	0.538	16.38
6	1302	1323	1494	0.553	16.72
7	1093	1110	1252	0.401	16.62
8	1438	1456	1644	0.599	16.47
9	1621	1644	1853	0.67	16.29

크기가 활성탄소섬유 미세 세공에 비하여 훨씬 크므로 비표면적 감소는 적게 일어났다. 따라서 코팅액이 활성탄소섬유표면을 덮지 않으므로 흡착질이 흡착제로의 이동이 자유로워 흡착 및 탈착이 정상적으로 일어날 수 있다. 코팅액 중 하이브리드바인더 첨가량이 많은 3번 및 7번 유전-흡착제의 비표면적은 타 흡착제에 비하여 BET면적이 다소 작았지만 유전가 열물질인 카본블랙 첨가량이 BET면적에 미치는 영향은 적었다.

Fig. 4. SEM picture on sample 2.

Fig. 5. SEM picture on sample 6.

카본블랙 첨가량이 2g인 유전흡착제 2번과 6번에 대하여 카본블랙이 코팅된 활성탄소섬유 표면을 주사전자현미경(SEM)으로 촬영하였다. 그림 4는 유전-흡착제 2번에 대한 사진이다. 미세기공이 표면에 잘 발달되어 있으며 나노 크기의 카본블랙은 단일입자로 불안정하기 때문에 카본블랙이 뭉쳐져 작은 집합물 형태로 표면에 코팅되어 있는 것을 볼 수 있다. 본 사진으로부터 카본블랙을 코팅함에 따라 대부분의 미세기공이 막히지 않았음을 알 수 있다. 그림 5는 유전-흡착제 6번에 대한 사진이다. 유전-흡착제 6번

에 대한 SEM 사진은 유전-흡착제 2번과 비슷한 형상을 보여주었다. 유전-흡착제에 코팅된 카본블랙의 크기는 일정하지 않고 일부는 작은 입자군으로 또 일부는 좀 더 큰 입자군으로 뭉쳐져 활성탄소섬유 표면에 점착되어 있음을 볼 수 있지만 그림 4에 비하여 입자군 크기가 약간 작은 것을 알 수 있다.

3.2 흡착특성

그림 2의 흡착실험 장치를 이용하여 표 1과 같이 제조한 흡착제 9종에 대한 파과실험을 하였다. 그림

Fig. 6. Breakthrough curve with 2 sheets of ACF-DHE.

Table 3. Calculated LUB with 2 sheets of ACF-DHE.

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
LUB	0.56	0.44	0.59	0.36	0.31	0.28	0.24	0.23	0.18

6은 톨루엔가스가 흡착bed층을 통과 후 시간에 따라 측정된 톨루엔 농도이며 유전-흡착제 종류에 따른 파과특성을 나타내었다. 직경이 약 2.3cm인 유전-흡착제 2장을 흡착bed에 장입하였으며 가스유량은 800 cc/min, 농도는 800ppm이었으며 반응기 내 온도는 30°C를 유지하였다. 톨루엔 가스를 활성탄소섬유에 흡착 시 물질전달구간(MTZ : Mass Transfer Zone)이 고정층 bed를 빠져나오면서 흡착질 농도가 급격히 증가하는 경향이 있다(김상국과 장예림, 2008; Das *et al.*, 2004).

파과특성으로부터 얻을 수 있는 주요 정보는 파과 곡선상에서 흡착질의 농도가 허용한계 이상이 되는 시간(exhaustion time)까지 고정흡착층에 흡착된 흡착질의 양을 의미하는 흡착층의 흡착능력(adsorption amount)과 파과시간(t_b) 및 파과곡선의 흡착질농도가 초기농도의 절반이 되는 점까지의 시간인 양론파과 시간(stoichiometric breakthrough time, t_{stoi})에 의하여 식 (1)과 같이 정의되는 LUB (Length of Unused Bed) 이다(박영성, 2002).

$$LUB = (1 - t_b/t_{stoi})L \quad (1)$$

흡착제에 의한 흡착량은 유입 흡착질의 양에서 출

Fig. 7. Breakthrough curve with 4 sheets of ACF-DHE.

