

## 활성탄에 의한 페놀 흡착의 열역학적 연구

# Thermodynamic Analysis of Phenol Adsorption by Powdered Activated Carbon

김환익 · 이명은 · 강석태\* · 정재우<sup>†</sup>

Hwanik Kim · Myoung-Eun Lee · Seoktae Kang\* · Jae-Woo Chung<sup>†</sup>

경남과학기술대학교 환경공학과 녹색기술연구소 · \*경희대학교 토목공학과

Department of Environmental Engineering Green Technology Institute,

Gyeongnam National University of Science and Technology

\*Department of Civil Engineering, Kyunghee University

(2012년 9월 18일 접수, 2013년 3월 13일 채택)

**Abstract :** The adsorption characteristics of phenol by the powdered activated carbon (PAC) were investigated by series of batch experiments. The pseudo-second-order model described the adsorption kinetics adequately with correlation coefficients over 0.999, indicating chemical adsorption as the rate-limiting step. The kinetic rate constants were from 0.55 to 19.81 mg mg<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>. The adsorption isotherm followed the Langmuir isotherm, indicating the homogeneous mono-layer adsorption onto the surface of the adsorbent. The values of activation energy, enthalpy and entropy were 17.44 kJ mol<sup>-1</sup>, -8.26 kJ mol<sup>-1</sup> and -18.94 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, respectively. The Gibbs free energy was in the range of -2.89~2.14 kJ mol<sup>-1</sup>. The results show that the phenol adsorption is physical, spontaneous and exothermic reaction.

**Key Words :** Phenol, Activated Carbon, Adsorption, Kinetics, Isotherm, Thermodynamic

**요약 :** 분말활성탄에 의한 페놀흡착의 속도론, 등온흡착, 열역학적 특성을 규명하기 위해 회분식 실험을 수행하였다. 흡착실험에서 얻어진 데이터에 2차 반응속도 모델을 적용한 결과, 상관계수(R<sup>2</sup>)의 값이 0.999 이상으로 실험값과 이론적 예측값이 잘 일치하였다. 흡착반응의 속도상수(k<sub>2</sub>)는 흡착제 투입량에 따라 0.55~19.81 mg mg<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>의 범위를 가지는 것으로 나타났다. 페놀의 등온흡착 특성은 Langmuir 등온 흡착 모델을 따르는 것으로 나타나 페놀이 활성탄 표면에 단층으로 균일하게 흡착되는 것을 알 수 있었다. 283.15~323.15 K의 온도범위에서 열역학적 특성을 평가한 결과, 흡착반응의 활성화에너지는 17.44 kJ mol<sup>-1</sup>, 표준자유에너지변화는 -2.89~-2.14 kJ mol<sup>-1</sup>, 엔탈피 변화는 -8.26 kJ mol<sup>-1</sup>, 엔트로피 변화는 -18.94 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>인 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 활성탄에 의한 페놀흡착은 Langmuir 방식의 물리적 흡착이고 자발적이며 발열반응임을 보여준다.

**주제어 :** 페놀, 활성탄, 흡착, 속도론, 등온흡착, 열역학적 특성

## 1. 서론

페놀은 의학, 석유화학, 제지, 목재가공 등 다양한 산업분야에서 배출되는 폐수에 포함되어 있다.<sup>1,2)</sup> 국내 산업폐수 중 페놀과 같은 유해유기물 등을 함유하고 있는 특정폐수는 하루에 약 200만톤 이상 배출되고 있다.<sup>3)</sup> 페놀은 벤젠고리를 가진 난분해성 성질을 지닌 물질로서 고농도로 존재할 경우, 기존의 생물학적 처리로는 제거가 어렵다. 페놀은 0.005 mg/L 정도의 매우 낮은 농도에서도 불쾌감을 유발하고,<sup>4)</sup> 공정에 따라 다양한 화학물로 재생성된다. 이러한 페놀류는 생태계에서 생물학적으로 축적되고 지속되는 경향이 있으므로 효율적인 관리가 필요하다.<sup>5)</sup> 현재 우리나라의 페놀 기준은 먹는 물, 농업용수, 생활용수는 0.005 mg/L, 공업용수는 0.01 mg/L로 지정되어 있다. 미국 EPA (Environmental Protection Agency)는 폐수의 페놀 농도를 1 mg/L 이하로 방류 할 것을 권고하고 있다.<sup>6)</sup>

