

절연물질이 코팅된 활성탄의 벤젠 흡착특성 및 마이크로파에 의한 탈착에 관한 연구

김기중 · 안호근[†]

순천대학교 화학공학과
(2008년 6월 6일 접수, 2008년 7월 17일 채택)

A Study on Adsorption Characteristics of Benzene over Activated Carbons Coated with Insulating Materials and Desorption by Microwave Irradiation

Ki-Joong Kim and Ho-Geun Ahn[†]

Department of Chemical Engineering, Suncheon National University, Jeonnam 540-742, Korea
(Received June 6, 2008; accepted July 17, 2008)

마이크로파를 이용하여 휘발성유기화합물(VOCs; Volatile Organic Compounds)로 오염된 활성탄을 재생하기 위하여, 절연 물질로서 활석(Talc)과 Ni-Zn ferrite를 각각 활성탄에 코팅하여 벤젠의 흡착 및 탈착 특성을 조사하였다. 절연물질이 코팅된 활성탄의 물리적 특성 및 표면상태는 질소가스 흡착장치와 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 각각 확인하였다. 비표면적과 벤젠에 대한 흡착량은 비례관계를 보였고, 활성탄에 활석이나 Ni-Zn ferrite를 코팅하면 마이크로파에 의한 불꽃방전을 억제 할 수 있었다. 활성탄에 절연물질을 코팅하기 위해 사용한 바인더는 PS (potassium silicate)가 벤젠에 대한 흡착능이 가장 우수한 것으로 나타났다. 마이크로파 출력에 따른 탈착량은 출력에 비례하는 경향을 보였고, 연속되는 흡착과 탈착과정이 5회 반복되더라도 재현성이 충분히 나타났다. 결과적으로 VOCs로 오염된 폐활성탄의 재생방법으로서, PS를 바인더로 사용하여 활석이나 Ni-Zn ferrite를 활성탄에 코팅하여 마이크로파로 탈착시키면 효과적임을 알 수 있었다.

In order to regenerate the activated carbon polluted by volatile organic compounds (VOCs) using microwave, adsorption and desorption characteristics of benzene over activated carbon (AC) coated with insulating materials were investigated. Physical characteristics of activated carbon and insulator-coated ACs were investigated by means of N₂ gas adsorption and scanning electron microscopy (SEM). The amount of VOC adsorbed showed a positive relationship with the specific surface area of the ACs, and spark discharge over insulator-coated ACs did not occur. Potassium silicate (PS) was the best binder for coating of insulating materials on AC. Amount of benzene desorbed by microwave irradiation was dependent on output power of microwave. Nearly same performance was obtained even though the adsorption-desorption operation under microwave irradiation was repeated 5 times. Finally, it was known that the microwave heating was a very effective mean for regenerating the polluted AC.

Keywords: benzene, adsorption, desorption, insulator-coated activated carbon, microwave, regeneration

1. 서 론

날로 심화되고 있는 대기오염의 주범인 휘발성유기화합물(VOCs; Volatile Organic Compounds)은 자동차와 건축 등 도장분야에서 발생 되고 있으며, 날로 배출량이 증가하고 있는 추세에 있다. VOC란 대기 중의 휘발성 탄화수소를 총칭하는 것으로 VOC는 그 자체의 독성뿐만 아니라 도심 스모그의 원인, 환경 및 인체 건강에 악영향을 미치는 유해물질이다. 이러한 VOC의 배출에 따른 환경오염으로 인해 막대한 사회적 비용을 유발시키고 있어 적절한 방법으로 VOC를 제거하기 위한 기술 개발에 중점을 두고 있다. VOC 제거를 위한 방법으로는 크게 파괴기술과 회수기술이 알려져 있다[1]. VOC를 파괴 처리하는 기술로서 열소각법과 촉매를 이용한 촉매연소법 등이 있으며, 회수기술로는 응축회수법, 흡수법 및 흡착법을 들 수 있다[2,3].

VOC를 제거하는 기술로서 가장 간단하면서도 효율이 좋은 흡착법을 많이 이용하고 있고[4], 포화된 흡착제를 재생하기 위한 방법으로 마이크로파를 이용하는 방법이 연구되고 있다[5,6]. 마이크로파를 이용한 방법은 유전가열(dielectric heating)에 의한 방법이기 때문에 VOC를 직접 가열할 수 있으며, VOC가 비극성 성분일 경우 일정량의 수분만 공급해 주면 효과적으로 VOC를 가열할 수 있다[7]. 따라서 기존의 hot stream이나 hot air방법에 비하여 처리효율이 매우 높을 뿐 아니라 처리시간이 매우 짧다. 또한 외부에서 직접 가열하는 방법에 비하여 처리설비가 간단하고 후처리 시설용량이 작다는 장점이 있다 [8].

그러나 값이 싼 대표적인 흡착제인 활성탄은 도전성이기 때문에 유전에 의한 전기적 편향을 물질 내에서 일으키지 못하고, 주어진 전장(전자파의 전계성분)에 따라서 탄소분자간의 전극을 발생시켜 전류가 흘러서 하나의 활성탄 입자에 주어진 큰 기전류가 불안정한 활성탄

[†] 교신저자(e-mail: hgahn@suncheon.ac.kr)

입자간의 접촉이 집중하게 되고 그 부분에서 불꽃방전이 일어나 발광하는 현상을 나타낸다[9,10]. 이로 인하여 활성탄은 순간 고온에 도달하여 CO₂와 H₂O로 분해되어 버린다. 이러한 이유로 마이크로파에 의한 활성탄의 가열은 곤란하므로, 활성탄 표면에 절연물질을 코팅하여야 한다. 절연물질을 활성탄 입자의 주위에 코팅하면 활성탄끼리의 접촉이 없게 되어 입자 간에 흐르는 전류를 저지하게 된다. 그러나 절연물질을 활성탄 표면에 코팅하였을 때 절연물질에 의한 세공의 폐쇄에 의한 비표면적은 감소하지 않고, 흡착성능에 영향을 주지 않아야 한다. 또한, 코팅한 활성탄의 흡착 및 탈착 반복에 따른 흡착성능에 변화가 없어야 한다.

