

활성탄에 의한 아마란스 염료의 흡착동력학에 관한 연구

이 종 집*

공주대학교 화학공학부
331-717 충청남도 천안시 서북구 부대동 275

(2011년 2월 21일 접수; 2011년 3월 23일 1차 수정본 접수; 2011년 3월 25일 2차 수정본 접수; 2011년 3월 25일 채택)

Study on Adsorption Kinetic of Amaranth Dye on Activated Carbon

Jong-Jib Lee*

School of Chemical Engineering, Kongju National University, 275 Budae-dong, Seobuk-gu, Cheonan, Chungcheongnam-do 331-717, Korea

(Received for review February 21, 2011; 1st Revision received March 23, 2011; 2st Revision received March 25, 2011; Accepted March 25, 2011)

요 약

입상활성탄에 의한 아마란스 염료의 흡착특성을 회분식 실험을 통해 조사하였다. 아마란스 염료의 흡착동력학적 연구는 298, 308, 318 K에서 초기농도 100, 200, 300 mg/L의 수용액을 가지고 수행하였다. 입상활성탄에 의한 아마란스 염료의 흡착 평형관계는 298 K에서 Langmuir 등온식이 잘 적용되었다. 유사일차반응속도식과 유사이차반응속도식을 사용하여 동력학 실험값을 평가한 결과, 유사이차반응속도식이 더 잘 맞았으며, 속도상수(k_2) 값은 아마란스 초기농도 100, 200, 300 mg/L에 대해 각각 0.1076, 0.0531 및 0.0309 g/mg · h로 조사되었다. 활성화에너지, 표준엔탈피, 표준엔트로피 및 표준자유에너지를 평가하였다. 조사된 표준자유에너지값은 초기농도 200 mg/L에서 -5.08 ~ -8.10 kJ/mol로 자발적인 공정임을 알 수 있었다. 엔탈피변화량이 양의 값인 38.89 kJ/mol을 나타내어 활성탄에 대한 아마란스 염료의 흡착이 흡열반응으로 일어난다는 것을 알 수 있었다.

주제어 : 아마란스, 흡착, 활성탄, 흡착 동력학, 염료흡착

Abstract : The adsorption characteristics of amaranth dye by granular activated carbon were experimentally investigated in the batch adsorption. Kinetic studies of adsorption of amaranth dye were carried out at 298, 308 and 318 K, using aqueous solutions with 100, 200 and 300 mg/L initial concentration of amaranth. It was established that the adsorption equilibrium of amaranth dye on granular activated carbon was successfully fitted by Langmuir isotherm equation at 298 K. The pseudo first order and pseudo second order models were used to evaluate the kinetic data and the pseudo second order kinetic model was the best with good correlation. Values of the rate constant (k_2) have been calculated as 0.1076, 0.0531, and 0.0309 g/mg h at 100, 200 and 300 mg/L initial concentration of amaranth, respectively. Thermodynamic parameter such as activation energy, standard enthalpy, standard entropy and standard free energy were evaluated. The estimated values for standard free energy were -5.08 - -8.10 kJ/mol over activated carbon at 200 mg/L, indicated toward a spontaneous process. The positive value for enthalpy, 38.89 kJ/mol indicates that adsorption interaction of amaranth dye on activated carbon is an endothermic process.

Keywords : Amaranth, Adsorption, Activated carbon, Adsorption kinetics, Dye adsorption

1. 서 론

아마란스(amaranth) 염료는 Trisodium 2-hydroxy-1-(4-sulpho-nato-1-naohtylazo) naphthalene-3,6 -disulphonate로 나타내지는 아조계의 적색염료로 섬유, 종이, 페놀-포르말데히드 수지, 목재 및 피혁 등에 광범위하게 사용되고 있다. 아마란스 염료는 1908년부터 식품과 음료수의 착색제(적색 2호인 FD & C Red No.2)로에 사용되어 왔지만 미국에서 안정성과 관

련한 논쟁이 가장 많았던 색소중의 하나로써 종양, 혈관부종, 알러지, 호흡곤란 등의 유해성을 가졌으며, 발암가능성이 제기되고 있는 이유로 법적으로 사용금지 되었다[1,2].