페놀을 처리하기 위한 기술로는 흡착, 농축, 산화기술 등이 있으며, 현재 흡착 및 농축을 이용한 제거방법<sup>7)</sup>과 UV 광

분해, 오존화 공정(ozonation), 광촉매(photocatalysis), UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 펜톤산화공정, 전자빔 공정 등과 같은 다양한 고급산화공정(AOPs, Advanced Oxidation Processes)이 활용되고 있다. 고급산화공정에 대한 연구들은 1990년대 후반부터 2000년대 초반까지 활발하게 진행되어 왔고 일부 적용되어 왔으나 산업현장에 널리 적용되지 않는 실정이다. 그 이유는 고급산화기술은 기술별 장단점이 뚜렷하며 처리대상 물질에 대한 선택성(selectivity)이나 발생원에 따른 적용성이 다르므로 기술의 선정과 적용에 있어 제한을 가지기 때문이다.

가장 널리 사용되는 페놀의 제거방법은 흡착기술이며 흡착제로 활성탄이 널리 활용되고 있다. 활성탄은 흡착용량이 크고 흡착속도가 빨라 흡착제로서 효과적이라고 보고되고 있다.<sup>1)</sup> 국내·외의 많은 연구자들에 의해 난분해성 오염물질 제거를 위한 흡착기술에 관한 연구들이 이루어지고 있다.<sup>3,4,6-11)</sup> 그러나 페놀을 포함한 난분해성 유기오염물질 제거를 위한 흡착공정의 반응속도론, 등온흡착, 열역학적 특성을 종합적으로 발표한 자료는 드문 실정이다.

본 연구에서는 활성탄에 의한 페놀흡착의 속도론, 등온흡

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: jwchung@gntech.ac.kr Tel: 055-751-3348 Fax: 055-751-3484

**Table 1.** Physico-chemical properties of experimented activated carbon

Adsorbent	Elementary composition(%)		Physical properties		
	Carbon	Oxygen	Surface area (m <sup>2</sup> /g)	Pore size (nm)	Pore volume (cm <sup>3</sup> /g)
GAC <sup>a)</sup>	95.76	4.24	1156.22	0.415	0.64
PAC <sup>b)</sup>	94.21	5.79	1069.33	0.407	0.58

<sup>a)</sup>GAC: granular activated carbon, <sup>b)</sup>PAC: powdered activated carbon

착, 열역학적 특성을 종합적이고 체계적으로 규명하고 적용 분야를 확대하기 위한 기초자료를 확보하기 위해 분말활성탄을 흡착제로 사용하여 페놀흡착 특성에 미치는 다양한 운전변수의 영향을 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험재료

본 연구에서 사용된 활성탄은 상용 입상활성탄(Norit GAC 1240, Netherland)을 pH변화가 없을때까지 약 3일간 세척하여 105℃에서 24시간 건조한 후에 분쇄한 분말활성탄이다. Table 1은 사용된 흡착제의 물리·화학적 특성을 나타내고 있다. SEM-EDS (Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray Spectrometer, Jeol, Japan)를 사용하여 원소조성을 분석한 결과, 분말활성탄은 탄소(94.21%)와 산소(5.79%)로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 입자-공극 분석시스템(ASAP2010, Micromeritics, USA)을 사용하여 77 K 질소상태에서 분석한 분말활성탄의 Brunauer-Emmett-Teller (BET) 비표면적은 1069.33 m<sup>2</sup>/g이었으며 Barrett-Joyner-Halenda (BJH) 공극분포 분석으로부터 얻어진 공극크기와 공극부피는 0.407 nm 및 0.58 cm<sup>3</sup>/g이었다. 입상활성탄과 분말활성탄의 화학적 조성과 물리적인 특성이 다소 차이가 있는 것으로 나타났으나 무시할만한 것으로 나타났다.

흡착실험을 위해 순도 99%의 시약용 페놀(Samchun Chemical, Korea)을 이용하여 1,000 mg/L의 수용액을 제조한 후에 실험에 필요한 농도로 희석하여 사용하였다. 페놀수용액의 pH는 5.69~6.10의 범위를 가지는 것으로 나타났으며 흡착실험은 pH의 조절이 없는 상태에서 수행되었다.

### 2.2. 실험 및 분석 방법

흡착실험은 회분식으로 진행하였으며 200 mL 삼각플라스크에 일정한 농도의 페놀수용액을 100 mL 넣고 분말활성탄을 투입한 후에 회전식 항온진탕기에 넣어 200 rpm으로 교반시켰다. 흡착실험의 분말활성탄 투입량은 초기 페놀농도 100 mg/L에서 0.2~2 g/L의 활성탄을 투입한 조건에서 시간에 따른 페놀 제거 특성을 관찰한 후에 0.5 g/L로 결정하였다.

