

활성탄을 이용한 산업체 악취물질의 열적 흡탈착 연구

김주연 · 이영우* · 한문희*,†

충남대학교 바이오응용화학과
305-764 대전시 유성구 대학로 99번지
*충남대학교 녹색에너지기술전문대학원
305-764 대전시 유성구 대학로 99번지
(2011년 11월 22일 접수, 2012년 1월 25일 채택)

A Study on the Thermal Adsorption and Desorption Characteristics of Industrial Odorants using Activated Carbon

Joo Yeon Kim, Young Woo Rhee* and Mun Hee Han*,†

Department of Applied Chemistry and Biological Engineering, Chungnam National University,
99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

*Graduate School of Green Energy Technology, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea
(Received 22 November 2011; accepted 25 January 2012)

요 약

활성탄을 이용한 산업체 악취물질 제거 특성을 규명하기 위하여 일반적으로 사용되는 상업용 활성탄의 탈착반응 특성을 조사하였다. 활성탄의 물리·화학적 특성을 조사하기 위해 BET 비표면적을 분석하였으며, 활성탄의 흡착력을 평가하기 위해 요오드가를 측정하였다. 활성탄에 흡착된 악취물질의 탈착반응특성 평가를 위해 열중량분석기(Thermogravimetric Analyzer; TGA)를 사용하였다. 활성탄의 흡·탈착에 따른 반응특성을 알아보기 위해 Friedman 법과 Freeman-Carroll 법을 이용하여 활성화에너지와 반응차수를 계산하였다. 활성탄은 신탄일 때 보다 재생탄일 때 흡착능력이 현저히 떨어졌으며, Friedman 법을 이용하여 활성화 에너지를 계산한 결과 15.9~23.4 kJ/mol, Freeman-Carroll 법을 이용하여 계산한 결과 22.7~33.8 kJ/mol로 나타났다.

Abstract – Desorption reaction characteristics of the commercial activated carbons which were used for the removal of industrial odorants were investigated. BET specific surface area was analyzed to investigate the chemisorption property of activated carbon. Adsorptivity of activated carbon was estimated by iodine number. Thermogravimetric analyzer (TGA) was used to investigate the desorption characteristics. Activation energies and reaction orders for reaction characteristics according to adsorption and desorption of activated carbons were estimated by employing the Friedman method and Freeman-Carroll method. Adsorptivity of reprocessed activated carbons were significantly lower than that of fresh activated carbons. In this study, it was found that the activation energies were 15.9~23.4 kJ/mol in Friedman method and 22.7~33.8 kJ/mol in Freeman-Carroll method.

Key words: Activated Carbon, Adsorption Characteristics, Desorption Characteristics, Kinetic Study

1. 서 론

산업의 발달과 더불어 에너지의 사용이 증대되고 이에 따라 수반되는 환경문제는 한 국가의 문제가 아니고 범지구적인 문제로서의 관심과 인식이 증대되고 있지만 관련기술개발의 부진과 시설투자의 부족으로 환경오염은 날로 심각해지고 있다. 다양한 유형의 환경오염 중 대기오염은 산업화의 유산으로 각종 산업의 발달, 교통수단의 계속적인 증대, 도시의 인구 집중화에 기인하며 광화학 스모그,

산성비, 미세한 부유먼지와 오존층의 파괴 등의 심각한 형태로 나타나고 있다. 국내에는 오창, 구미, 시화·반월 산업 등 여러 산업이 있으며 대부분의 산업에서 산업단지와 주거단지가 함께 조성되어 있어 산업에서 야기되는 대기오염이 산업 근로자 뿐만 아니라 지역 주민에게까지 직접 영향을 미쳐 산업에서 발생하는 대기오염물질의 방지가 시급한 실정이다.