따라서 본 연구에서는 절연물질로서 활석(Talc)과 Ni-Zn ferrite를 활성탄에 각각 코팅하여 마이크로파 조사에 따른 불꽃방전 억제효과 및 물리적 특성 변화를 알아보았고 벤젠에 대한 흡착 및 탈착 특성을 조사하였다.

2. 실험

본 연구에 사용된 절연물질을 코팅하기 위한 활성탄은 아자각을 원료로 한 활성탄(AC; Activated Carbon, 30~40 mesh, Samchully, Co.)을 정제하여 이용하였다. 정제활성탄(PAC; Purified AC)을 제조하는 과정은 다음과 같다. 활성탄을 증류수에 넣고 1 h 동안 100 °C에서 끓여 부유물을 제거한 후 증류수로 수회 세척하여 표면을 깨끗이 하는 과정을 5회 반복한 후 100 °C의 오븐에서 24 h 건조하였다[6].

절연물질인 활석(Ta; 3MgO · 4SiO₂ · H₂O, KC 2000, Koch Co., Korea)과 Ni-Zn ferrite (Ni-Zn; Ni_{1-x}Zn_xO · Fe₂O₃, YN-201, YongHwa Ferrite Co., Korea)를 다양한 바인더를 사용하여 정제활성탄표면에 코팅하였다. Colloidal silica (CS; SiO₂, Aldrich), potassium silicate (PS; K₂SiO₃, Kanto Chem.), tetraethylorthosilicate (TEOS; Si(OC₂H₅)₄, Junsei), 그리고 water glass (WG; Na₂SiO₃, Sanchun Chem.)를 바인더로 사용하였다. 절연물질 코팅방법은 일반적인 함침법을 이용하였으며 제조과정은 다음과 같다. 먼저 증류수에 정제활성탄과 활석 또는 Ni-Zn ferrite와 바인더를 넣고 상온에서 약 1 h 교반 후 회전농축증발기(rotary evaporator)를 이용하여 0.1 atm에서 완전히 물을 증발·건조시켰다. 이후 100 °C 오븐에서 24 h 건조 후 공기분위기의 전기로를 이용하여 200 °C에서 3 h 소성하였다. 정제활성탄에 코팅할 활석과 Ni-Zn ferrite의 양은 활성탄에 대하여 각각 5 wt%와 15 wt%이며, 바인더는 활석과 Ni-Zn ferrite에 대하여 각각 4 wt%와 2.7 wt%가 되도록 정량하여 첨가하였다. 그리고 Ni-Zn ferrite의 코팅량의 영향실험을 위해서는 Ni-Zn ferrite의 코팅량을 10 wt%와 20 wt%로 하여 제조하였다.

절연물질로 사용된 활석과 Ni-Zn ferrite의 평균 입자크기는 입도분석기(Zeta potential spectrophotometer, ELS 8000, Otsuka, Japan)를 이용하여 확인하였다. 정제활성탄과 절연물질이 코팅된 정제활성탄의 물리적 특성 즉, 비표면적과 세공부피, 세공크기분포는 비표면적 측정장치(ASAP 2010, Micromeritics, USA)를 이용하여 측정하였고, 주사전자현미경(SEM, S-3500N, Hitachi, Japan)으로 표면상태를 확인하였다.

절연물질이 코팅된 활성탄의 흡착 및 탈착성능을 측정하기 위한 실험장치는 Figure 1에 나타난 바와 같이 상압 유통식으로 구성하였다. VOC의 모델가스로는 벤젠을 선정하였으며, 벤젠은 항온조를 이용하여 헬륨으로 동반증발시켜 농도를(16.2 mol%) 일정하게 유지하였으며, 유량은 40 mL/min의 조건으로 실온에서 흡착실험을 수행하였다. 흡착관은 Figure 2에 나타난 바와 같이 마이크로파에 대하여 유전손

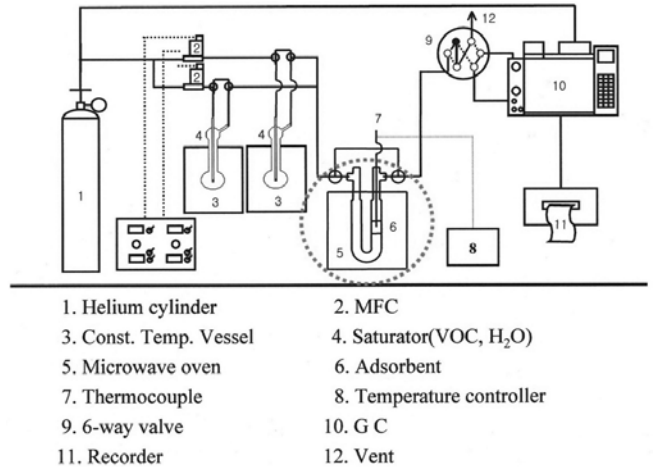


Figure 1. Experimental apparatus for adsorption and desorption of benzene by microwave irradiation.