채취된 시료의 페놀의 농도는 0.20 μm Syringe Filter (ADVANTEC, Japan)를 이용하여 여과한 후에 고성능액체크로마

토그래피(High Performance Liquid Chromatography, Agilent Technologies 1200 Series)로 분석하였다. 이동상 용매로 물과 메탄올을 60 : 40 비율로 혼합하여 사용하였으며 264 nm의 파장에서 분석하였다.

페놀흡착의 속도론을 규명하기 위해 25℃ 조건에서 일정한 시간간격으로 시료를 채취한 후에 페놀농도를 분석하였으며 얻어진 데이터를 식 (1)과 (2)에 의해 주어지는 pseudo-first-order 및 pseudo-second-order 속도 모델들에 적용하였다.<sup>9,10)</sup>

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_{ad}}{2.303}t \quad (1)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e}t \quad (2)$$

여기서 q<sub>e</sub>와 q<sub>t</sub>는 각각 평형상태와 t시간에서의 흡착된 페놀의 단위흡착량(mg/g)이며, k<sub>ad</sub>는 일차반응 속도상수(min<sup>-1</sup>), k<sub>2</sub>는 이차반응 속도상수(mg mg<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>)이다.

페놀흡착의 등온흡착 특성을 관찰하기 위해 초기 페놀농도 10~500 mg/L의 범위에서 흡착실험을 수행하였으며 얻어진 데이터를 Langmuir(식 (3)) 및 Freundlich(식 (4)) 등온흡착 모델에 적용하였다.<sup>11)</sup>

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_0 b} + \frac{1}{Q_0} C_e \quad (3)$$

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (4)$$

여기서, C<sub>e</sub>는 평형조건에서 페놀농도(mg/L), Q<sub>0</sub>는 Langmuir model에서 흡착제의 단위무게당 최대흡착량(mg g<sup>-1</sup>), b는 흡착평형상수를 나타낸다.

활성화에너지(E<sub>a</sub>), 표준자유에너지 변화(ΔG<sup>0</sup>), 엔탈피 변화(ΔH<sup>0</sup>), 엔트로피 변화(ΔS<sup>0</sup>)와 같은 페놀 흡착의 열역학적 특성을 규명하기 위해서 283.15~323.15 K의 온도조건에서 실험하였으며 얻어진 데이터는 식 (5)~(7)의 열역학적 관계들을 이용하여 분석하였다.<sup>12,13)</sup>

$$\ln k_2 = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (5)$$

$$\log K_D = \frac{\Delta S^0}{2.303R} - \frac{\Delta H^0}{2.303RT} \quad (6)$$

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (7)$$

여기서, k<sub>2</sub>는 유사이차반응속도 상수, A는 빈도계수, E<sub>a</sub>는 활성화에너지(kJ mol<sup>-1</sup>), R은 기체상수(8.314 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>), T는 절대온도(K), K<sub>D</sub>는 열역학적 평형상수이다.

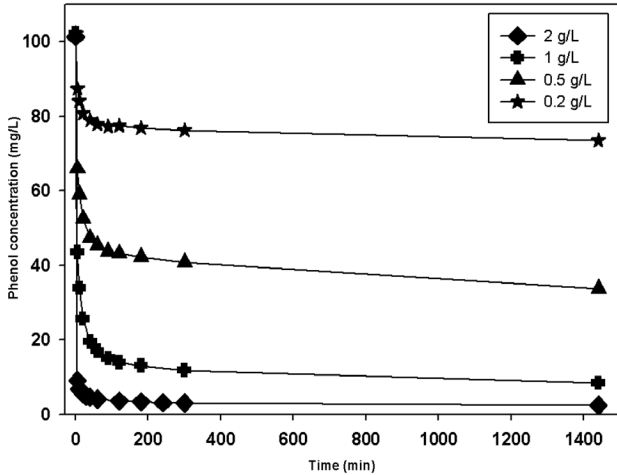


Fig. 1. Effect of adsorbent dose on phenol adsorption.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 페놀 흡착반응 속도론

페놀의 초기농도가 100 mg/L, 활성탄 투입량이 0.2~2.0 g/L 인 조건에서 흡착제의 투입량에 따른 페놀의 흡착특성을 Fig. 1에 나타내었다. 활성탄 투입량이 0.2, 0.5, 1.0, 2.0 g/L인 조건에서 300분이 경과한 후에 25.3, 59.9, 88.4, 96.9%의 페놀이 흡착되는 것으로 나타났다. 활성탄으로의 페놀흡착은 초기에는 빠르게 진행되지만 시간이 경과하면 흡착지점이

포화됨에 따라 느리게 진행되어 대략 24시간이 경과하면 평형조건에 도달하는 것으로 나타났다.