산업 내에서는 대기오염 방지를 위해 배출 특성에 따라 다양한 형태의 악취 방지시설이 설치 운용되고 있으며, 대표적인 악취 방지시설은 연소법, 흡수법, 흡착법 및 생물 탈취법으로 분류된다[1]. 그 중에서도 흡착법을 사용하는 활성탄 흡착탑은 교환식 흡착장치로서 장치비가 저렴하고, 장치가 비교적 소형이며 운전조작이 간단

† To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mhhan@cnu.ac.kr

*이 논문은 서울과학기술대학교 손재익 교수의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

하다는 장점이 있어 저농도 가스처리에 많이 이용되고 있다. 그러나 활성탄의 교환주기를 적절하게 맞춰주지 않을 경우 악취를 제거하는 효과가 떨어진다는 단점이 있으며, 사용하는 활성탄의 종류와 특성에 따라 악취 제거 효율의 현저한 차이가 발생한다. 최근 악취 방지법이 발효되면서 현재 악취 방지 시설투자가 상당수 진행되고 있으며, 이 중 활성탄 흡착탑이 많은 부분을 차지하고 있다. 활성탄 흡착탑을 사용할 경우, 활성탄이 악취물질을 흡착하면서 성능이 감소하게 되며 따라서 일정한 주기로 신탄 또는 재생탄으로 교체하는 것이 필요하다. 이때 발생하는 폐활성탄은 활성탄 공급 위탁 업체에 수거되고 대부분 단순 소각 처리되어 재생탄으로 사용되고 있다. 이때 활성탄에는 최고 20~50 wt%의 악취물질이 흡착되어있기 때문에 효율적인 활성탄 흡착탑 가동을 위하여 활성탄을 이용한 산업체 악취물질 제거 특성을 규명하는 것이 필요하다[2,3].

본 연구에서는 활성탄의 구조와 특성을 파악하기 위해 BET와 요오드가를 분석하였으며, TGA (Thermogravimetric analyzer)를 통해 활성탄에 흡착된 악취물질의 탈착특성을 분석하였다. 이를 바탕으로 전환율에 따른 활성화 에너지를 알아보기 위해 Friedman 법을, 전체 반응의 활성화 에너지와 반응차수를 조사하기 위해 Freeman-Carroll 법을 이용하여 악취물질의 반응특성을 분석하였다.

2. 실험

흡착제로는 실제 산업현장에 사용되고 있는 상업용 활성탄을 사용하였다. 톨루엔을 주 용제로 사용하는 업체에서 배출되는 악취물질의 제거특성을 규명하기 위하여, 악취물질을 상업용 활성탄에 흡착시켰으며 흡착능력이 떨어지는 336시간(2주) 후에 활성탄을 수거하여 활성탄에 흡착된 악취 물질을 탈착시키고 활성탄의 특성 변화를 조사하였다. 활성탄에 흡착된 악취 물질을 탈착한 후 활성탄은 재생탄으로 다시 사용하게 되는데, 이렇게 발생한 재생탄은 신탄과 같은 방법으로 톨루엔을 주 용제로 사용하는 업체에서 배출되는 악취물질을 2주 동안 흡착시키고 다시 탈착시켜 신탄과 재생탄의 탈착특성 변화를 알아보려고 본 실험을 수행하였다.

Table 1은 실험에 사용된 활성탄의 BET 비표면적(S_{BET}), 총 세공 부피(V_m), 평균세공직경(R)을 나타낸 것이다. 질소가스를 사용하여 측정된 BET 비표면적은 $1,000 \text{ m}^2/\text{g}$ 이상으로 매우 크고, 총 세공 부피에 대한 미세공부피(8~20Å)의 비율이 높았다.

활성탄의 흡·탈착 횟수에 따른 열중량 변화 특성을 알아보기 위해 TA instruments사의 TGA-2050을 사용하였다. TGA는 온도 변화에 따른 유기물질의 무게변화를 측정하여 분석하는 열중량 측정 장치이다. TGA를 이용한 활성탄의 속도론적 연구는 가열에 의한 시료의 무게변화를 관찰함으로써 속도상수들을 손쉽게 구할 수 있다는 간편함 뿐만 아니라 물질의 특성과 약 등 가열을 통한 여러 현상을 이해하기 위한 수단으로써 많이 사용되어 왔다[4].

Table 1. BET specific surface area and total pore volume of the industrial activated carbon

Adsorbent	Grade	$S_{BET}^a (\text{m}^2/\text{g})$	$V_m^b (\text{cm}^3/\text{g})$	$R^c (\text{\AA})$
Pellet	Fresh activated carbon	1,298	0.59	18.3

^aBET specific surface area.