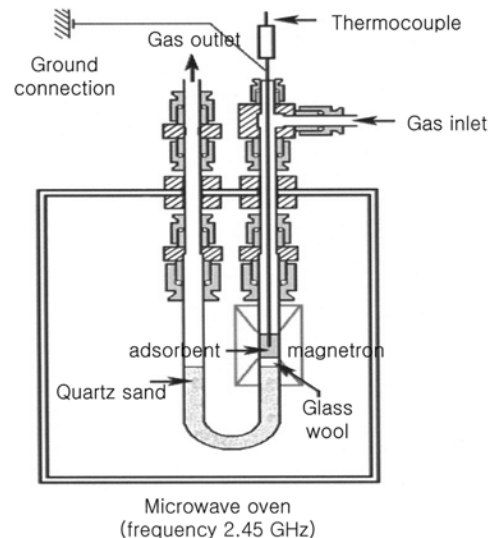


Figure 2. The details of the adsorbent tube in a microwave oven for microwave heating.

실율(dissipation factor)이 적은 내경이 7 mm인 U자형(o.d., 3/8") 석영관을 사용하였다. 흡착제는 0.3 g을 사용하였고, 흡착제의 유량에 의한 비산을 막기 위하여 흡착제 위아래에 석영섬유를 채워 고정하였다. 그리고 마이크로파 오븐안의 흡착관 연결에 사용된 모든 fitting은 teflon 재질을 가공하여 사용하였다.

마이크로파의 발생원은 1500 W급 마이크로파 발생장치(2.45 GHz, Korea microwave instrument Co. Korea)를 사용하였고, 흡착 및 탈착 시간에 따른 농도변화의 곡선은 가스스크로마토그래프(GC, 14B, Shimadzu, Japan)의 열전도도검출기(TCD)를 이용하여 얻었다. 흡착실험을 수행하기 전에 흡착제는 헬륨 흐름상태에서 전기로를 이용하여 200 °C에서 1 h 전처리하여 사용하였다. 또한, 벤젠이 포화된 절연물질이 코팅된 활성탄의 세공 내에 존재하는 성분을 확인하기 위하여 마이크로파 조사에 따른 탈착성분을 분석하였다. 탈착성분 분석은 마이크로파 조사 후 최고의 탈착농도를 보이는 약 1 min 후에 Porapak Q 컬럼(1/8", 6ft, sus)을 장착한 GC에 six-port를 이용하여 on-line으로 수행하였다.

Table 1. Physical Characteristics and Amount of Benzene Adsorbed on PAC and Insulator-coated ACs Using Various Binders

Insulating materials	BET specific surface area (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)			Average pore size (Å)	Amount of benzene adsorbed (mmol/g)	
		Total	Mesopore	Micropore			
PAC	1101	0.58	0.10	0.48	10.2	18.6	
Ta ^a	PS	1070	0.56	0.10	0.47	10.2	17.0
	WG	1040	0.54	0.09	0.46	10.2	16.8
	TEOS	1010	0.54	0.09	0.45	10.2	13.6
	CS	1068	0.56	0.10	0.47	10.2	16.9
Ni-Zn ^b	PS	1055	0.54	0.08	0.46	10.2	18.4
	WG	1031	0.53	0.08	0.45	10.2	18.3
	TEOS	1002	0.52	0.09	0.43	10.5	15.9
CS	1052	0.54	0.13	0.41	10.2	18.3	

^aLoading of talc to PAC was 5 wt%.

^bLoading of Ni-Zn ferrite to PAC was 15 wt%.

3. 결과 및 고찰

3.1. 코팅활성탄의 물리적 특성

정제활성탄과 절연물질 코팅 활성탄에 대한 질소가스의 흡착실험을 수행하여, 흡착등온선과 BET 비표면적, t-plot에 의한 세공부피의 변화 및 Horvath-Kawazoe (HK) 방법에 의한 세공크기분포를 조사하였다. Figure 3에 정제활성탄과 절연물질이 코팅된 활성탄의 질소 흡착등온선을 나타내었다. 흡착등온선은 Type I의 형태로 다공성인 활성탄의 전형적인 흡착특성을 보여주었다. 그러나 상대압력(P/Po)이 낮은 부분에서 급격하게 상승하는 곡선을 보이는 것이 특징이다.

Table 1에는 절연물질 코팅활성탄의 비표면적 및 세공특성을 나타내었다. 활석과 Ni-Zn ferrite를 정제활성탄(1101 m²/g)에 코팅하면 비표면적이 978~1070 m²/g으로 변하는 것을 볼 수 있어, 코팅활성탄의 비표면적은 어떤 바인더를 사용하더라도 정제활성탄의 경우보다 약간 감소함을 알 수 있다. 대체적으로 활성탄에 다양한 바인더를 사용하여 절연물질을 코팅하더라도 비표면적에는 큰 변화가 없었지만, 활석의 경우 비표면적에 대한 서열은 PAC > Ta/PS/PAC > Ta/CS/PAC > Ta/WG/PAC > Ta/TEOS/PAC 순으로 나타났다. 그리고 Ni-Zn ferrite를 정제활성탄에 코팅한 경우의 비표면적은 활석을 코팅한 경우보다 약간 더 감소하는 경향을 보였다.

Figure 4에는 절연물질이 코팅된 정제활성탄의 세공크기분포를 나타내었다. 모든 활성탄의 세공크기 분포는 거의 유사하게 나타나서, 정제활성탄이 가지고 있는 평균세공크기는 절연물질을 활성탄에 코팅하더라도 거의 변화하지 않음을 알 수 있다. Table 1에서도 Ni-Zn/TEOS/PAC를 제외하고는 정제활성탄과 절연물질이 코팅된 활성탄 모두 평균 세공크기는 약 10.2 Å으로 나타났다.

