

활성탄에 의한 Acid Blue 40 흡착에 있어서 평형, 동역학 및 열역학적 특성

이종집
공주대학교 화학공학부

Characteristics of Equilibrium, Kinetic and Thermodynamic for Adsorption of Acid Blue 40 by Activated Carbon

Jong Jib Lee

Division of Chemical Engineering, Kongju National University

요약 활성탄에 의해 수용액으로부터 acid blue 40을 흡착하는 과정을 통해 흡착평형, 동역학 및 열역학적 특성을 활성탄 양, pH, 온도, 접촉시간, 초기농도를 함수로 해서 알아내고자 하였다. 활성탄에 대한 acid blue 40의 흡착에 대한 pH별 흡착특성은 Sulfonate ion(SO₃⁻)과 amine ion(NH₂⁺)의 존재 때문에 pH 3과 pH 11에서 흡착률이 높아지는 육조현상을 나타내었다. 활성탄에 대한 Acid Blue 40의 흡착평형관계를 흡착등온식에 적용해본 결과 Langmuir 식이 Freundlich 식과 Temkin 식보다 더 잘 맞는 것으로 나타났다. Langmuir 식과 Freundlich 식의 분리계수로 부터 활성탄에 의한 Acid Blue 40의 흡착처리가 유효한 흡착공정이 될 수 있음을 알았다. Temkin 식에 의해 구한 흡착에너지 값으로부터 흡착공정이 물리흡착공정이라는 것을 알았다. 활성탄에 대한 acid blue 40의 흡착공정에 대한 동역학적 해석을 통해 반응속도식의 적용결과는 유사일차반응속도식이 유사일차반응속도식에 비해 일치도가 높은 것으로 나타났다. 평가된 활성화 에너지 값은 42.308 kJ/mol이었으며, 엔탈피변화는 80.088 J/mol로 흡열반응의 특성을 가지는 것으로 판단되었다. 또한 자유에너지변화가 -0.0553~-5.5855 kJ/mol로 온도가 올라갈수록 흡착공정의 자발성이 더 높아진다는 것을 알았다.

Abstract The kinetics and thermodynamics of the adsorption of acid blue 40 from an aqueous solution by activated carbon were examined as a function of the activated carbon dose, pH, temperature, contact time, and initial concentration. The adsorption efficiency in a bathtub was increased at pH 3 and pH 11 due to the presence of sulfonate ions (SO₃⁻) and amine ions (NH₂⁺). The equilibrium adsorption data were fitted to the Langmuir, Freundlich and Temkin isotherms. The results indicated that the Langmuir model provides the best correlation of the experimental data. The separation factor of the Langmuir and Freundlich model showed that the adsorption treatment of acid blue 40 by activated carbon could be an effective adsorption process. The adsorption energy determined by the Temkin equation showed that the adsorption step is a physical adsorption process. Kinetics analysis of the adsorption process of acid blue 40 on activated carbon showed that a pseudo second order kinetic model is more consistent than a pseudo second order kinetic model. The estimated activation energy was 42.308 kJ/mol. The enthalpy change (80.088 J/mol) indicated an endothermic process. The free energy change (-0.0553 ~ -5.5855 kJ/mol) showed that the spontaneity of the process increased with increasing adsorption temperature.

Keywords : Acid blue 40, Adsorption, Kinetic, Thermodynamic, Dye

*Corresponding Author : Jong Jib Lee(Kongju National Univ.)

Tel : +82-41-521-9357 e-mail : jjlee@kongju.ac.kr

Received August 24, 2018

Revised (1st September 17, 2018, 2nd September 21, 2018)

Accepted December 7, 2018

Published December 31, 2018

1. 서론

염색공정으로부터 발생하는 폐수는 넓은 색도를 가지고 복잡한 방향족 분자 구조의 유기 화합물로 매우 안정하여 자연적으로 분해되기 어려운 특징 때문에 처리하기가 어렵다. 흡착법은 적은 비용과 간단한 설계, 쉬운 조작으로 오염물질을 제거하는데 효과적인 방법이며, 2차 오염물질을 생성하지 않는 장점을 가지고 있다[1,2]. Acid blue 40은 안트라퀴논계 염료로 아조염료 다음으로 중요한 상업적 염료이다. 좋은 안정성과 선명한 색상을 발현하는 특징을 가지고 있기 때문에 섬유산업에서 폭 넓게 사용되고 있다. 반면에 여러 가지 심각한 환경문제를 일으킬 수 있기 때문에 폐수 처리 시 반드시 제거해야 하는 물질이다[3].