^bTotal pore volume.

^cAverage pore diameter.

평균 70~80 mg의 활성탄을 이용하여 분당 50 ml의 질소를 흘려주면서 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 의 승온속도로 240°C 까지 승온시킨 후, 240°C 의 등온상태에서 100분 동안 실험하였다. 또한, 승온속도의 변화에 따른 탈착특성을 알아보기 위해 5, $20^\circ\text{C}/\text{min}$ 의 승온속도에 대한 실험도 수행하였다.

활성탄의 흡착력은 활성탄의 흡착성능을 나타내는 지표로 널리 사용되고 있는 요오드가를 이용하였으며, 한국산업표준규격(KS M 1802)에 의한 요오드 흡착능 시험으로부터 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 신탄 및 재생탄의 흡·탈착특성을 나타낸 그래프이다. 활성탄은 신탄일 때는 거의 감량 변화가 없었지만 흡·탈착의 횟수가 거듭함에 따라 성능이 현저히 떨어진다는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2에 활성탄의 탈착량을 나타내었다. 신탄일 때는 가열후에도 2 wt%의 감량으로 온도에 따른 중량변화가 거의 나타나지 않아 불순물이 포함되지 않은 순도높은 활성탄이라는 것을 알 수 있었다. 톨루엔을 유기용제로 사용하는 업체에서 배출되는 악취물질을 신탄에 2주 동안 흡착시킨 후 TGA 탈착실험으로 확인한 결과, 약 25 wt%의 유기물질이 흡착되었다. 이를 240°C 조건에서 한번 탈착시킨 후 TGA 실험을 수행한 결과, 활성탄에 흡착되었던 유기물이 90%만 탈착되었고 이로 인해 활성탄의 성능이 신탄일 때 보다 10%감소된다는 것을 알 수 있었다. 재생사용에 따른 활성탄의 성능저하는 활성탄의 교체주기를 단축시키는 결과를 초래하며 지속적인 반복사용에 따라 궁극적으로는 신탄으로의 완전교환이 필요하게 될 것이다.

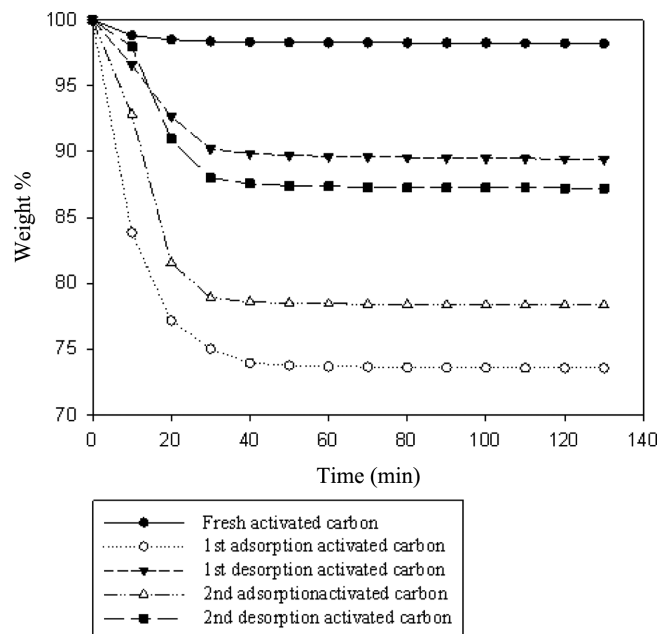


Fig. 1. Desorption characteristics of activated carbons at 240°C with heating rate of $10^\circ\text{C}/\text{min}$.