이와 같은 유해성에 착안하여 아마란스 염료를 효과적으로 제거하기 위한 연구가 진행되어 Mittal et al.[3]이 bottom ash 와 de-oiled soya를 흡착제로 이용하여 아마란스 염료를 흡착하는 실험을 통해 흡착평형관계는 Langmuir 식이 Freundlich 식보다 약간 더 잘 맞으며, 흡착공정은 30, 40, 50 °C에서 자발적인 흡열반응으로 진행되며, bottom ash의 경우 낮은 농도에서는 필름확산공정(film diffusion process), 높은 농도에서

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: jjlee@kongju.ac.kr

는 입자확산공정(particle diffusion process)이 지배적이며, de-oiled soya의 경우에는 아주 높은 농도에서 필름확산공정이 없이 오로지 입자확산공정만이 일어난다고 발표하였다. Fan et al.[4]은 아마란스 염료를 활성탄소섬유로 만든 전극을 가진 전기화학적 장치를 이용하여 흡착하는 실험을 통해 효과적인 흡착이 가능함을 보고하였고, Zargar et al.[5]이 cetyl trimethyl ammonium bromide를 코팅한 산화철 나노입자를 사용하여 온도와 pH의 영향, 전해농도를 조사하였으며, 탈착용제로 메탄올이 좋다는 것을 밝혀냈다. 그러나 값이 싸면서도 유기물에 대한 흡착능이 우수한 흡착제인 활성탄을 사용한 연구는 찾아보기 힘들다.

본 연구에서는 아마란스 염료를 입상 활성탄을 사용하여 등온흡착 및 흡착속도 실험을 통해 얻은 회분식 흡착평형자료와 고정층 흡착탑 실험자료를 분석하여 흡착처리의 타당성과 설계변수들에 대해 연구한 전보[6]에 이어, 아마란스 염료에 대한 등온흡착 및 흡착속도 실험을 통하여 초기농도와 흡착온도 등이 흡착반응에 미치는 영향을 검토하고, 흡착평형과 반응속도론적인 해석 및 열역학적 자료를 평가하여 수용액에 포함된 아마란스 염료가 활성탄에 흡착되는 공정을 동력학적으로 고찰을 해 보고자 하였다.

2. 실험

2.1. 활성탄 및 Amaranth

흡착제로 사용된 활성탄은 역청탄을 원료로 하여 수증기활성화법으로 제조한 8×30 mesh(평균입경 1.638 mm, 비표면적 1.735 m²/g) 크기의 입상활성탄(C사 제품)이다. 실험에 사용하기 전에 순수로 수회 세척한 후 건조기에서 105±1 °C에서 12시간 건조하여 사용하였다.

실험대상으로 선정한 아마란스 염료는 Sigma Aldrich사의 특급시약을 사용하였으며, Figure 1에 나타낸 바와 같이 C₂₀H₁₁N₂Na₃O₁₀S₃의 분자식을 갖는 방향족 아조계 화합물로, 주로 식용색소(FD & C Red Dye No. 2)와 적색염료(Acid Red 27)로 사용된다. 아마란스 염료의 농도는 자외선/가시광선 흡수분광계(UV-Visible spectrophotometer, Shimadzu, UV-160A)를 사용하여 고유최대흡수파장 522.5 nm에서 검량선에 의한 방법으로 분석하였다.

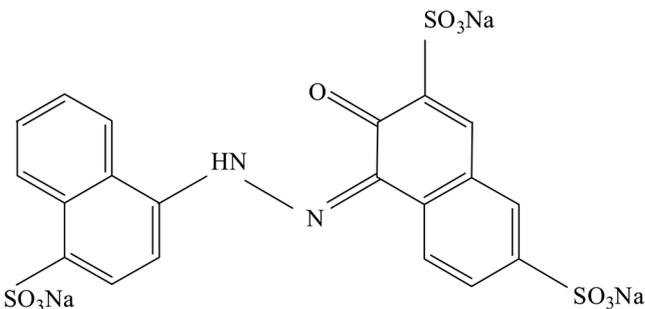


Figure 1. Molecular structure of amaranth dye.