이전 연구에서, 산업 폐수로부터 다양한 염료들을 제거하기 위한 여러 가지 방법들이 시도 되었다. Akar[4]은 바이오매스인 *Thuja orientalis*를 이용해 acid blue 40을 흡착 연구를 하여 모든 온도에서 음의 값을 갖는 자유에너지변화를 얻어 흡착이 잘 되며, Langmuir 흡착등온식과 유사이차속도식에 잘 맞는다고 하였다. Mahmut 등[5]은 입상 활성탄과 산화된 명반석을 사용하여 acid blue 40을 흡착 반응을 비교하여 평형은 90분 이내에 나타나며 Langmuir와 Freundlich 등온식과 일차속도식을 따르는 것을 확인 하였고, Fetterolf 등[6]은 티타니아를 이용하여 acid blue 40을 흡착 연구를 통하여 pH 4와 9에서 흡착률이 높으며, 흡착평형은 Langmuir 흡착등온식에 잘 맞는다고 하였다. 그러나 가격이 싸면서 흡착능이 우수한 흡착제인 활성탄을 사용하여, 흡착평형, 흡착동력학 및 열역학적 관계를 상세하게 연구한 자료는 아직까지 없다.

본 연구에서는 활성탄을 흡착제로 사용하여 acid blue 40을 흡착제거하는 과정을 대상으로 Langmuir, Freundlich 및 Temkin 식의 흡착 평형 인자를 평가하여 흡착제로서 활성탄이 적합한지 흡착조작의 유효성을 판단해 보고자 하였다. 또한, 흡착속도 실험을 통하여 acid blue 40의 초기 농도와 흡착온도 들이 흡착 반응에 미치는 영향을 고찰하여 동력학적인 해석과 열역학적 파라미터를 조사하여 흡착공정에 대한 메카니즘을 알아내고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험재료 및 분석

Acid blue 40($C_{22}H_{16}N_3NaO_6S$), MW : 473.43 g/mol)은 Sigma-Aldrich 사 제품으로 Figure 1과 같은 구조를 가지고 있다. 증류수에 녹여 1000 mg/L의 원용액을 만들어 필요한 농도로 희석하여 사용하였다. 흡착제로 사용한 활성탄은 동양탄소에서 제조한 8×30 mesh 크기의 야자계 입상 활성탄(GAC)을 70 °C의 증류수로 24시간 침지 후 건조하여 사용하였다. Table 1에 활성탄의 대표적인 물성을 나타내었다. Acid blue 40의 농도는 UV-Visble spectrophotometer (Shimadzu, UV-1800P)로 620 nm에서의 흡광도 측정값을 측정하여 분석하였다.

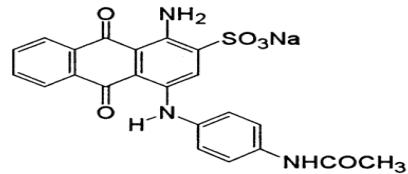


Fig. 1. Molecular structure of acid blue 40.

Table 1. Physical properties of activated carbon.

Properties	Unit	Value
Particle size	mesh	8 x 30
Average particle size	mm	1.638
Density(at 25°C)	(g/mL)	0.45~0.50
Iodine adsorption value	mg/g	1,000 Min
Methylene Blue value	mL/g	150 Min
Ash	%	4 Max
Hardness	%	90 Min

2.2 활성탄의 양 결정 실험

초기농도 200 mg/L인 acid blue 40 용액 50 mL에 대하여 70 °C의 증류수로 24시간 침지한 활성탄을 100~900 mg(건조기준 질량) 범위에서 각각 다른 PE 병에 넣고, 왕복식 항온진탕기 (Jeio Tek, BS-21)에서 298 K, 100 rpm 조건으로 24시간 동안 흡착시킨 후 잔류 농도를 분석하여 활성탄의 투입량을 결정하였다.