Table 2. Amount of adsorption and desorption of activated carbon

	Fresh activated carbon	Reprocessed activated carbon
Amount of adsorption (wt%)	25	11
Amount of desorption (wt%)	16	9

Table 3. Iodine values of activated carbon

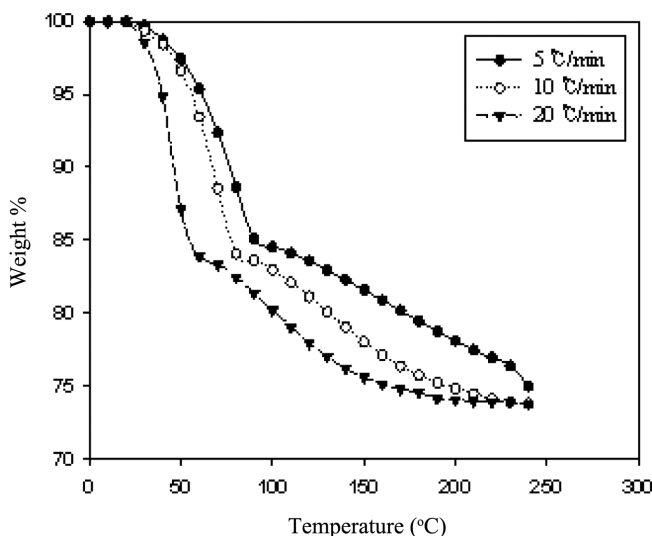
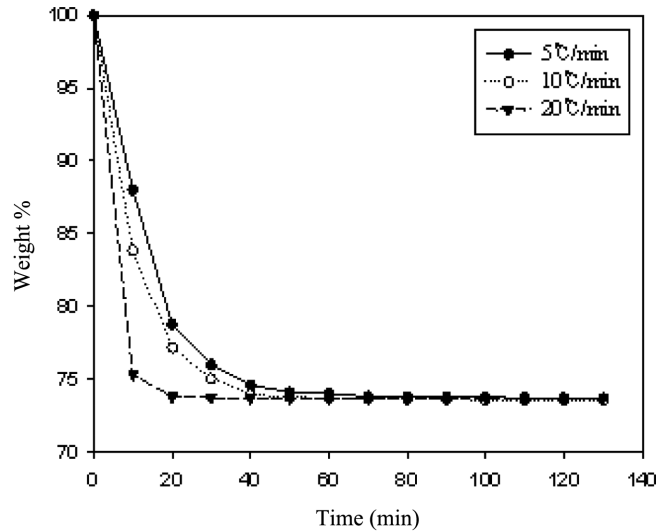
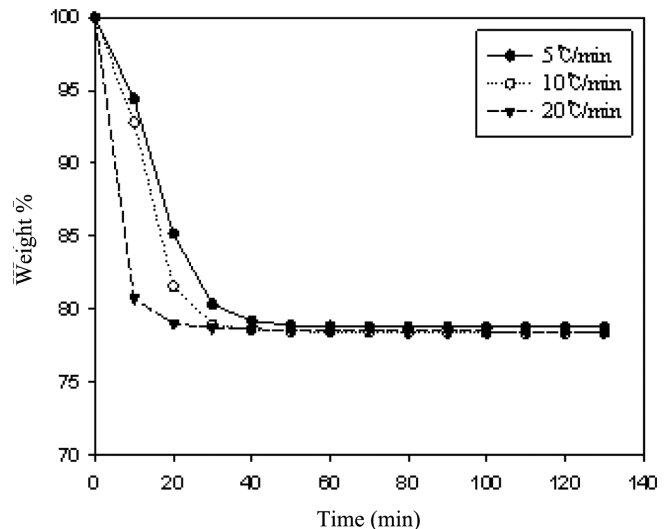
	Fresh activated carbon	1st desorption	2nd desorption
Iodine value (mg/g)	1,050	850	790

그러나 구체적인 교환시기는 공정의 운전상황과 사용업체의 경제적 여유와 관련이 있으므로 본 논문에서는 논외로 한다. 또한 재생탄의 흡·탈착 특성을 분석하기 위해 2차 흡·탈착에 따른 열중량변화를 분석한 결과 약 11 wt%의 유기물질이 흡착되어 1차 흡착에 비해 44%의 현저히 낮은 흡착력을 보였다.