2.2. 등온흡착평형실험

초기농도 100 mg/L의 아마란스 염료용액 50 mL에 침지된 활성탄을 0.05~0.1 g 범위에서 서로 다르게 첨가한 후 298 K에서 100 rpm의 속도로 항온진탕기에서 12시간 진탕하여 흡착평형에 도달했을 때 용액을 여과, 분리하여 여액 중에 남아있는 아마란스 염료의 농도를 측정하고, 그 결과를 각각 Langmuir 식과 Freundlich 식에 적용하여 흡착등온선을 구하여 고찰하였다.

2.3. 흡착평형속도실험

초기농도 100, 200, 300 mg/L의 아마란스 염료용액 50 mL에 활성탄 0.1 g을 넣고, 298 K에서 왕복식 항온진탕기로 진탕속도를 100 rpm으로 하여 흡착시키면서, 용액내의 농도를 시간별로 분석하여 흡착평형이 이루어질 때까지 평가한 결과를 흡착동력학적으로 고찰하였다.

2.4. 온도별 흡착평형실험

초기농도 200 mg/L의 아마란스 염료용액 50 mL에 침지된 활성탄을 0.1 g 첨가한 후, 왕복식 항온진탕기에서 298, 308, 318 K에서 100 rpm의 속도로 12시간 진탕하여 흡착평형에 도달했을 때 용액을 여과, 분리하여 여액 중에 남아있는 아마란스 염료의 농도를 측정하여 이 결과로부터 열역학적 파라미터들을 구해 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 흡착평형 해석

아마란스 염료의 초기농도를 100 mg/L의 용액 50 mL에 시료활성탄 0.05~0.1 g을 넣고, 등온흡착실험을 수행하여, 각각의 평형농도를 분석한 결과로부터 흡착등온선을 구하였다. 평형흡착량, q_e (mg/g)는 다음 식에 의해 구해진다.

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) V}{W} \tag{1}$$

여기서 C_o와 C_e (mg/L)는 각각 흡착질의 초기농도와 평형농도를 나타낸다. V는 용액의 부피(L)이고, W는 흡착제의 건조질량(g)이다. 본 연구에서는 아마란스 염료의 흡착반응기구를 규명하기 위해 흡착평형값을 각각 다음과 같은 Langmuir 식과 Freundlich 식에 적용하여 보았다.

먼저 Langmuir는 흡착질이 흡착제의 표면에 있는 한정된 수의 흡착부위에 단분자층을 형성하는 것에 의해 일어난다고 가정하여 다음과 같은 식을 제안 하였다.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_o b} + \frac{1}{Q_o} C_e \tag{2}$$

여기서 C_e는 흡착질의 평형농도(mg/L), q_e는 흡착제 단위질량당 흡착된 흡착질의 양(mg/g), Q_o와 b는 흡착용량과 흡착속

도와 관련된 Langmuir 상수이다.

Langmuir 형 흡착공정에서는 다음 식으로 정의되는 무차원 분리계수 R_L 에 의해 등온선의 모양이 흡착에 적합(favourable)한지 부적합(unfavourable)한지 구분할 수가 있는데, $R_L > 1$ 은 부적합, $R = 1$ 은 선형(linear), $R_L = 0$ 은 비가역(irreversible), $0 < R_L < 1$ 은 적합하다고 알려져 있다[7].

$$R_L = \frac{1}{(1 + b C_o)} \quad (3)$$

한편 Freundlich의 흡착등온식은 흡착제의 표면이 불균일한 표면에너지를 갖는다고 가정한 식으로 다음과 같은 직선식이 잘 알려져 있다.

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

여기서 C_e 는 흡착질의 평형농도(mg/L), q_e 는 흡착제 단위질량당 흡착된 흡착질의 양(mg/g), K_F 와 n 은 흡착공정이 얼마나 알맞은가를 나타내는 지표로 사용되는 Freundlich 상수로 K_F 는 흡착용량을 나타내며 분배계수로도 정의된다. $1/n$ 의 기울기 값은 0~1의 값을 가지며, 흡착강도 또는 표면 불균일성을 나타내는데 불균일성이 높을수록 0에 가까워진다[8]. 또 Fukukawa[9]는 $1/n$ 값이 0.1~0.5일 때 효과적인 흡착처리가 가능하다고 하였다.