2.3 pH별 흡착실험

Acid blue 40 200 mg/L 용액 50 mL를 pH 3~11인 완충용액을 사용하여 각각의 pH로 만든 후 100 mL PE

병에 넣고 왕복식 항온진탕기에서 298 K, 100 rpm 조건으로 24시간동안 흡착하였다. 그 결과로부터 pH가 흡착에 미치는 영향을 조사하였다.

2.4 등온흡착실험

Acid blue 40 200 mg/L 용액 50 mL를 침지된 활성탄을 100~700 mg의 범위에서 100 mg 씩 증가시키며 각각을 100 mL PE 병에 넣고 왕복식 항온진탕기에서 288~298 K 범위에서 100 rpm 조건으로 24시간동안 흡착하였다.

2.5 농도별 흡착속도실험

용액의 농도에 따른 흡착의 영향을 알아보기 위하여 왕복식 항온진탕기에서 298 K, 100 rpm 조건으로 100, 200, 300 mg/L 용액을 흡착하였다. 24시간 동안 1시간 단위로 용액의 상층액을 채취하여 acid blue 40의 흡광도를 측정하였다.

2.6 온도별 흡착속도실험

흡착온도에 따른 영향을 알아보기 위해 100 mL 유리병에 초기농도 200 mg/L의 acid blue 40 용액 50 mL를 넣고, 침지된 활성탄을 건조기준 질량으로 700 mg 투입한 다음, 288, 298, 308 K 각각의 온도에서 100 rpm의 속도로 흡착하였다. 24시간 동안 1시간 단위로 용액을 채취하여 그 결과로부터 열역학적 파라미터들을 알아보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 활성탄의 투입량 결정

초기 농도 200 mg/L의 acid blue 40 수용액 50 mL에 활성탄의 양을 100~900 mg 범위에서 100 mg 씩 증가시켜 넣은 후 왕복식 항온진탕기에서 298K, 100 rpm 조건에서 24시간 동안 흡착시킨 결과를 Figure 2에 나타내었다. 그림을 보면 활성탄의 양이 증가함에 따라 흡착률이 직선적으로 증가하는 최적의 활성탄 투입량은 95.48%의 흡착률을 나타내는 600 mg 이었다.

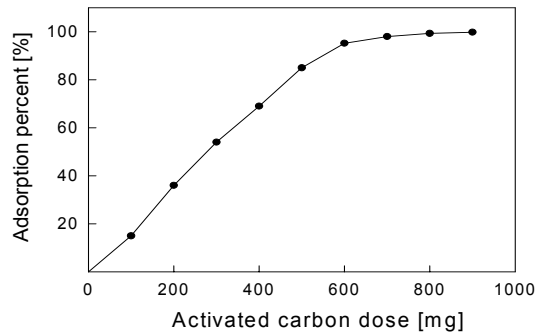


Fig. 2. Effect of activated carbon dose for adsorption of acid blue 40.

3.2 pH의 영향

Fig. 3을 보면 중성영역인 pH 7을 최솟기점으로 pH가 낮아지거나 높아질수록 흡착률이 증가하는 욕조형(bathtub) 현상을 나타내고 있다. 먼저 활성탄은 산성영역에서 표면이 양자화되어 + 전하를 띠게 되는데 acid blue 40은 물에 해리되어 음이온인 SO_3^- 이온을 가지고 있기 때문에 정전기적인 인력에 의하여 흡착이 일어나게 된다. pH가 높아져서 염기성으로 되면 활성탄의 표면은 - 전하를 갖게 되는데 이때는 acid blue 40이 가지고 있는 NH_2^+ 이온에 의해서 흡착이 일어나게 된다. 따라서 흡착 메커니즘은 정전기적 인력에 의한 것임을 알 수 있었다[7].

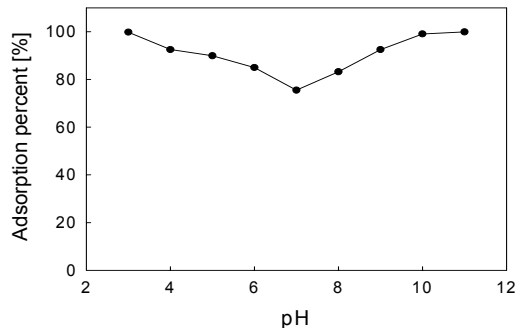


Fig. 3. Effect of pH for adsorption of acid blue 40.