절연물질로 사용한 활석과 Ni-Zn ferrite 자체의 비표면적은 각각 18.7 m²/g과 4 m²/g이다. 입도분석 실험을 통하여 얻은 활석과 Ni-Zn ferrite의 입자크기 분포를 Figure 5에 나타내었다. 활석과 Ni-Zn ferrite의 평균 입자크기는 각각 43.4 nm와 1442.7 nm이었다. 그리고 활석과 Ni-Zn ferrite를 코팅할 때 사용하는 바인더의 종류에 따른 비표면적의 서열은 절연물질의 종류에 관계없이 PS > CS > WG > TEOS 순으로 같았다. 그래서 절연물질의 코팅에 따른 비표면적의 감소는 바인더의 세공내부로의 침투에 따른 영향에 의한 것으로 생각할 수 있다. 물론 절연물질의 활성탄 외부표면 입구로의 침투에 의한 영향도 무시할 수는 없을 것이다. 또 활석을 코팅하는 경우보다 Ni-Zn ferrite를 코팅하

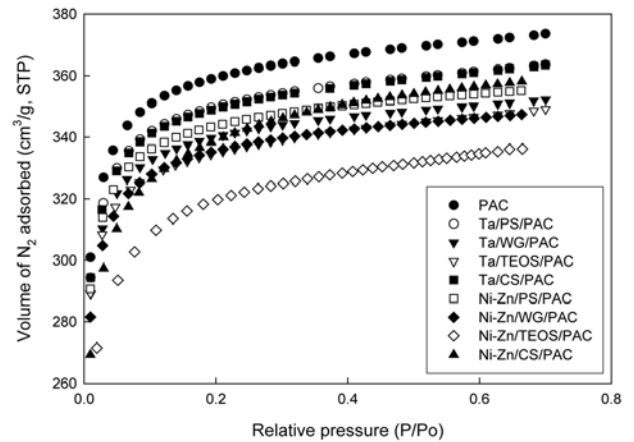


Figure 3. Adsorption isotherms of insulator-coated ACs (N₂, 77K).

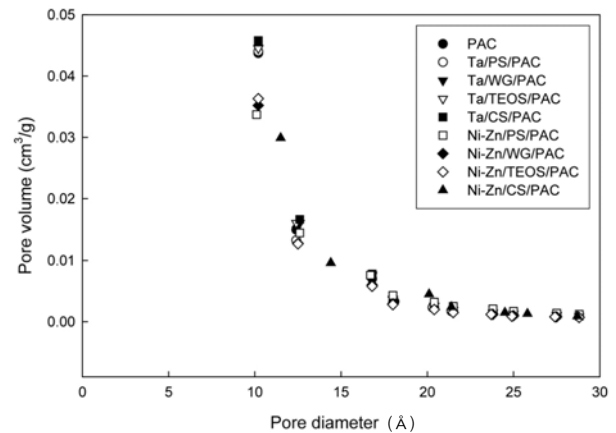


Figure 4. Pore size distributions of insulator-coated ACs (by HK method).

면 활성탄의 비표면적이 약간 더 감소하는 것은, Ni-Zn ferrite 자체의 비표면적이 활석 자체의 비표면적보다 작아서 미세하나마 활석 코팅 활성탄의 비표면적이 크게 나타난다고 생각된다.

Figure 6에는 절연물질이 코팅된 활성탄의 SEM 이미지를 나타내었다. 질소가스 흡착량 측정 결과에서 비표면적은 활석이 코팅된 활성

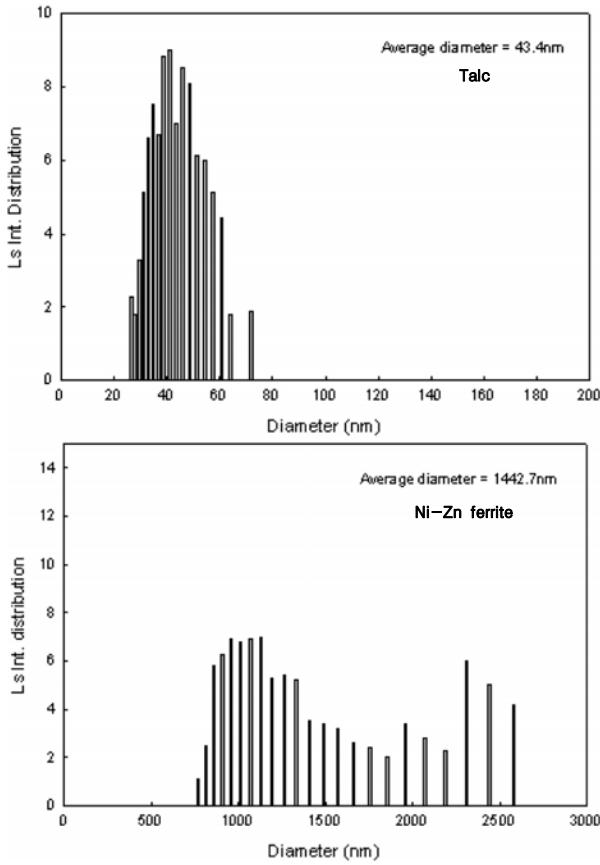


Figure 5. Particle size distribution of talc and Ni-Zn ferrite.