Table 3은 활성탄의 흡·탈착에 따른 요오드가 변화를 나타낸 것이다. 요오드기는 활성탄의 흡착능을 측정하는 방법으로 세공이 많이 발달한 경우 요오드 흡착력이 높고 피흡착제를 흡착할 수 있는 능력이 크다. 입상활성탄 공업규격(KSM 1421-1993)에 따르면 요오드가 1,000 이상일 때 활성탄 흡착능력이 우수한 활성탄으로 분류되며, 본 실험에 사용된 활성탄은 요오드가 1,050으로 흡착능력이 우수함을 알 수 있다. 실험에 악취물질을 흡착시키고 탈착시킨 후 활성탄의 요오드가를 측정한 결과 850으로 흡착능력이 떨어졌으며, 2차 탈착 후에는 790으로 흡·탈착이 반복될수록 활성탄의 흡착능력이 감소함을 볼 수 있었다.

Fig. 2와 3에 1차 흡착 후 활성탄의 승온속도별 탈착그래프를 시간과 온도에 따라 나타내었다. 승온속도가 20 °C/min인 경우에 실험시작 후 약 20분 만에 악취물질이 탈착되었으며 10 °C/min인 경우에는 40분, 5 °C/min인 경우에는 60분 만에 악취물질의 탈착이 완료되었다. 승온속도가 높아질수록 온도에 따른 감량 그래프의 기울기가 가파르게 나타나는 것으로 보아, 높은 승온속도에서 탈착반응이 빠르게 진행되는 것을 알 수 있었다. 실제 저온탈착공정에서는 열풍에 의해 일정한 온도(170 °C 내외)로 유지되는 가열로에 활성탄이 컨베이어 위에 놓인 상태로 지나가면서 탈착되는 과정을 거치므로 가열속도를 결정하기 어렵고 본 논문에서 시도한 5~20 °C/min의 일정한 가열속도로 탈착되는 상태와는 다르다고 볼 수 있다.

Fig. 4에 2차 흡착 후 활성탄의 승온속도별 탈착그래프를 나타내었다. 승온속도가 20 °C/min인 경우에 실험시작 후 20분 만에 악취


Fig. 2. Effect of heating rate on desorption for temperature (1st adsorption).

Fig. 3. Effect of heating rate on desorption for time (1st adsorption).

Fig. 4. Effect of heating rate on desorption for time (2nd adsorption).

물질이 탈착되었으며, 10 °C/min일 때 30분, 5 °C/min 일 때는 45분 만에 탈착이 완료되었다. 활성탄의 1차 흡착과 2차 흡착의 탈착그래프와 탈착 시간이 다르게 나타나는 것은 1차 흡착 후 탈착을 하여 재생탄으로 사용하게 되면 활성탄의 흡착능력이 낮아져 악취물질 흡착량이 감소하였기 때문으로 판단된다.

Fig. 3과 4로부터 활성탄에 흡착된 악취물질의 반응특성을 알아보기 위해 전환율을 식 (1)로 정의하였다.

$$X = \frac{\text{Amount of desorption (wt\%)}}{\text{Final amount of desorption (wt\%)}} \quad (1)$$

반응을 간단한 n차 반응으로 가정하면 다음과 같은 반응속도식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dX}{dt} = k(1-X)^n \quad (2)$$

여기에서 X는 전환율, k는 반응속도상수, n은 반응차수이다. 반응

속도상수 k 는 Arrhenius식에 의해 나타내면 식 (3)과 같다.

$$k(T) = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)을 통해 식 (4)가 얻어진다.

$$\frac{dX}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (1-X)^n \quad (4)$$

식 (4)에 가열속도(β)를 연관시켜 로그를 취하면 식 (5)와 같은 Friedman 식을 얻을 수 있다.

$$\ln\left(\frac{dX}{dt}\right) = \ln\left[\beta \frac{dX}{dT}\right] = \ln A + n \ln(1-X) - \frac{E}{RT} \quad (5)$$

Friedman 법은 여러 가열 속도에서의 실험값을 이용하여 임의의 전환율에 따른 kinetic 값을 통해 쉽게 활성화에너지를 구할 수 있다는 장점 때문에 미분법 중 가장 많이 쓰이는 방법이다. 그러나, Friedman 법은 비등온상태에서 활성화에너지를 구하는 방법이기 때문에 실험에서 온도가 최종온도 240 °C에 도달한 후 발생하는 반응에 대해서는 활성화에너지를 구하기 어렵다. 따라서 Friedman 법을 이용하여 최종온도 이전의 전환율에 대한 활성화에너지를 구하였다. $n=1$ 로 가정하고 Fig. 3에 나타난 A 사의 승온속도에 따른 탈착특성 데이터를 바탕으로 Friedman 법을 사용하여 $\ln\left(\frac{dX}{dt}\right)$ 와 $\frac{1}{T}$ 의 관계를 Fig. 5에 도시하였다.