Figure 2와 Figure 3은 각각 Langmuir 흡착등온선과 Freundlich 흡착등온선을 나타낸 것이며, 회귀계산에 의해 구한 두식의 상수 값들을 Table 1에 나타냈다.

두 식에 대한 적합성을 비교해 본 결과, Langmuir 식에 대한 상관계수는 0.997이고 Freundlich 식에 대한 상관계수는 0.983으로 활성탄에 의한 아마란스 염료의 흡착반응은 Langmuir 식에 약간 더 잘 맞는 것으로 나타났다. 따라서 활성탄에 의한 아마란스 염료의 흡착은 흡착질이 단일층을 형성하여 흡착되는 것으로 생각할 수 있다. 또한 298 K에서 Langmuir

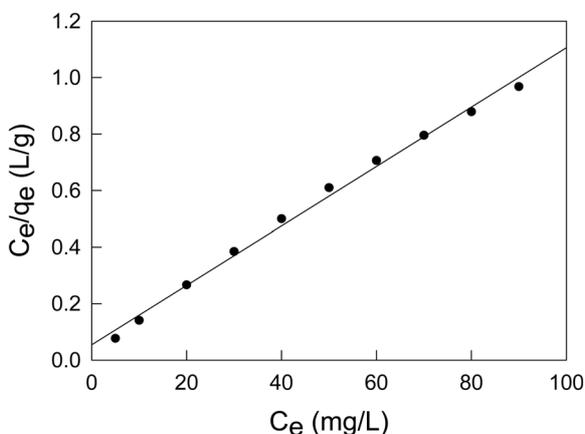


Figure 2. Langmuir isotherms of amaranth dye on activated carbon at 298 K.

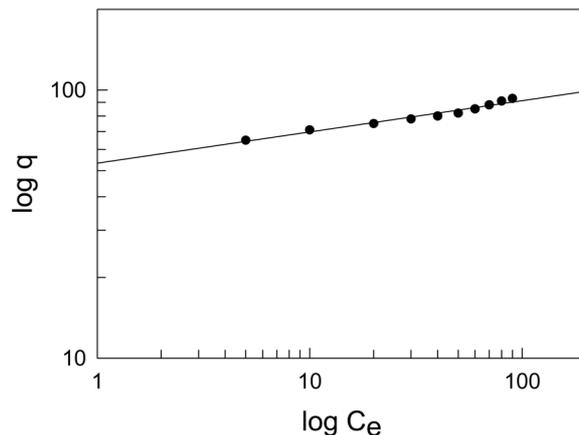


Figure 3. Freundlich isotherms of amaranth dye on activated carbon at 298 K.

Table 1. Langmuir and Freundlich isotherm constants for adsorption of amaranth dye on activated carbon at 298 K

Langmuir constants				Freundlich constants		
Q_0 (mg/g)	b (L/mg)	R_L	r^2	K_F (mg/g)(L/mg) ^{1/n}	$1/n$	r^2
95.12	0.19	0.05	0.997	53.35	0.117	0.983

식의 분리계수 R_L 을 계산 해 본 결과, 0.05로 조사되었다. 따라서 활성탄에 의한 적합하다는 것을 확인 할 수 있었다.

Freundlich 식에 대한 분석에 의해 $K_F = 53.35$ (mg/g)(L/mg)^{1/n}, $1/n = 0.117$ 이 얻어졌는데, 조사된 $1/n$ 값에 의해 아마란스 염료의 흡착공정이 약간의 표면불균일성을 가지는 것과 함께 효과적인 처리가 가능한 수준임을 알 수 있다.

3.2. 흡착속도론적 해석

아마란스 염료의 초기농도를 변화시켰을 때의 흡착량 변화를 알아내기 위해 아마란스 염료의 초기농도를 100, 200, 300 mg/L으로 하고 활성탄을 0.1 g 투입한 다음 100 rpm의 속도로 흡착평형에 도달할 때까지 교반하면서 일정시간대 별로 잔존농도를 분석한 결과 Figure 4와 같은 결과를 얻었다. 입상활성탄에 대한 아마란스 염료의 흡착속도는 약 1시간 정도면 초기농도의 67~85%까지 흡착되지만 이후의 흡착속도는 느려져서 최종 흡착평형에 도달하는데 걸리는 시간은 약 5시간으로 관찰되었다.