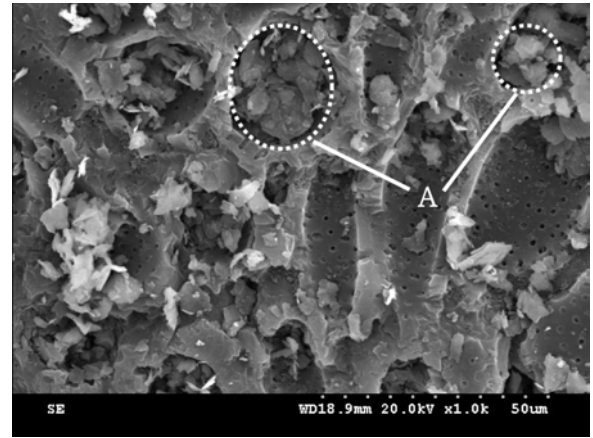
탄이 Ni-Zn ferrite가 코팅된 활성탄보다 약간 크게 나타났다. 활성탄 입자는 평균입자크기가 43.4 nm로 비교적 작아서 세공입구(Figure 5의 A 영역)에 코팅되어 있으나 틈새가 존재하고, Ni-Zn ferrite 입자는 커서 활성탄의 세공입구 또는 외부표면(Figure 5의 B 영역)에 응집상태로 코팅되어 있음을 SEM 이미지로부터 알 수 있다. 그래서 본 연구에서 무기물 바인더를 사용하여 절연물질을 활성탄 표면에 코팅하게 되면 단순히 물리적으로 코팅되어 있고, 바인더의 종류에 따라 세공특성에 영향을 미침을 알 수 있었다.

한편, 마이크로파 조사에 따른 불꽃방전 여부의 실험에서는 헬륨이 흐르는 분위기에서 700 W의 마이크로파를 30 min 동안 조사하면서 어두운 환경에서 육안으로 확인하였다. 제조된 절연물질이 코팅된 활성탄은 절연물질 또는 바인더에 의해 비표면적 및 세공부피는 약간 감소하였지만, 마이크로파에 의한 불꽃방전은 감지할 수 없었다.

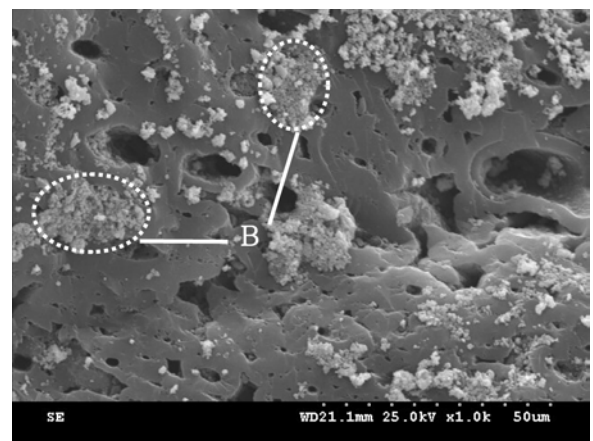
3.2. 흡착특성

Figure 7에 정제활성탄과 절연물질이 코팅된 활성탄의 벤젠에 대한 파과곡선을 나타내었다. 정제활성탄이 가지고 있는 벤젠에 대한 파과곡선은 초기 18 min에서 파과가 일어나서 약 24 min에서 포화에 도달하였다. 절연물질이 코팅된 활성탄의 파과시간은 활성탄과 Ni-Zn ferrite에 대하여 각각 정제활성탄 보다 3~4 min과 2~6 min 빨라짐을 보였다. 이것은 바인더와 절연물질이 코팅됨으로써 활성탄의 비표면적 및 세공부피가 감소함에 따라 파과가 빨리 일어나는 것으로 생각할 수 있다.

다양한 바인더를 이용하여 절연물질을 코팅한 활성탄의 벤젠에 대



(a) Talc



(b) Ni-Zn ferrite

Figure 6. SEM images of ACs coated with talc and Ni-Zn ferrite (Binder; PS).

한 흡착량을 Table 1에 나타내었다. 정제활성탄에 활성탄과 Ni-Zn ferrite를 코팅할 때 사용하는 바인더로 TEOS를 사용하면 흡착량이 크게 감소하지만, PS를 사용하게 되면 벤젠에 대한 흡착량이 최대를 보여 그들의 비표면적에 비례하는 결과를 보여주었다. 그리고 바인더를 사용하여 절연물질을 코팅한 활성탄의 벤젠 흡착량은 13.6~18.4 mmol/g의 범위로 얻어졌다. 이 값들은 정제활성탄의 흡착량(18.6 mmol/g)보다 전체적으로 약간 감소함을 보였는데, Ni-Zn ferrite를 PS, WG 또는 CS를 바인더로 사용하여 코팅하면 거의 같은 값이었고, Ta/TEOS/PAC가 가장 적었다. 그러나 Table 1을 보면 활성탄이 코팅된 활성탄의 비표면적이나 세공부피가 Ni-Zn ferrite를 코팅한 활성탄보다 더 큰 값을 보였지만, 흡착량에서는 Ni-Zn ferrite가 코팅된 활성탄이 오히려 더 큰 값을 보였다. 이것은 활성탄의 입자크기(43.4 nm)가 Ni-Zn ferrite의 입자크기(1442.7 nm)보다 작아 벤젠이 흡착할 수 있는 흡착점을 다소 감소시켜 활성탄이 코팅된 활성탄의 흡착량이 감소된 것으로 생각된다.