Friedman 법의 경우 열분해 반응을 1차로 가정하므로, 반응차수가 1을 크게 벗어나는 경우에는 오차를 수반하게 된다. 따라서 Fig. 5에서 Friedman 법을 이용한 그래프가 전환율에 따라 차이를 보이는 것은, 본 실험이 등온상태로 진행되었고 반응차수가 1보다 클 때 생기는 한계성 때문이라고 판단된다.

이러한 Friedman 법의 단점을 보완하기 위하여 Freeman-Carroll 법을 사용하였다. Freeman-Carroll 법 역시 미분법으로 단일가열속도의 실험결과를 토대로 활성화 에너지와 반응차수를 구할 수 있다. 식 (4)를 (6)과 같이 나타내면 Freeman-Carroll 법이 된다[4-8].

$$\Delta \ln \frac{dX}{dt} = n \Delta \ln(1-X) - \frac{E}{R} \Delta \left(\frac{1}{T}\right) \quad (6)$$

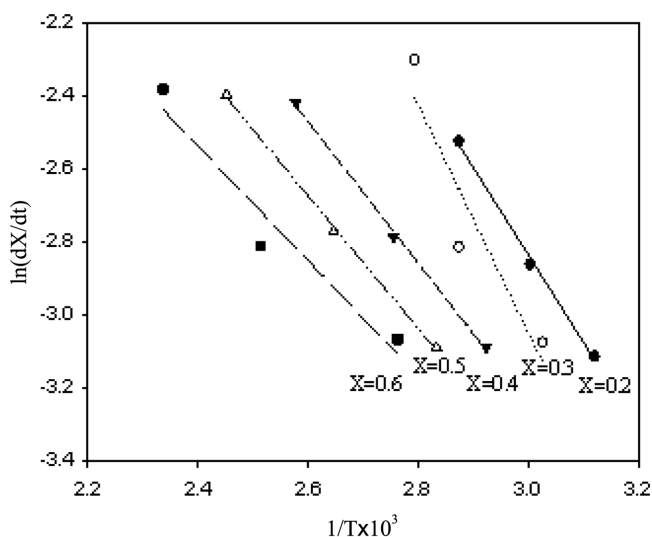


Fig. 5. Kinetic analysis by the Friedman method (1st adsorption).

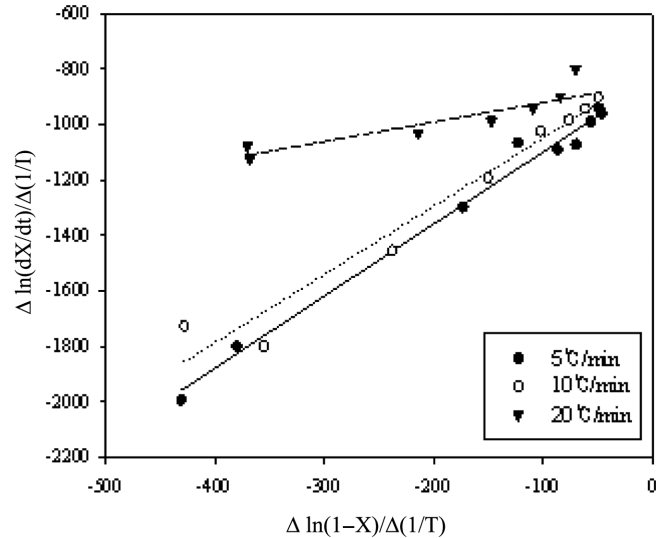


Fig. 6. Kinetic analysis by the Freeman-Carroll method (1st adsorption).

Table 4. Activation energies measured by the Friedman method

	E (kJ/mol)
1st adsorption	23.4
2nd adsorption	15.9

$\Delta \ln(dX/dt)/\Delta(1/T)$ 과 $\Delta \ln(1-X)/\Delta(1/T)$ 의 관계를 Fig. 6에 도시하였다.