흡착제 투입량이 0.5 g/L인 조건에서 pseudo-first-order 및 pseudo-second-order 속도모형을 적용한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 활성탄으로의 페놀흡착은 2차 반응속도 모형을 따르는 것으로 나타났다.<sup>14,15)</sup>

Table 2는 흡착제의 투입량에 따라 1차 반응속도 및 2차 반응속도 모형을 적용할 때 얻어진 속도상수, 흡착용량, 상관계수를 나타내고 있다. 모든 조건에서 2차 반응속도 모형을 적용할 때 상관계수( $R^2$ )의 값이 0.999 이상이며 실험에서 얻어진 흡착용량과 모델로부터 계산된 흡착용량이 비슷하게 얻어지는 것으로 나타났다. 2차 반응속도 모형을 적용하여 얻어진 흡착용량과 실험에서 얻어진 흡착용량의 차이를 나타내는 오차율은 흡착제 투입량에 따라 0.12~1.13%로 낮게 나타나 2차 반응속도 모델이 활성탄에 의한 페놀흡착을 매우 적절하게 설명할 수 있는 것으로 나타났다.

#### 3.2. 등온흡착 특성

페놀 초기농도 10~500 mg/L의 조건에서 흡착실험을 수행하여 얻어진 데이터를 Langmuir 및 Freundlich 모델에 적용한 결과를 Fig. 3과 Table 3에 나타내었다. 활성탄으로의 페놀흡착은 Freundlich ( $R^2 = 0.929$ )보다 Langmuir ( $R^2 = 0.999$ ) 모델에 의해 적절하게 설명될 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 활성탄의 페놀흡착은 흡착제의 단층(monolayer)으로 균일한 흡착이 이루어짐을 추정할 수 있다.<sup>16)</sup>

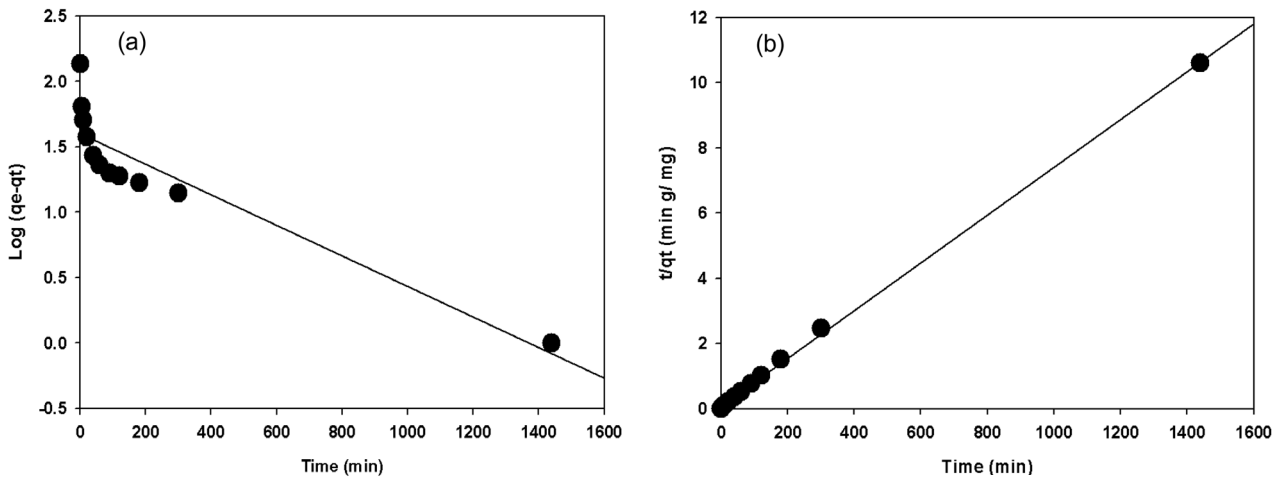


Fig. 2. First and second order plots for phenol adsorption on powered activated carbon.