Table 4. Calculated LUB with 4 sheets of ACF-DHE.

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
LUB	0.36	0.43	0.54	0.15	0.32	0.55	0.29	0.15	0.21

구에서 검출되는 흡착질의 양을 뺀 것을 흡착 초기 시간으로부터 유입 흡착질의 농도가 출구 흡착질의 농도와 같아지는 포화시간(saturation time)까지 적분하여 구할 수 있다. 그림 6에서 보는 바와 같이 ACF가 유전-흡착제에 비하여 다소 흡착량이 많은 것으로 측정되었으나 주목할 만한 차이는 보이지 않았다. 실제 흡착공정에서는 고정흡착층의 이용효과를 나타내는 LUB 또한 중요한 의미를 갖는다. 그림 6에서 ACF와 유전-흡착제 공히 MTZ가 흡착층을 통과한 후 농도가 급격히 증가하는 경향을 나타내어 흡착제 이용률이 높았다. ACF가 유전-흡착제에 비하여 MTZ가 상대적으로 짧아 이용효과가 다소 높았으며 식 (1)에 의하여 계산한 LUB는 표 3과 같다.

그림 7은 고정층 bed에 유전-흡착제 4장을 장입하여 파과실험을 한 결과이며 나머지 조건은 그림 6과 동일하다. 흡착층 길이가 증가함에 따라 파과시간이 증가하였으며 그림 6과 같이 MTZ가 흡착층을 통과한 후 검출되는 톨루엔 농도가 급격히 증가하다가 포화상태에 접근하면 증가속도가 급격히 감소하였다. 유전-흡착제는 ACF에 비하여 완만한 S자형 형태의 파과곡선을 나타내었으며 이는 전술한 바와 같이 유전-흡착제의 이용률이 ACF에 비하여 다소 떨어지

Fig. 8. Desorbed toluene concentration with time when 38% microwave power is applied.

Fig. 9. Temperature profile of 2 ACF-DHE when 38% microwave power is applied.

는 결과를 나타내었다. 식 (1)에 의하여 계산한 LUB는 표 4와 같다.

3.3 탈착특성

탈착실험 방법은 휘발성 유기화합물인 톨루엔을 사용하여 유전-흡착제를 포화시킨 후 탈착반응기에 넣고 carrier 가스로 질소를 일정하게 흘려보내주면서 출력이 조절된 마이크로파를 인가하여 시간에 따라 출구에서 톨루엔 농도를 측정하였다. 그림 8은 마이크로파 출력을 38% 인가하는 조건에서 유전-흡착제 2장을 탈착반응기에 넣고 질소가스를 100 [cc/min] 흘려보내면서 탈착된 톨루엔가스 농도를 시간에 따라 측정한 결과이다.

상기 그림에서 번호는 표 1과 동일한 유전-흡착제를 나타낸다. 마이크로파를 인가하면 초기 1분 동안 유전-흡착제의 온도가 급격히 상승하고 이후 완만하게 상승하는 특징이 있어 탈착되는 유기성 휘발물질의 농도곡선은 초기 약 10분 이내에 정점을 나타내고 이후 흡착제에 잔류하는 유기성 휘발물질의 양이 고갈되므로 유전-흡착제의 온도가 서서히 상승하여도 탈착되는 농도는 감소하는 경향을 나타내었다.