3.3 흡착평형 해석

본 연구에서는 야자계 활성탄에 대한 acid blue 40의 흡착 반응에 대한 성질과 메커니즘에 대한 정보를 얻기 위해 흡착평형 실험값들을 흡착 등온식인 Langmuir, Freundlich 및 Temkin식에 각각 적용하여 보았다.

이들 흡착등온식은 다음과 같다.

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

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2)$$

$$q_e = B_T \ln A_T + B_T \ln C_e \quad (3)$$

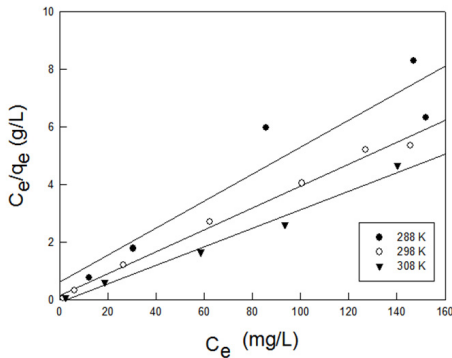


Fig. 4. Langmuir isotherm of acid blue 40 on activated carbon at different temperature.

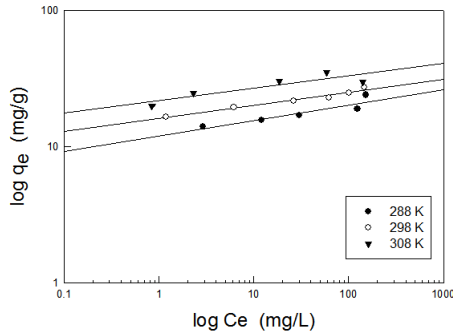


Fig. 5. Freundlich isotherm of acid blue 40 on activated carbon at different temperature.

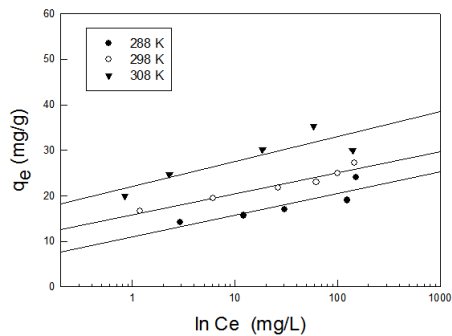


Fig. 6. Temkin isotherm of acid blue 40 on activated carbon at different temperature.

Table 2. Isotherm constants for adsorption of acid blue 40 on activated carbon.

Isotherms	Parameter	Temperature (K)		
		288	298	308
Langmuir	Qo(mg/g)	21.368	26.316	31.056
	b(L/mg)	0.073	0.241	0.389
	r ²	0.8857	0.9922	0.9855
	R _L	0.0641	0.0203	0.0130
Freundlich	K _F	11.688	16.032	22.513
	1/n	0.123	0.098	0.083
	r ²	0.8780	0.9633	0.7261
Temkin	A _T × 10 ⁷ (L/mg)	0.023	0.761	15.759
	B _T (J/mol)	2.058	2.003	2.393
	r ²	0.7802	0.9467	0.7632

세 개의 식에 대한 적합성을 상관계수(r^2)로부터 비교해 본 결과, Langmuir 식은 0.8857~0.9922 이고, Freundlich 식은 0.7261~0.9633, Temkin 식은 0.7632~0.946으로 나타났다. Acid blue 40의 흡착평형 관계는 Langmuir 등온식이 가장 적합함을 알 수 있었다. 따라서 활성탄에 의한 acid blue 40의 흡착은 단일층으로 흡착되는 것으로 판단되었다[8].