Table 2. First-order and second-order kinetic parameters for phenol adsorption at 298,15 K

Adsorbent dose (g/L)	$q_{e,exp}^a$ (mg/g)	Pseudo-first-order model			Pseudo-second-order model			Error rate (%)
		$q_{e,cal}^b$ (mg/g)	$k_{ad}$ ( $min^{-1}$ )	$R^2$	$q_{e,cal}^b$ (mg/g)	$k_2$ ( $mgmg^{-1}min^{-1}$ )	$R^2$	
2.0 g/L	49.44	1.52	0.00069	0.054	49.50	19.81	1.000	0.12
1.0 g/L	93.73	15.31	0.00207	0.540	94.33	1.82	0.999	0.64
0.5 g/L	135.90	39.81	0.00276	0.826	136.98	0.55	0.999	0.79
0.2 g/L	143.30	39.81	0.00276	0.807	144.92	0.56	0.999	1.13

<sup>a)</sup> $q_{e,exp}$ : experimental equilibrium capacity, <sup>b)</sup> $q_{e,cal}$ : calculated equilibrium capacity

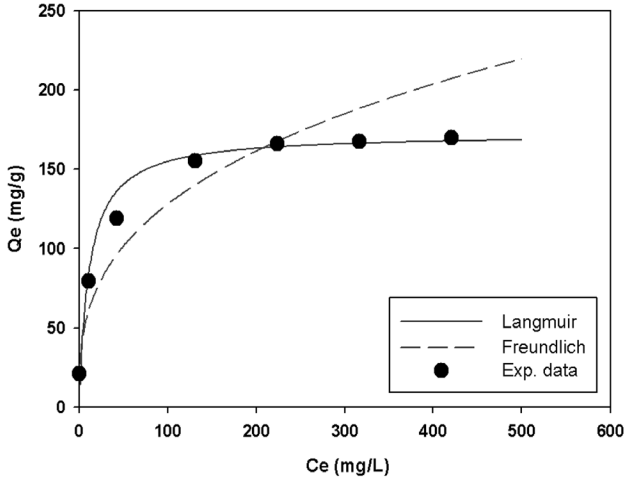


Fig. 3. Equilibrium adsorption isotherms of phenol onto powdered activated carbon.

Table 3. Langmuir and Freundlich isotherm parameters for phenol adsorption

Parameter	Langmuir model			Freundlich model		
	Q <sub>0</sub> (mg/g)	b (L/mg)	R <sup>2</sup>	K <sub>F</sub>	1/n	R <sup>2</sup>
Value	172.41	0.089	0.999	27.38	0.335	0.929

흡착반응의 등온흡착의 형태는 흡착시스템의 수월성(effectiveness)을 예측하기 위해 이용할 수 있다. Langmuir 방정식의 특성은 식 (8)과 같은 평형계수로 불리는 무차원 상수, R<sub>L</sub>에 의해 표현될 수 있다.<sup>13,16)</sup>

$$R_L = \frac{1}{1 + b C_0} \quad (8)$$

여기서, C<sub>0</sub>는 가장 높은 초기 페놀의 농도(mg/L)이며 b는 Langmuir 흡착평형상수이다.

R<sub>L</sub>의 값은 등온흡착의 형태를 나타낸다. 즉, 흡착반응이 비가역적인 경우에 R<sub>L</sub>의 값은 0이 되고, 반응성이 높은 경우에는 0과 1 사이의 값을 가지며, 반응성이 낮은 반응인 경우에는 1보다 큰 값을 가진다. 실험에서 얻어진 Langmuir 식의 R<sub>L</sub>의 값은 0.022로 나타나 페놀흡착이 수월함을 알 수 있었으나<sup>16)</sup>, 평형상수인 b의 값이 0.089로 페놀농도가 낮게 존재하는 경우 흡착에 의한 제거가 저조할 것으로 나타났다. 이와 더불어 Freundlich 상수, n의 경우에도 2.99의 값을 가지므로 나타나 활성탄으로 페놀의 흡착이 순조롭게 일어남을 보여준다.<sup>17)</sup>

### 3.3. 열역학적 특성

활성탄에 의한 페놀흡착의 열역학적 특성을 규명하기 위해 283.15~323.15 K의 범위에서 실험한 결과를 Fig. 4에 나타내었으며 2차 반응속도 모델을 적용한 결과를 Table 4에 나타내었다. 반응온도가 증가할수록 흡착용량이 감소하는 것으로 나타나 흡착반응이 발열반응임을 추정할 수 있다.<sup>13)</sup>