Table 2에 PS를 바인더로 사용하여 Ni-Zn ferrite를 코팅하였을 경우 절연물질의 양에 따른 물리적 특성과 파과곡선으로부터 얻은 벤젠의 흡착량을 나타내었다. 정제활성탄에 PS만을 코팅하게 되면 정제활성탄과 거의 같은 물리적 특성과 흡착량을 보이고 있어 PS는 흡착량에 영향을 주지 않는 것으로 확인되었다. Ni-Zn ferrite를 활성탄에 대하여 10 wt% 되게 코팅한 활성탄의 비표면적과 세공부피는 약간 감

Table 2. Effects of Ni-Zn Ferrite Loadings on Physical Properties and Amount of Benzene Adsorbed on Activated Carbons Coated with Ni-Zn Ferrite Using Potassium Silicate as a Binder

Amount of Ni-Zn ferrite (wt%)	BET specific surface area (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)			Average pore size (Å)	Amount of benzene adsorbed (mmol/g)
		Total	Mesopore	Micropore		
0 (PS/PAC)	1097	0.57	0.10	0.47	10.2	18.6
10	1058	0.54	0.07	0.47	10.2	18.4
15	1055	0.54	0.08	0.46	10.2	18.4
20	1027	0.52	0.07	0.45	10.2	17.1

Table 3. Physical Properties of Insulator-coated ACs After Microwave Irradiation

Output power (W)	BET specific surface area (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)			Average pore size (Å)	
		Total	Mesopore	Micropore		
-	1070	0.56	0.10	0.47	10.2	
100	1068	0.55	0.08	0.47	10.2	
200	1028	0.54	0.09	0.45	10.2	
Ta/PS/PAC	300	1121	0.58	0.09	0.49	10.1
400	1044	0.54	0.09	0.45	10.2	
500	1101	0.57	0.09	0.48	10.2	
500*	1027	0.54	0.09	0.45	10.2	
-	1055	0.54	0.08	0.46	10.2	
100	1169	0.59	0.13	0.46	10.2	
200	1176	0.60	0.14	0.46	10.2	
Ni-Zn/PS/PAC	300	1183	0.60	0.14	0.46	10.2
400	1177	0.60	0.14	0.46	10.2	
500	1192	0.61	0.14	0.47	10.2	
500*	1191	0.61	0.14	0.47	10.2	

*After repeated experiments of adsorption-desorption five times at 500 W.

소하였고 흡착량은 정제활성탄과 거의 같았으나, 마이크로파에 의한 불꽃방전을 일으키는 결과를 낳았다. 15 wt%의 코팅량부터는 불꽃방전을 억제할 수 있었고, 벤젠의 흡착량도 정제활성탄의 흡착량과 거의 같은 값을 보여 활성탄에 PS를 사용하여 Ni-Zn ferrite를 15 wt% 정도 되게 코팅하면 흡착성능은 유지하면서 불꽃방전을 방지할 수 있는 흡착제가 제조될 수 있음을 알 수 있었다.

Figure 8에 활성과 Ni-Zn ferrite가 코팅된 활성탄의 비표면적과 벤젠에 대한 흡착량의 관계(Table 1)를 나타내었다. Ni-Zn ferrite의 코팅량 변화에 따른 결과도(Table 2) 같이 나타내었다. 절연물질이 코팅된 활성탄의 비표면적과 세공부피가 증가할수록 벤젠에 대한 흡착량은 증가하였다. 다시 말해서 활성탄이 가지고 있는 물리적 특성과 비례하는 결과를 보여 벤젠의 흡착량은 활성탄 표면에 단순히 물리흡착에 의해 결정됨을 알 수 있다. 정제활성탄은 비표면적과 세공부피가 최대의 값을 보여 벤젠에 대한 흡착량이 최대를 보였고, 대체적으로 절연물질을 코팅하게 되면 비표면적과 세공부피가 감소하여 벤젠에 대한 흡착량도 약간 감소하였다.

3.3. 탈착특성

절연물질이 코팅된 활성탄 흡착층에 벤젠을 흡착시키고 난 후 마이크로파 출력을 100~500 W로 변화시키면서 출력에 따른 물리적 특성 변화를 조사하였다. Table 3에 PS를 사용하여 코팅한 활성탄에 마이

크로파를 조사한 후, 그들의 물리적 특성의 변화를 나타내었다. 활성과를 코팅한 경우 마이크로파 조사에 따른 세공부피와 비표면적은 크게 변화하지 않았으며, 평균 세공크기의 변화도 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 Ni-Zn ferrite의 경우에는 마이크로파의 출력이 증가함에 따라 비표면적이 약간 증가함을 볼 수 있다. 특히, 500 W에서 5회 흡착-탈착실험을 반복하여도 그 흡착제의 물리적 특성은 크게 변화하지 않아 반복 사용이 가능함을 보여주고 있다.

벤젠흡착을 수행하여 과과곡선을 얻은 다음, 유입되는 벤젠을 차단하고 흡착층에 순수한 헬륨을 통과시켜 TCD signal이 일정하게 될 때까지 완전히 purge하고 나서 마이크로파 조사에 의해 탈착되는 벤젠의 비가역적 탈착량을 측정하였다. 벤젠에 대하여 흡착력이 가장 우수한 PS를 바인더로 사용한 절연물질 코팅활성탄에 대하여 마이크로파 출력을 100~500 W로 변화하면서 벤젠의 탈착량을 조사하여 Figure 9에 나타내었다. 이때 마이크로파는 30 min 동안 조사하였다. 탈착율은 각 활성탄의 흡착량에 대한 탈착량의 비로 나타난 것이다. 마이크로파 출력이 300 W부터 탈착율이 거의 일정해지는 것을 볼 수 있다. 이 결과 순간 가열하는 마이크로파의 특성으로 인해 탈착량이 순간 많아지는 것을 알 수 있었고, 마이크로파 출력과 탈착량의 관계는 비례함을 보였다. 그리고 Ni-Zn ferrite 코팅활성탄의 탈착율이 활성과 코팅활성탄의 탈착율보다 크게 나타났는데, 이것은 활성과 Ni-Zn ferrite 자체의 유전율(ϵ , dielectric constant)은 각각 약 6~8과 12로,