Fig. 5에서 Friedman 법을 통해 각각의 전환율에 대한 기울기를 구해 활성화 에너지를 계산하였다. 전환율 0.1 부근에서는 수분의 탈착량이 많기 때문에 전환율 계산에서 제외하였고, 최종 온도에 도달한 이후에는 활성화에너지를 구할 수 없기 때문에 최종온도에 도달하기 이전의 전환율 0.2~0.6을 이용하여 활성화 에너지를 구하였다. 같은 방법으로 1·2차 흡착 후 활성탄의 활성화에너지를 계산하여 Table 4에 나타내었다. 1차 흡착 활성탄보다 2차 흡착 활성탄의 활성화 에너지가 낮음에도 불구하고 탈착반응속도가 느리게 나타났는데, 이는 활성탄이 흡·탈착을 반복하면서 흡착능이 떨어지게 되고, 활성탄에 흡착된 악취물질의 농도 또한 줄어들었기 때문으로 판단된다.

Freeman-Carroll 법을 이용한 열분해 반응의 속도론적 고찰시, 단일 승온속도의 결과만으로 해석할 경우 나타날 수 있는 오차를 줄이기 위하여 승온속도를 5, 10, 20 °C/min으로 변화시키고, 각 승온조건 실험결과로부터 활성화 에너지와 반응차수를 구하여 Table 5에 나타내었다. 5 °C/min에서 활성화 에너지가 높게 나타나며 20 °C/min에서 활성화 에너지가 낮게 나타나는 것을 알 수 있었다. 승온속도가 빠를수록 활성화에너지와 반응차수가 낮아지는 것으로 보아, 승온속도가 높아질수록 악취물질의 농도에 대한 영향이 줄어들게 되어 탈착이 빠르게 진행된다는 것을 알 수 있었다. 1차 흡착과 비교하여 2차 흡착에서 승온속도가 낮아질수록 활성화 에너지가 크게 증가했는데, 이는 활성탄이 흡·탈착을 반복하면서 흡착능이 떨어지게 되고 흡착능이 떨어지면서 흡착물질의 탈착반응속도가 늦어지기 때문이라 판단된다. 또한 2차 흡착에서, 활성탄의 승온속도가 높아질수록 활성화에너지의 변동폭이 큰 것은 높은 승온속도에서 활성탄의 흡착능에 따른 영향이 줄어들게 되고 이로 인해 탈착반응속도가 빨라졌기 때문이라고 해석된다.

Table 5. Desorption reaction orders and activation energies determined by the Freeman-Carroll method

	5 °C/min		10 °C/min		20 °C/min	
	n	E (kJ/mol)	n	E (kJ/mol)	n	E (kJ/mol)
1st adsorption	0.99	25.1	0.95	24.1	0.78	22.7
2nd adsorption	0.92	33.8	0.89	33.3	0.79	23.6

Friedman 법과 Freeman-Carroll 법에서 1차 흡착 활성탄과 2차 흡착 활성탄의 활성화에너지가 반대의 경향을 나타내는 이유는 Friedman 법에서 반응차수를 1로 가정하였기 때문에 그 적용범위가 한정되어 반응차수가 1을 크게 벗어나는 경우 오차를 수반하게 되고 최종온도 이후 등온상태에 도달했을 때 전환율에 대해서는 활성화에너지를 구할 수 없기 때문에 판단된다. Friedman 법은 전환율에 따른 특정온도구간의 해석으로 악취물질의 농도차이에 따라 2차 흡착 활성탄의 활성화 에너지가 낮아졌지만, Freeman-Carroll 법을 이용할 경우 전체 온도구간을 해석하므로 활성탄의 흡착능이 높은 1차 흡착 활성탄에서 낮은 활성화 에너지를 가지며 빠른 탈착반응을 나타내었다.

비등온 상태 반응의 전환율에 따른 활성화에너지를 구할 때는 Friedman 법을 이용하며, 전체 반응의 포괄적인 반응특성 분석을 위해서는 Freeman-Carroll 법을 이용한 속도론 해석이 적합하다고 판단된다.