Langmuir 식에서 분리계수(R_L)를 구해보면 등온선의 모양이 흡착에 적합한지 부적합한지 구분할 수 있는데, 288, 298, 308 K 에서 각각 0.0621, 0.0203, 0.0130으로 흡착처리에 적합한 범위인 $0 < R_L < 1$ 에 해당되었다[9].

$$R_L = \frac{1}{1 + bC_0} \quad (4)$$

Freundlich 식에서 실제적인 흡착처리를 고려했을 때 흡착용량인 K_F 값은 클수록 좋은데 Table 2를 보면 온도가 상승함에 따라 증가하는 것으로 보아 흡착공정이 흡열반응으로 진행 것을 보여준다. 흡착 처리의 유효성을 판단할 수 있는 분리 계수($1/n$) 값을 보면 각 온도에서 각각 0.123, 0.098, 0.083 으로 효과적인 흡착공정이 가능한 $1/n < 0.5$ 에 속하는 것을 알 수 있었다[10].

Temkin 식은 상대적으로 일치도가 낮은 편이지만 흡착에너지를 통해 흡착공정을 판별할 수가 있다. 활성탄에 의한 acid blue 40의 흡착공정은 흡착에너지(B_T)가 2.003~2.393 J/mol이므로 물리흡착($B_T < 20$ kJ/mol)이라 할 수 있다[11].

3.4 흡착동력학적 해석

활성탄에 대한 Acid Blue 40의 흡착반응을 속도론적으로 알아보기 위해 다음과 같은 유사일차속도반응식(pseudo first order kinetics model)과 유사이차속도반응식(pseudo second order kinetics model)에 적용하여 보았다. 이 두 식은 아래와 같이 나타낸다.

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - k_1 t \quad (5)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (6)$$

여기서 q_e 는 평형상태에서 흡착된 Acid Blue 40의 양(mg/g)이고 q_t 는 시간 t 가 흐른 뒤에 흡착된 Acid Blue 40의 양(mg/g)이다. k_1 과 k_2 는 각각 유사일차속도상수(h^{-1})와 유사이차속도상수($g/mg \cdot h$)이다. 흡착속도실험데이터를 두 식에 적용하여 본 결과를 Figure 9~10에 나타냈다. 이들 그래프로부터 반응식의 파라미터 값들을 계산한 결과를 Table 3에 나타냈다.

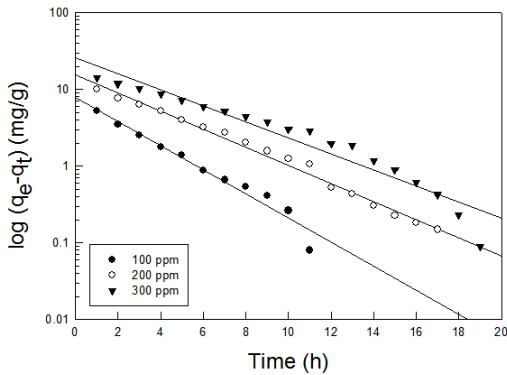


Fig. 7. Pseudo first order kinetic plots for adsorption of acid blue 40 by activated carbon at various concentration.

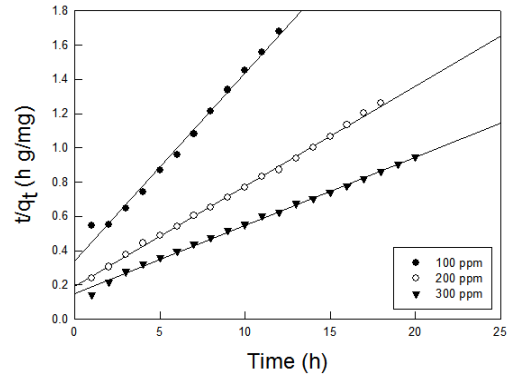


Fig. 8. Pseudo second order kinetic plots for adsorption of acid blue 40 by activated carbon at various concentration.