그림 8에서 유전자열물질인 카본블랙 2g 함유된 코팅 액으로 제조한 2,3,6,7번의 유전-흡착제의 최고 탈착농도는 1,311~1,684ppm으로 카본블랙을 1g 첨가한 유전-흡착제 또는 ACF에 비하여 비교적 높은 농도를 나타내었다. 마이크로파 출력을 38% 인가 시

cavity 내 실제 인가된 마이크로파 출력은 53.4 W이었으며 이는 cavity 내 일정량의 물이 담겨진 비이커를 넣고 마이크로파 인가하기 전과 후의 온도차를 측정하여 구하였다. 인가된 출력이 낮으므로 탈착농도는 주목할 만한 차이를 보이지 않았다. 그림 8과 동일한 조건인 마이크로파 출력 38%, 질소 유량 100 [cc/min]에서 유전-흡착제 2장을 온도측정 장치 housing에 넣고 그림 3의 온도측정 장치를 이용하여 유전-흡착제의 온도를 10분간 측정하였으며 결과는 그림 9와 같다.

인가한 마이크로파 출력이 낮으므로 유전-흡착제의 발열특성은 큰 차이를 보이지 않았다. ACF도 구성원소가 카본이므로 자체적으로 마이크로파를 흡수하여 가열되지만 유전자열물질을 코팅한 유전-흡착제에 비하여 온도가 다소 낮은 것을 볼 수 있다.

유전-흡착제에 포화된 휘발성 유기화합물의 탈착은 흡착제의 온도에 기인하므로 동일한 실험조건하에서 마이크로파 출력을 43%로 증가하여 온도증가가 탈착에 미치는 영향을 조사하여 보았으며 결과는 그림 10과 같다. 마이크로파 출력이 증가함에 따라 흡착제 온도 증가에 기인하여 그림 8에 비하여 초기 탈착되는 톨루엔 농도가 급격히 증가하고 또한 최고 농도 이후 급격히 감소하는 특징을 나타내었다. 이는 Das et al. (2004)이 톨루엔에 포화된 ACF를 가열에 의하여 탈착 시 탈착온도를 75°C에서 150°C로 증가시키기에 따라 초기 5분 동안 탈착농도가 급격히 증가

Fig. 10. Desorbed toluene concentration with time when 43% microwave power is applied.

Fig. 11. Temperature profile when 43% microwave power is applied.

하였으나 그 이후에서는 탈착농도가 급격히 감소하였음과 일치한다. 유전-흡착제 6의 경우 최고농도는 5.5분에서 3,619 ppm이었다.

카본블랙이 2g 함유된 코팅액으로 제조한 2,3,6,7 유전-흡착제로부터 탈착된 톨루엔 최고농도는 2,341~3,619 ppm이었으며 카본블랙을 1g 함유한 코팅액으로 제조한 1,4,5,8 유전-흡착제의 최고 탈착농도는 1,241~2,022 ppm이었다. 유전-흡착제를 제조 시 코팅액을 spray chamber 내에 있는 활성탄소섬유 표면에 분사하여 카본블랙을 부착하므로 동일한 조건하에서 유전-흡착제를 제조하여도 카본블랙 부착량과

Table 5. Heating rate of the ACF-DHE at 38%, 43% microwave power.

No.	Coating fluid		Heating rate (°C/min)	
	C/B (g)	Binder (cc)	38% power	43% power
2	2	HB-1, 10	3.46	11.51
3	2	HB-1, 20	3.3	10.53
6	2	HB-2, 10	4.24	11.67
7	2	HB-2, 20	3.23	9.92
9	0		2.52	7.41

Table 6. Comparison of the amount of desorbed toluene during initial 10 min at 38%, 43% microwave power.

No.	Coating fluid		Desorbed toluene (mg/10 min)	
	C/B(g)	Binder(cc)	38% power	43% power
2	2	HB-1, 10	9.23	14.10
3	2	HB-1, 20	9.20	13.93
6	2	HB-2, 10	8.60	17.46
7	2	HB-2, 20	7.83	12.72
9	0		3.86	9.50

분포는 약간의 차이가 발생할 수 있다. 그림 8과 그림 10은 다소의 차이는 존재하지만 코팅액에 함유된 카본블랙량이 탈착농도에 미치는 주요 인자인 것을 알 수 있다. 마이크로파를 43% 인가 시 그림 10과 동일한 운전조건에서 유전-흡착제의 승온특성을 측정하였으며 결과는 그림 11과 같다. 이때 실제 인가한 마이크로파 출력은 94.9 W이었다.