4. 결 론

활성탄을 이용한 산업체 악취물질 제거 특성 규명을 위하여 신탄과 재생탄의 악취물질 탈착반응특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

신탄에 악취물질을 흡착시켰을 때 보다 재생탄에 악취물질을 흡착시켰을 때 활성탄의 흡착 효율은 44%로 감소하였고, 활성탄의 흡착력을 판단할 수 있는 요오드가 또한 2차 탈착 후 790으로 흡착력이 현저히 떨어진다는 것을 알 수 있었다.

악취물질의 탈착반응특성을 조사하기 위하여 240 °C의 열처리 조건에서 Friedman 법을 이용한 결과 1차 흡착보다 2차 흡착의 탈착 반응속도가 느림에도 불구하고 활성화에너지가 낮게 나타났는데, 이는 2차 흡착시 활성탄의 흡착력이 감소하여 흡착된 악취물질의 농도가 감소하였기 때문에 판단된다.

Freeman-Carroll 법을 이용하여 활성탄에 흡착된 악취물질의 승온속도별 탈착반응특성을 조사한 결과 승온속도가 증가할수록 활성화 에너지와 반응차수가 감소했는데 이는 승온속도가 증가할수록 악취물질의 탈착반응이 빠르게 진행되며, 악취물질의 농도에 대한 영향을 적게 받기 때문에 판단된다.

활성탄에 흡착된 악취물질의 반응특성 조사를 위한 본 연구에서 특정온도구간의 전환율에 따른 활성화에너지를 구할 때는 Friedman 법을, 전체 반응의 포괄적인 반응특성을 분석하기 위해서는 Freeman-Carroll 법을 이용하는 것이 적합하다고 판단된다.

감 사

이 연구는 2010년도 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었습니다.

사용기호

E : activation energy [kJ/mol]
k : reaction rate constant [min^{-1}]
n : reaction order
R : gas constant [8.314 J/molK]
t : reaction time
T : reaction temperature [K]
X : conversion

그리스 문자

β : heating rate [$^{\circ}\text{C}/\text{min}$]

참고문헌

- Moretti, E. C. and Mukhopadhyay, N., "VOC Control; Current Practices and Future Trends," *Chem. Eng. Prog.*, **89**, 20-26(1993).
- Rhee, Y. W., "The Study of Management Plan and Appropriate Replacement Cycle for the Activated Carbon and Scrubbing Liquid in Shiwha/Banwal Industrial Complex," Siheung Environmental Technology Development Center(2008).
- Yang, D. J., Kim, J. K., Kil, I. S., Yoon, S. M., Kim, J. Y. and Rhee, Y. W., "Desorption Characteristics of Waste Activated Carbon Collected from Chemicals Manufacturing Industries in Shiwha/Banwal Industrial Complex," *Korean Journal of Odor Research and Engineering*, **8**(4), 173-178(2009).
- Kim, J. Y., Yoon, S. M., Park, K. Y., Yoon, S. K., Kil, I. S., Park, H. J. and Rhee, Y. W., "Investigation on Desorption Characteristics of VOCs Adsorbed on Used Activated Carbons Collected From Painting Process," *Korean Chem. Eng. Res.(HWAHAK KONG-HAK)*, **48**(6), 752-756(2010).
- Freeman, E. S. and Carroll, J., "The Application of Thermo-analytical Techniques to Reaction Kinetics - the Thermo-Gravimetric Evaluation of the Kinetics of the Decomposition of Calcium Oxalate Monohydrate," *J. Phys. Chem.*, **62**, 394-397(1958).
- Ania, C. O., Menéndez, J. A., Parra, J. B. and Pis, J. J., "Microwave-Induced Regeneration of Activated Carbons Polluted with Phenol. A Comparison with Conventional Thermal Regeneration," *Carbon*, **42**(7), 1383-1387(2004).
- Chih, J. and Jou, G., "Application of Activated Carbon in a Microwave Radiation Field to Treat Trichloro Ethylene," *Carbon*, **36**(11), 1643-1648(1998).
- Rhee, Y. W., "Investigation on Recovery of Energy Resources From Waste Activated Carbons Generated in VOCs Adsorption Towers of Shiwha/Banwal Industrial Complex," Siheung Environmental Technology Development Center(2009).