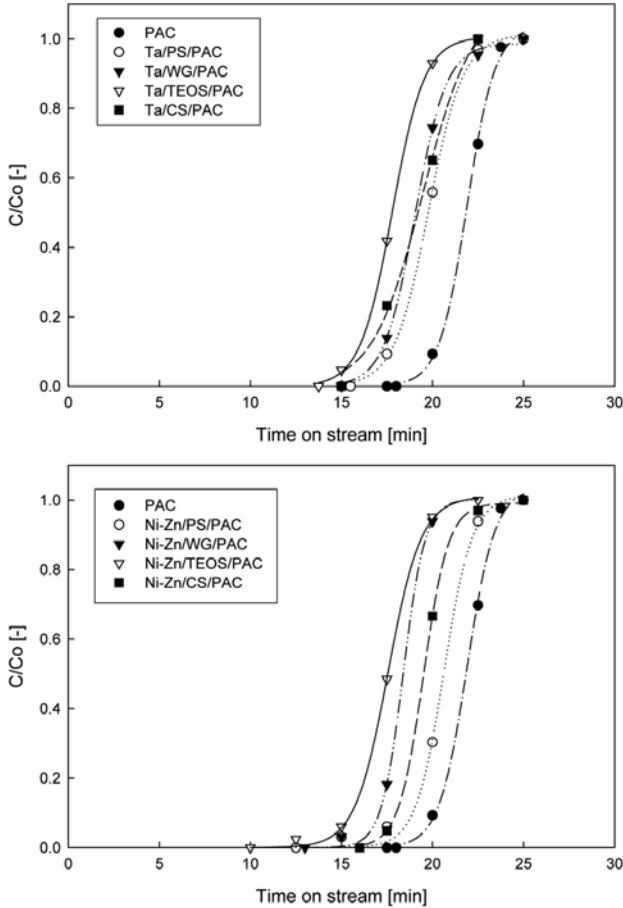


Figure 7. Breakthrough curves of insulator-coated ACs.

Ni-Zn ferrite의 유전율이 활석보다 크기 때문에 가열효과의 차이인 것으로 생각되었다.

특이하게 Ni-Zn ferrite의 경우, 탈착율이 100% 이상으로 나타나서 흡착된 양보다 탈착된 양이 더 많아지는 현상을 볼 수 있다. 이것은 벤젠을 흡착시키기 전에 수행한 전처리과정에서 탈착되지 않은 수분이나 불순물이 마이크로파에 의해서 탈착되는 것으로 생각되었다. 그래서 흡착제가 벤젠으로 포화된 후 마이크로파를 조사하여 탈착되는 성분을 분석한 결과 벤젠 이외에 수분이 탈착됨을 알 수 있었고, 이것은 흡착실험 전 전처리조건(200 °C)에서 제거되지 않은 수분이 탈착된 것으로 판단된다. 이와 같이 탈착량이 흡착량보다 많은 이유를 설명할 수 있고, 이러한 이유로 마이크로파에 의한 전처리 효과로 인하여 벤젠의 흡착성능 향상도 기대할 수 있다.

3.4. 흡착-탈착 재현성

제조된 절연물질이 코팅된 활성탄의 마이크로파에 의한 재현성, 즉 벤젠의 흡착과정과 탈착과정의 반복 수행에 따른 흡착량과 탈착량을 검토하였다. 벤젠을 흡착시킨 다음, 마이크로파 출력을 500 W로 고정하고 흡착과 탈착의 반복횟수에 따른 흡착량과 탈착율의 변화를 조사하여 Figure 10에 나타내었다. 흡착과 탈착 반복실험은 5회 수행하였고, 탈착율은 각 실험에서 흡착한 양에 대한 탈착량의 비로 얻었다. 흡착과 탈착과정이 5회 연속적으로 반복되어도 벤젠의 흡착량과 탈착율은 거의 일정하였다. 탈착율에 있어서는 Ni-Zn ferrite의 경우는 첫 번째만 탈착율이 100% 이상이 되고 그 후부터는 거의 100%로 일정

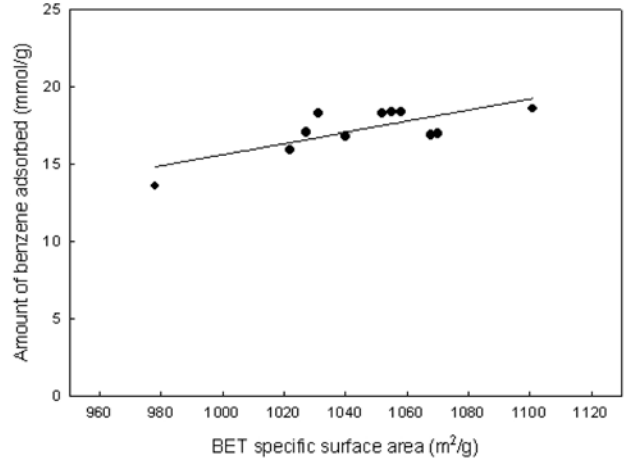


Figure 8. Relationship between the amounts of benzene adsorbed on ACs coated with talc and Ni-Zn ferrite using various binders and their BET surface areas.

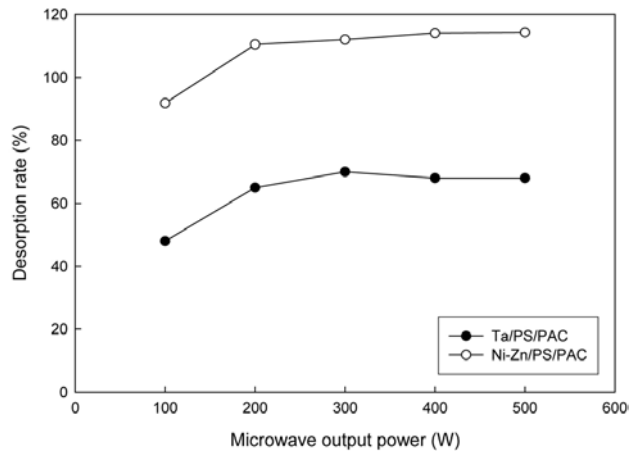


Figure 9. Effect of microwave output power on desorption rates.