Table 3에서 속도식에 대한 일치도를 나타내는 상관 계수 값(r^2)을 비교해 보면 유사일차속도반응식의 r^2 값은 0.9947~0.9973로 평균이 0.9963이고 유사이차반응식은 r^2 값은 0.9914~0.9987로 평균이 0.9956로 나타났다. 두 식의 r^2 값을 비교하면 유사일차속도반응식이 큰 값을 나타내기 때문에 활성탄에 대한 Acid Blue 40의 흡착반응은 유사일차속도반응식을 더 잘 따르는 것을 알 수 있었다. 그리고 각 모델의 속도 상수값 k_1 과 k_2 를 비교하면 초기 농도값이 200 mg/L 일 때 가장 높고 나머지 두 농도에서는 낮은 것을 볼 수 있다. 또한 속도식에 의해 구해진 평형 흡착량($q_{e,cal}$)을 실험값($q_{e,exp}$)과 비교분석해 보기 위해 식 (7)을 사용하여 오차율(%)을 구하였다.

$$\text{오차율} = \frac{q_{e,cal} - q_{e,exp}}{q_{e,exp}} \times 100 \quad (7)$$

그 결과, 유사일차속도반응식은 초기농도 100, 200, 300 mg/L에 따라 각각 27.97, 19.45, 18.35 %로 평균

Table 3. Pseudo first order and Pseudo second order kinetic model parameters for adsorption of acid blue 40 by activated carbon at various concentration.

Initial concentration (mg/L)	$q_{e,exp}$ (mg/g)	Pseudo first order kinetic model			Pseudo second order kinetic model		
		$q_{e,cal}$	k_1	r^2	$q_{e,cal}$	k_2	r^2
100	9.1408	7.4114	0.3526	0.9968	7.4114	0.0350	0.9914
200	17.0648	12.7186	0.2323	0.9973	12.7186	0.0182	0.9987
300	25.0627	17.2066	0.1761	0.9947	17.2066	0.0107	0.9968

21.92%의 오차율이 나타났고 유사이차반응식의 오차율은 초기농도에 따라 각각 3.76, 10.97, 18.74 %로 평균 11.16%의 오차율이 나타났다. 따라서 유사이차반응식에 더 잘 따르는 것으로 판단된다.

3.5 열역학적 해석

흡착공정에 있어서 에너지와 엔트로피를 둘 다 고려하여 흡착공정이 자발적으로 일어나는지 판단할 수 있다. 열역학적 파라미터의 값들은 실제 공정운전에 중요한 지표가 될 수 있다. 활성탄에 대한 Acid Blue 40의 흡착에 있어서 반응온도가 미치는 영향을 조사하고자 Acid Blue 40에 대한 온도별 흡착실험을 실시하여 유사이차반응식에 적용하여 Fig. 9에 나타냈다. Table 4에 나타낸 바와 같이 298 K에서 속도상수와 평형흡착량이 높은 것으로 나타났다.

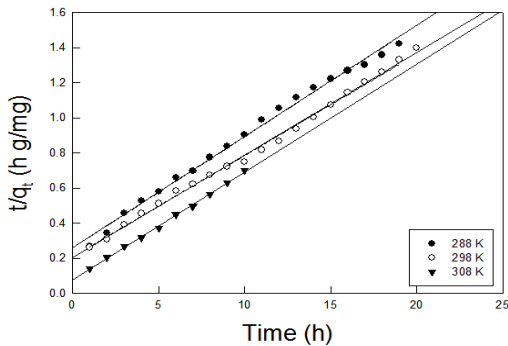


Fig. 9. Pseudo second order kinetic plots for adsorption of acid blue 40 by activated carbon at various temperature.

염료흡착에서의 유사이차속도상수 k_2 은 다음과 같이 Arrhenius형 관계식에 의해 온도의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\ln k_2 = \ln A - \frac{E_a}{RT} \tag{8}$$

여기서 E_a 는 흡착반응의 Arrhenius 활성화 에너지 (kJ/mol), A는 Arrhenius인자, R은 기체상수(8.314 J/mol K), T는 흡착조작 온도(K)이다. Table 4의 값을 이용하여 (8)식의 기울기(E_a/R)로부터 얻은 Acid Blue 40의 흡착반응의 활성화 에너지는 42.308 kJ/mol인 것으로 조사되었다.

Table 4. Pseudo second order kinetic model parameters for adsorption of acid blue 40 by activated carbon at various concentration.