마이크로파 인가출력을 증가시키에 따라 유전-흡착제는 좀 더 분명한 승온특성을 나타내었다. 유전가열물질인 카본블랙 2g 함유한 코팅액을 사용하여 제조한 2,3,6,7 유전-흡착제 온도가 타 유전-흡착제 온도보다 높았다.

유전가열물질을 코팅하지 않은 ACF도 마이크로파를 일부 흡수하여 발열을 하고 온도가 증가함에 따라 흡착된 톨루엔을 탈착하지만 유전-흡착제와 동일한 양의 VOC를 탈착하기 위해서는 인가하는 마이크로파 출력을 증가하거나 또는 탈착시간을 늘려야 하므로 에너지소모량이 증가하게 된다. 표 5에 카본블랙 2g 함유한 코팅액으로 제조한 유전-흡착제와 카본블랙을 코팅하지 않은 ACF에 대하여 그림 9와 그림 11로부터 계산한 승온속도를 비교하여 나타내었다. 마이크로파 출력이 증가함에 따라 유전-흡착제

의 승온속도가 ACF에 비하여 급속히 증가하였으며 흡착제로부터 톨루엔의 탈착에 미치는 가장 중요한 인자는 온도이므로 동일한 마이크로파 출력에서 탈착효율이 증가하게 된다. 표 6에 유전-흡착제와 ACF에 대하여 마이크로파 출력에 따라 초기 10분간 탈착된 톨루엔 양을 그림 8과 그림 10의 탈착농도 곡선 하부면적을 시간으로 적분하여 구하였다. 충분한 탈착시간이 주어지면 마이크로파 인가에 의하여 흡착제 온도가 평형온도에 도달하기까지 계속 증가하므로 결과적으로 탈착량 자체는 큰 변화가 없다. 그러나 탈착농도가 급격히 증가하는 초기 10분에서 탈착량은 분명한 변화를 나타내었다. 흡착제는 VOC의 흡착 및 탈착 사이클을 반복하게 되고 일정한 전력을 인가 시 초기 탈착농도가 높으면 탈착시간을 줄일 수 있어 에너지를 절감하는 요인이 된다.

4. 결 론

활성탄소섬유 표면에 유전자열물질을 코팅하여 마이크로파에 의하여 탈착하는 새로운 유전-흡착제를 개발하였다. 유전자열물질을 활성탄소섬유 표면에 코팅하기 위한 바인더로 솔-젤 합성법에 의하여 제조한 하이브리드 바인더를 사용하였다. 유전-흡착제의 흡착 및 탈착특성을 조사하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 나노크기의 유전자열물질인 카본블랙을 활성탄소섬유 표면에 코팅하기 위하여 카본블랙, 하이브리드바인더, 용제를 혼합한 코팅액의 종류와 조성을 달리하여 8종의 유전-흡착제를 제조하였다. 제조한 유전-흡착제의 비표면적(BET)을 측정한 결과 활성탄소섬유는 $1,644 \text{ m}^2/\text{g}$ 이었으며 유전-흡착제는 $918 \sim 1,456 \text{ m}^2/\text{g}$ 로 바인더에 의하여 활성탄소섬유 표면에 발달한 미세공이 막히는 현상을 최소화하였다.

2) 유전-흡착제에 흡착질로 톨루엔 가스를 사용하여 파과특성을 조사하였다. 물질전달구간이 유전-흡착제를 통과하면서 흡착반응기 출구에서 측정한 톨루엔 농도가 급격히 증가하였다. 파과실험 결과로부터 흡착제의 이용효과를 나타내는 LUB (Length of Unused Bed)를 계산한 결과 ACF의 이용률이 유전-흡착제에 비하여 약간 높았으나 주목할 만한 차이를 나타내지 않았다.