하였고, 활석의 경우 탈착율은 약 68%로 일정한 값을 유지하고 있었다. 탈착율은 30 min 동안의 마이크로파 조사시간에서 얻은 값이다. Ni-Zn ferrite 코팅활성탄은 30 min 동안 조사하면 탈착이 빠르게 일어나서 TCD signal이 base line까지 떨어져 일정하게 되었다. 활석 코팅 활성탄의 경우는 30 min 후에도 탈착이 계속 진행되어 30 min 조사시간에서 탈착율을 얻었기 때문에 약 68% 정도로 일정하게 얻어졌다. 그러나 다음의 재흡착 실험은 TCD signal이 base line으로 완전히 떨어지는 시간까지 마이크로파를 조사한 후 수행하였다. 두 절연물질에 대한 탈착율의 차이는 앞에서 언급한 바와 같이 활석과 Ni-Zn ferrite가 가지고 있는 유전율의 차이라고 생각된다.

4. 결 론

휘발성 유기화합물로 포화된 활성탄을 재생하는 방법으로 마이크로파를 적용하였다. 활성탄 자체는 도전성이어서 마이크로파에 의해 전류가 흘러 불꽃방전을 일으키므로 이것을 방지하기 위하여 활성탄에 절연물질을 코팅하는 방법을 조사하였다. 무기물 바인더를 이용하여 절연물질인 활석과 Ni-Zn ferrite를 각각 코팅한 활성탄의 물성 조사 결과 단순히 물리적으로 코팅되었음을 확인하였고, potassium

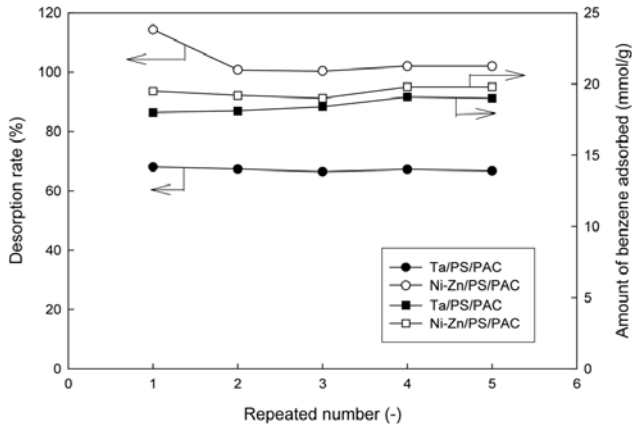


Figure 10. Reproducibility with continuous repetition of adsorption-desorption operations.

silicat를 바인더로 사용하여 절연물질을 코팅한 활성탄이 비표면적, 세공부피 등과 같은 물리적 특성이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 마이크로파에 의한 불꽃방전도 억제할 수 있었다. 활석과 Ni-Zn ferrite와 같은 절연물질을 코팅한 활성탄의 벤젠에 대한 흡착성능은 potassium silicate를 바인더로 이용한 경우가 가장 우수하였고, 비표면적에 비례하는 경향을 보였다. 또한, 절연물질이 코팅된 활성탄의 벤젠에 대한 흡착량은 정제활성탄에 비해 약간 감소하였다. 마이크로파 출력을 변화하면서 탈착실험을 수행한 결과, 활성탄의 물성에는 거의 변화가 없었으며, 마이크로파 출력과 탈착율은 비례관계를 나타내었다. 또한, 마이크로파를 이용하면 흡착제의 전처리 효과도 기대할 수 있었으며, 휘발성 유기화합물로 오염된 폐활성탄의 재생방법으로서 마이크로파의 적용 가능성을 제시할 수 있었다.

감사의 글

본 연구과제는 환경부지정 전남지역환경기술개발센터의 연구비지원에 의해 2006년도에 수행한 연구과제입니다.

참고 문헌

1. H.-S. Kim, Y.-S. Park, and B.-M. Min, *J. of KSEE*, **23**, 1979 (2001).
2. C. L. Chuang, P. C. Chiang, and E. E. Chang, *Chemosphere*, **53**, 17 (2003).
3. W. Jin and S. Zhu, *Chem. Eng. Technol.*, **23**, 151 (2000).
4. S.-W. Kang, S.-S. Suh, and B.-H. Min, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **17**, 201 (2006).
5. P. Di. and D. P. Y. Chang, *Air & Waste Management Association*, 89th Annual Conference and Exhibition, Nashville, Tennessee, USA, June 23-28, 96-RA106.02 (1996).
6. P. S. Schmidt and J. R. Fair, *Waste Management*, **14**, 3 (1994).
7. F. Delage, P. Pre, and P. I. Cloirec, *J. Environ. Eng.*, **125**, 1160 (1999).
8. C. O. Ania, J. A. Menendez, J. B. Parra, and J. J. Pis, *Carbon*, **42**, 1383 (2004).
9. K.-J. Kim, C.-S. Kang, Y.-J. You, M.-C. Chung, M.-W. Woo, W.-J. Jeong, and H.-G. Ahn, *Catal. Today*, **111**, 223 (2006).
10. 小林悟, 烏・幸弘, 長野義信, *環境管理*, **40**, 31 (2004).