Temperature (K)	$q_{e,exp}$ (mg/g)	Pseudo second order kinetic model		
		$q_{e,cal}$	k_2	r^2
288	9.1408	10.926	0.0155	0.9938
298	17.0648	12.939	0.0167	0.9966
308	25.0627	11.557	0.0494	0.9985

엔탈피와 엔트로피는 공정설계와 관련된 중요한 핵심 인자이다. 흡착공정의 흡열성과 타당성을 평가하기 위해 주로 자유에너지변화(ΔG^0), 엔탈피변화(ΔH^0) 및 엔트로피 변화(ΔS^0)와 같은 열역학 인자의 변화를 밝히는 것은 필수적이다. 본 연구에서는 열역학적 파라미터들에 대해서는 다음 식들을 이용하여 구하였으며, 그 결과를 Table 5에 나타냈다.

$$K_d = \frac{q_e}{C_e} \tag{9}$$

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_d \tag{10}$$

$$\ln K_d = \frac{\Delta S^0}{R} - \frac{\Delta H^0}{R} \frac{1}{T} \tag{11}$$

Table 5. Thermodynamic parameters for adsorption of acid blue 40 by activated carbon

Temperature (K)	ΔH^0 (J/mol)	ΔG^0 (kJ/mol)	ΔS^0 (J/mol*K)
288	80.088	-0.0553	279.93
298		-4.3609	
308		-5.5855	

흡착반응의 엔탈피변화가 양의 값(80.088 J/mol)을 갖는 것으로 볼 때 활성탄에 대한 Acid Blue 40의 흡착 반응은 흡열반응임을 알 수 있다. 또한 실험조건에서 엔탈피변화가 일정하다고 가정한 상태에서 298, 308, 318 K에서의 표준자유에너지변화는 온도가 증가할수록 감소한 결과를 나타냈다. 따라서 온도가 증가할수록 활성탄에 대한 Acid Blue 40흡착 공정의 자발성이 더 높아진다는 것을 알 수 있었다. 일반적으로 물리흡착의 자유

에너지변화 변화는 $-20 \sim 0$ kJ/mol이고, 화학흡착의 자유 에너지변화는 $-80 \sim -400$ kJ/mol로 알려져 있다[12]. 본 연구에서의 자유에너지변화값은 $-0.0553 \sim -5.5855$ kJ/mol로 흡착반응이 물리흡착이라는 것을 나타내준다 [13]. 엔트로피 변화 값이 양의 값(279.93 J/mol K)을 갖는 것은 활성탄에 Acid Blue 40의 흡착이 진행됨에 따라 Acid Blue 40의 주변에 고정되어 있던 물 분자들이 용액 중으로 방출됨으로써 전체 흡착시스템의 자유도가 증가함에 따른 결과로 판단된다[14].

4. 결론

본 연구에서 활성탄에 대한 Acid Blue 40의 흡착특성에 대하여 조사하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. Acid blue 40의 pH 별 특성은 pH 7을 최소기점으로 하여 점점 높아지는 욱조형 현상을 보이면서 염기성인 pH 11과 산성인 pH 3 양쪽에서 최대 흡착률을 나타내었다.
2. 활성탄에 대한 Acid Blue 40의 흡착평형관계를 흡착등온식에 적용해본 결과 Langmuir 식이 Freundlich 식과 Temkin 식보다 더 잘 맞는 것으로 나타났다. Langmuir 식과 Freundlich 식의 분리계수로 부터 활성탄에 의한 Acid Blue 40의 흡착처리가 유효한 흡착공정이 될 수 있음을 알았다.
3. Temkin 식에 의해 구한 흡착에너지가 2.003 ~ 2.393 J/mol인 것과 표준자유에너지변화가 $-0.0553 \sim -5.5855$ kJ/mol로 흡착공정이 물리흡착공정이라는 것을 알았다
4. 활성탄에 대한 Acid Blue 40의 흡착공정에 대한 동력학적 해석을 통해 반응속도식의 적용결과는 유사이차반응속도식이 유사일차속도반응속도식에 비해 일치도가 높은 것으로 나타났으며, 유사이차속도반응속도식으로부터 구한 평형흡착량은 실험값과 오차를 11.6% 이하로 잘 맞았다.
5. 평가된 활성화 에너지 값은 42.308 kJ/mol이었으며, 엔탈피변화 값이 80.088 J/mol로 흡열반응의 특성을 가지는 것으로 판단되었고, 또한 표준자유에너지변화가 $-0.0553 \sim -5.5855$ kJ/mol로 물리흡착공정임이면서 온도가 올라갈수록 흡착공정의 자발성이 더 높아진다는 것을 알았다.