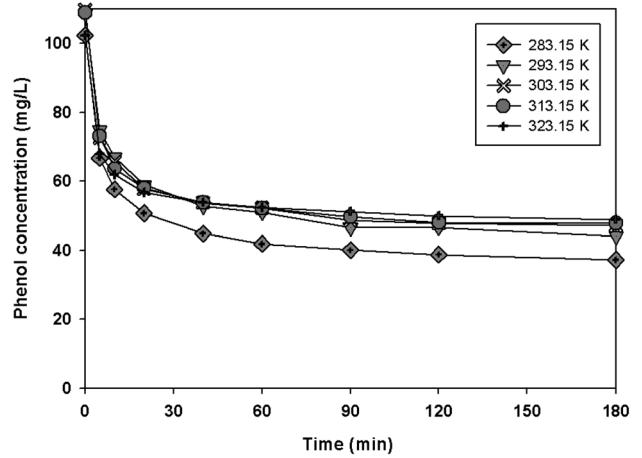


Fig. 4. Effect of temperature on phenol adsorption.

Table 4. Second-order kinetic parameters of phenol adsorption according to temperatures

Temperature (K)	q <sub>e,exp</sub> (mg/g) <sup>a)</sup>	Pseudo second order kinetic constants		
		q <sub>e,cal</sub> (mg/g) <sup>b)</sup>	k <sub>2</sub> (mg mg <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
283.15	130.26	131.58	1.777	0.999
293.15	129.15	131.58	1.477	0.998
303.15	125.11	126.58	2.087	0.999
313.15	122.22	123.46	2.302	0.999
323.15	106.71	107.53	2.982	0.999

<sup>a)</sup>q<sub>e,exp</sub>: experimental equilibrium capacity

<sup>b)</sup>q<sub>e,cal</sub>: calculated equilibrium capacity

흡착반응의 활성화에너지(E<sub>a</sub>), 표준자유에너지변화(ΔG), 엔탈피변화(ΔH), 엔트로피 변화(ΔS)와 같은 열역학적 파라미터들은 실제 공정의 운전에 중요한 지표가 될 수 있다.

활성화에너지(E<sub>a</sub>)는 식 (5)와 같이 온도에 따른 2차 반응 속도 상수, k<sub>2</sub>와 온도 사이의 관계를 이용하여 얻어지는 그래프의 기울기로부터 구할 수 있다. Nolllet 등에 의하면, 활성화 에너지의 값에 따라 물리적 흡착과 화학적 흡착으로 구분하였으며 낮은 활성화에너지(5~40 kJ mol<sup>-1</sup>)는 물리적 흡착의 특성을 나타내며, 높은 활성화 에너지(40~800 kJ mol<sup>-1</sup>)

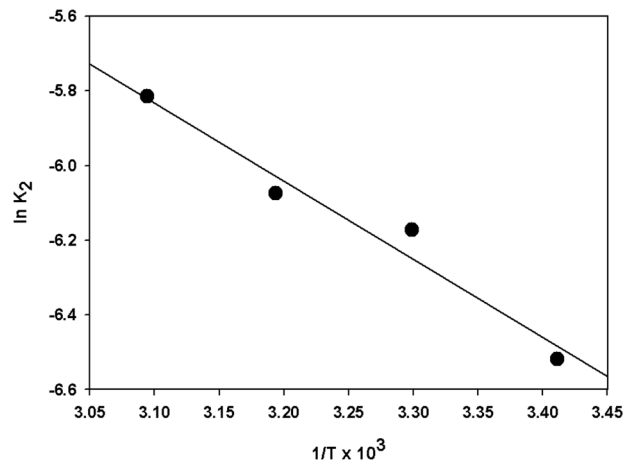


Fig. 5. Plot of ln k<sub>2</sub> vs 1/T × 10<sup>3</sup> for the estimation of thermodynamic parameters.

**Table 5.** Calculated thermodynamic parameters for phenol adsorption

T (K)	$\Delta G$ (kJmol <sup>-1</sup> )	$\Delta S$ (Jmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$\Delta H$ (kJmol <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
283.15	-2.89			
293.15	-2.70			
303.15	-2.51	-18.94	-8.26	0.964
313.15	-2.32			
323.15	-2.14			

는 화학적 흡착의 특성을 갖는다.<sup>18)</sup> Fig. 5는 실험에서 얻어진 데이터를 사용하여  $\ln k_2$ 와  $1/T \times 10^3$ 의 관계를 나타낸 결과이다. 직선의 기울기( $E_a/R$ )로부터 얻어진 페놀 흡착반응의 활성화에너지는 17.44 kJ mol<sup>-1</sup>로 나타났다. 따라서 활성탄으로의 페놀 흡착은 물리적 흡착이 주된 메카니즘인 것으로 판단된다.