3) 유전-흡착제의 마이크로파 인가에 따른 승온특성 및 탈착특성을 조사하였다. 동일한 마이크로파 인가 출력에서 카본블랙을 2g 포함한 코팅액으로 제조한 유전-흡착제의 승온속도 및 초기 탈착농도가 카본블랙을 1g 함유한 코팅액으로 제조한 유전-흡착제 또는 ACF에 비하여 높았다. 직경이 2.3cm이며 톨루엔으로 포화된 유전-흡착제 (2,3,6,7) 각각 2장을 탈착 반응기에 넣고 질소유량 100 cc/min , 실 인가출력 53.4 W 조건에서 탈착된 톨루엔 최고농도는 $1,311 \sim 1,684 \text{ ppm}$ 이었으며 출력 94.9 W 조건에서는 탈착된 톨루엔 최고농도는 $2,341 \sim 3,619 \text{ ppm}$ 이었다. 흡착제는 연속적으로 흡착과 탈착 사이클을 반복한다. 동일한 마이크로파 출력 인가조건 하에서 유전자열물질 함량이 높은 유전-흡착제는 흡착제 온도가 높게 되고 이는 초기 탈착농도가 증가하는 원인이 되어 동일한 양의 VOC를 탈착 시 탈착시간이 단축되므로 마이크로파 인가에 소요되는 에너지가 절감되어 경제적이다.

감사의 글

본 연구는 한국환경기술진흥원의 ‘차세대 핵심환경기술개발사업’ 지원에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- 김기중, 안호근 (2008) 절연물질이 코팅된 활성탄의 벤젠 흡착특성 및 마이크로파에 의한 탈착에 관한 연구, 공업화학, 19(4), 445-451.
- 김범준, 최성우 (2008) 마이크로파를 이용한 탈착시스템에서 개질화된 활성탄의 흡·탈착특성, 한국환경과학회지, 17(5), 493-500.
- 김상국, 장예림 (2008) 활성탄소섬유 흡착bed에서의 톨루엔 흡착특성, 한국대기환경학회지, 24(2), 220-228.
- 김조천 (2006) 국내의 휘발성유기물질(VOC) 현황 및 관리 기술, 한국대기환경학회지, 22(6), 743-757.
- 노순영, 김기호, 최재호, 한삼덕, 길인섭, 김덕현, 이영우 (2008) 활성탄 흡착탑을 이용한 휘발성 유기화합물의 흡착특성, 한국대기환경학회지, 24(4), 455-469.
- 박영성 (2002) 악취물질 제거용 고성능 신소재 흡착제개발, 대전·충남지역대전환경기술개발센터 환경기술연구개발사업 최종보고서, pp. 21-22.

- 유윤종, 조철희, 김홍수, 안영수, 한문희, 장건익 (2002) 세라믹 섬유지를 사용한 허니컴 흡착소자 제조 및 VOC 흡착특성, 한국세라믹학회지, 39(11), 1035-1041.
- 전인주, 이익모, 권용구, 김재환, 김철희, 김현우, 박상언, 인화승, 유천열, 이근섭, 이상천, 이완인, 조남희, 차동우, 최진섭, 최철진, 최형진, 탁용석, 황혜진 (2005), 나노소재, 대영사, pp. 224-245.
- 조순행 (2006) 흡착제 그 원리와 응용, 지구문화사, 118pp.
- Brinker, C.J. (1990) Sol-Gel Science, Academic Press, New York, U.S.A., pp. 97-160.
- Das, D., V. Gaur, and N. Verma (2004) Removal of volatile organic compound by activated carbon fiber, Carbon, 42, 2949-2962.
- Fuertes, A.B., G. Marban, and D.M. Nevskaja (2003) Adsorption of volatile organic compounds by means of activated carbon fibre-based monoliths, Carbon, 41, 87-96.
- Vineet, K.G. and V. Nishith (2002) Removal of volatile organic compounds by cryogenic condensation followed by adsorption, Chemical Engineering Science, 57, 2679-2696.