References

- [1] A. Reife and H. S. Freeman, Pollution prevention in the production of dyes and pigments, *Text. Chem. Color. Am. Dyes. Rep.*, 32, 56-60, (2000)
- [2] I. A. W. Tan, A. L. Ahmad and B. H. Hameed, Adsorption of basic dye on high-surface-area activated carbon prepared from coconut husk: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies, *J. Hazard. Mater.* 154, 337 - 346, (2008)
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.031>
- [3] W. Z. Tang and H. An, Photocatalytic degradation kinetics and mechanism of acid blue 40 by TiO₂/UV in aqueous solution," Department of Civil and Environmental Engineering, Florida International University, Miami, FL 33199, USA (1995)
- [4] T. Akar., A. S. Ozcan., S. Tunali and A. Ozcan, Biosorption of a textile dye(acid blue 40) by cone biomass of Thuja orientalis: Estimation of equilibrium, thermodynamic and kinetic parameters, *Biores. Technol.* 99(8), 3057-3065, (2008)
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.029>
- [5] M. Ozacar and I. A. Seagil, Adsorption of acid dyes from aqueous solution by calcined alunite and granular activated carbon." Department of chemistry, Science and arts Faculty, Sakarya University, 54100 Sakarya, Turkey, 2002.
- [6] M. L. Ferrterolf, H. V. Patel and J. M. Jennings, Adsorption of methylene blue and acid blue 40 on titania from aqueous solution, *J. Chem. Emng. Data.*, 48(4) 831-835, (2003)
DOI: <https://doi.org/10.1021/je025589r>
- [7] W. T. Tsai, Y. M. Chang, C. W. Lai and C. C. Lo, Adsorption of ethyl violet dye in aqueous solution by regenerated spent bleaching earth", *J. Coll. Interf. Sci.*, 289, 333 - 338, (2005),
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.03.087>
- [8] J. J. Lee, Isotherm, kinetic and thermodynamic characteristics for adsorption congo red by activated carbon, *Korean Chem. Eng. Res.*, 53(1), 1-7, (2015)
DOI: <https://doi.org/10.9713/kcer.2015.53.1.64>
- [9] A. S. Elsherbiny, Adsorption kinetics and mechanism of acid dye onto montmorillonite from aqueous solutions: stopped-flow measurements, *Appl. Clay. Sci.*, 83-84, 56-62, (2013)
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2013.07.014>
- [10] J. J. Lee, Equilibrium, kinetics and thermodynamic parameters studies on metanil yellow dye adsorption by granular activated carbon, *Appl. Chem. Eng.*, 25, 96-102, (2014)
DOI: <https://dx.doi.org/10.14478/ace.2013.1.122>
- [11] S. Nethaji, A. Sivasamy, G. Thenarasu and S. Saravanan, Adsorption of malachite green dye onto activated carbon derived from borassus aethiopicum flower biomass", *J. Hazard. Mater.*, 181, 271 - 280, (2010)
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.008>
- [12] Y. Önal, C. A. BaŞar, D. Eren, Ç. S. Önalzdemir and T. Depci, Adsorption kinetics of malachite green onto activated carbon prepared from tunçbilek lignite, *J.*

Hazard. Mater. B128, 150-157, (2006)
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.055>

- [13] Hameed, B., El-Khaiary, M. Kinetics and equilibrium studies of Malachite Green adsorption on rice straw-derived char, *J. Hazard. Mater.*, 153, 701-708, (2008)
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.019>
- [14] M. T. Sulak, E. Demirbas, M. Koby, Removal of astrazon yellow 7GL from aqueous solutions by adsorption onto wheat bran", *Biores. Technol.* 98, 2590 - 2598, (2007)
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2006.09.010>
-

이 종 집(JongJibLee)

[정회원]



- 1983년 8월 : 인하대학교 공과대학 원 화학공학과 (공학석사)
- 1987년 8월 : 인하대학교 공과대학 원 화학공학과 (공학박사)
- 1990년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 화학공학부 교수

<관심분야>

청정기술, 은나노 합성, 화학제품