Table 5는 식 (6)과 (7)을 이용하여 구한 흡착반응의 표준자유에너지변화( $\Delta G$ ), 엔탈피변화( $\Delta H$ ), 엔트로피변화( $\Delta S$ )의 값을 나타내고 있다.<sup>19,20)</sup> 흡착반응의 자발성(spontaneity)을 나타내는  $\Delta G$ 의 값은 온도에 따라 -2.89~-2.14 kJ mol<sup>-1</sup>의 범위를 가지는 것으로 나타났다. 또한  $\Delta G$ 의 값은 온도가 감소할수록 더 큰 음의 값을 가지는 것으로 나타나 흡착반응의 자발성이 온도증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 일반적으로 물리적 흡착의  $\Delta G$ 값은 -20~0 kJ mol<sup>-1</sup>이며 화학적 흡착의  $\Delta G$ 는 -80~400 kJ mol<sup>-1</sup>의 값을 가지는 것으로 알려져 있다.<sup>18)</sup> 실험에서 얻어진  $\Delta G$ 의 값은 활성화에너지와 더불어 페놀의 활성탄 흡착과정에서 물리적 흡착이 주된 흡착 메카니즘임을 보여준다. 흡착반응의  $\Delta H$ 는 -8.26 kJ mol<sup>-1</sup>의 값을 가지는 것으로 나타나 흡착반응이 발열반응이며  $\Delta S$ 의 값은 -18.94 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>으로 나타나 활성탄에 페놀이 흡착됨에 따라 시스템의 자유도가 감소하여 고체와 액체계면에서의 무질서도가 감소하는 것으로 나타났다.<sup>13)</sup>

#### 4. 결론

본 연구에서는 활성탄에 의한 페놀흡착의 속도론, 등온흡착, 열역학적 특성을 규명하기 위해 분말활성탄을 이용하여 회분식 실험을 수행하였으며 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 활성탄으로의 페놀흡착은 2차 반응속도 모델을 적용할 때, 상관계수(R<sup>2</sup>)가 0.999 이상으로 나타나 실험에서 얻어진 흡착속도를 잘 설명할 수 있었다. 흡착반응의 2차 반응 속도 상수(k<sub>2</sub>)는 흡착제 투입량에 따라 0.55~19.81 mg mg<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>으로, 흡착제 투입량이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다.

2) 페놀의 등온흡착 특성은 Langmuir 모델을 따르는 것으로 나타나 활성탄 표면으로 단층의 균일한 페놀 흡착이 이루어지는 것을 예측할 수 있었다. 실험된 조건에서 Langmuir

등온흡착 특성을 나타내는 상수(R<sub>L</sub>)의 값은 0.022로 나타나 페놀흡착이 수월함을 알 수 있었으나, 평형상수인 b의 값이 0.089로 페놀농도가 낮게 존재하는 경우 흡착에 의한 제거가 저조할 것으로 나타났다.

3) 흡착반응의 활성화에너지(E<sub>a</sub>) 값은 17.44 kJ mol<sup>-1</sup>로 나타나 페놀 흡착의 주된 반응은 물리적 흡착임을 알 수 있었으며, 표준자유에너지변화( $\Delta G$ )가 음의 값을 가지므로 자발적인 반응임을 알 수 있었다. 흡착반응의 엔탈피변화( $\Delta H$ )가 음의 값(-8.26 kJ mol<sup>-1</sup>)이며 온도가 감소할수록  $\Delta G$ 의 값이 더 큰 음의 값을 가지는 것으로 나타나 활성탄으로의 페놀 흡착반응이 발열반응인 것으로 나타났다.

#### 사 사

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A1A4 A01014928).

KSEE

#### 참고문헌

- Liu, Q.-S., Zheng, T., Wang, P., Jiang, J.-P. and Li, N., "Adsorption isotherm, kinetic and mechanism studies of some substituted phenols on activated carbon fibers," *Chem. Eng. J.*, **157**, 348~356(2010).
- Dąbrowski, A., Podkościelny, P., Hubicki, Z. and Barczak, M., "Adsorption of phenolic compounds by activated carbon-a critical review," *Chemosphere*, **58**(8), 1049~1070(2005).
- Yu, M.-R., Yang, J.-K. and Chang, Y.-Y., "As(III) oxidation and phenol adsorption by the activated carbon impregnated with Mn oxide," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **30**(4), 423~429 (2008).
- Suresh, S., Srivastava, V. C. and Mishra, I. M., "Adsorptive removal of phenol from binary aqueous solution with aniline and 4-nitrophenol by granular activated carbon," *Chem. Eng. J.*, **171**(3), 997~1003(2011).
- Kim, W.-G. and Lee, S.-M., "Phenol removal using horseradish peroxidase (HRP)-mediated polymerization reaction in saturated porous media," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **30**(10), 984~991(2008).
- Beker, U., Ganbold, B., Dertli, H. and Gülbayir, D. D., "Adsorption of phenol by activated carbon: Influence of activation methods and solution pH," *Energy Conversion Manage.*, **51**(2), 235~240(2010).
- Jung, M. W., Ahn, K. H., Lee, Y., Kim, K. P., Rhee, J. S., Park, J. T. and Paeng, K. J., "Adsorption characteristics of phenol and chloro phenols on granular activated carbons (G-AC)," *Micro. Chem. J.*, **70**(2), 123~131(2001).
- Richard, D., Núñez, M. L. D. and Schweich, D., "Adsorption of complex phenolic compounds on active charcoal: Adsorption capacity and isotherms," *Chem. Eng. J.*, **148**(1), 1~7

- (2009).
9. Valderrama, C., Barios, J. I., Caetano, M., Farran, A., Cortina, J. L., "Kinetic evaluation of phenol/aniline mixtures adsorption from aqueous solutions onto activated carbon and hypercrosslinked polymeric resin (MN200)," *Reac. Funct. Polym.*, **70**(3), 142~150(2010).
  10. Tseng, R.-L., Wu, K.-T., Wu, F.-C. and Juang, R.-S., "Kinetic studies on the adsorption of phenol, 4-chlorophenol, and 2,4-dichlorophenol from water using activated carbons," *J. Environ. Manage.*, **91**(11), 2208~2214(2010).
  11. Kumar, A. Kumar, S., Kumar, S. and Gupta, D. V., "Adsorption of phenol and 4-nitrophenol on granular activated carbon in basal salt medium: Equilibrium and kinetics," *J. Hazard. Mater.*, **147**(1~2), 155~166(2007).
  12. Huang, X., Gao, N. and Zhang, Q., "Thermodynamics and kinetics of cadmium adsorption onto oxidized granular activated carbon," *J. Environ. Sci.*, **19**(11), 1287~1292(2007).
  13. Lee, J.-J., "Study on adsorption characteristics of erythrosine dye from aqueous solution using activated carbon," *Appl. Chem. Eng.*, **22**(2), 224~229(2011).
  14. Pellerá, F.-M., Giannis, A., Kalderis, D., Anastasiadou, K., Stegmann, R., Wang, J.-Y. and Gidarakos, E., "Adsorption of Cu(II) ions from aqueous solutions on biochars prepared from agricultural by-products," *J. Environ. Manage.*, **96**, 35~42(2012).
  15. Zou, W., Han, R., Chen, Z., Jinghua, Z. and Shi, J., "Kinetic study of adsorption of Cu(II) and Pb(II) from aqueous solutions using manganese oxide coated zeolite in batch mode," *Colloid. Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, **279**(1~3), 238~246(2006).
  16. Hameed, B. H., Din, A. T. M. and Ahmad, A. L., "Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon: Kinetics and equilibrium studies," *J. Hazard. Mater.*, **141**(3), 819~825(2007).
  17. Aksu, Z., "Determination of the equilibrium, kinetic and thermodynamic parameters of the batch biosorption of lead(II) ions onto *Chlorella vulgaris*," *Proc. Biochem.*, **38**, 89~99(2002).
  18. Nollet, H., Roels, M., Lutgen, P., Van der Meeren, P. and Verstraete, W., "Removal of PCBs from wastewater using fly ash," *Chemosphere*, **53**(6), 655~665(2003).
  19. Ünlü, N. and Ersoz, M., "Adsorption characteristics of heavy metal ions onto a low cost biopolymeric sorbent from aqueous solutions," *J. Hazard. Mater.*, **136**(2), 272~280(2006).
  20. Lyubchik, S. I., Lyubchik, A. I., Galushko, O. L., Tikhonova, L. P., Vital, J., Fonseca, I. F. and Lyubchik, S. B., "Kinetics and thermodynamics of the Cr(III) adsorption on the activated carbon from co-mingled wastes," *Colloid. Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, **242**, 151~158(2004).