활성탄에 대한 아마란스 염료의 흡착반응을 속도론적으로 살펴보기 위해 식 (5), (6)과 같은 유사일차반응식(pseudo first order kinetics model)와 유사이차반응식(pseudo second order kinetics model)에 적용하여 보았다.

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

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

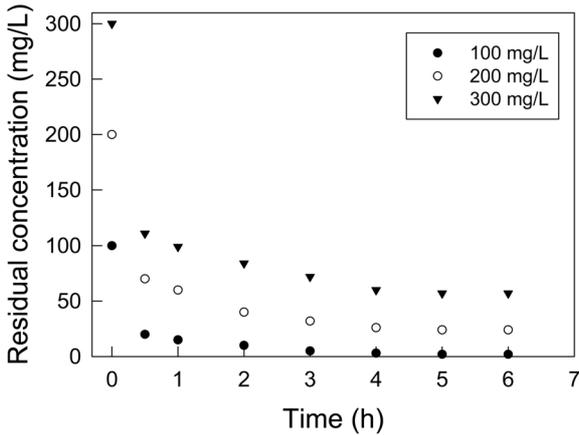


Figure 4. Adsorption kinetic curves of amaranth dye at different initial concentration.

여기서 q_e 와 q_t 는 각각 평형상태와 t 시간에서 흡착된 아마란스 염료의 양(mg/g)이며, k_1 은 유사일차흡착반응속도상수 (h^{-1}), k_2 는 유사이차흡착반응속도상수($g/mg \cdot h$)이다. 흡착속

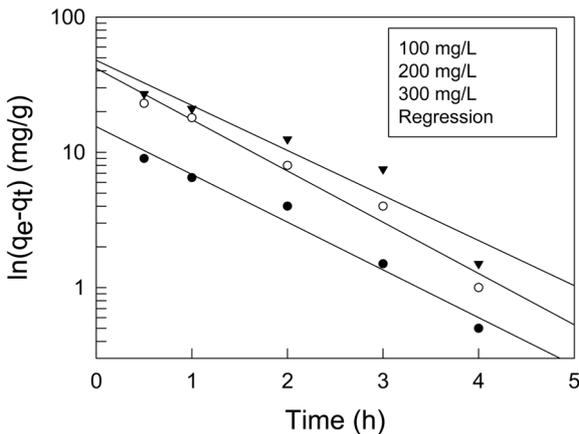


Figure 5. Pseudo first order kinetics of amaranth dye onto activated carbon at different initial concentration.

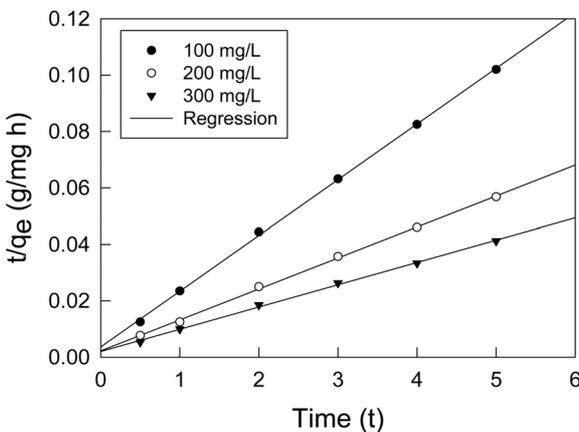


Figure 6. Pseudo second order kinetics of amaranth dye onto activated carbon at different initial concentration.

Table 2. Pseudo first order and pseudo second order kinetic model parameters for different initial amaranth dye concentration at 298 K

Initial concentration (mg/L)	$q_{e,exp}$ (mg/g)	Pseudo first order kinetic model			Pseudo second order kinetic model		
		$q_{e,cal}$ (mg/g)	k_1 (h)	r^2	$q_{e,cal}$ (mg/g)	k_2 (g/mg h)	r^2
100	49.21	15.49	0.813	0.9871	50.60	0.1076	0.9998
200	88.34	41.72	0.873	0.9874	91.13	0.0531	0.9996
300	121.57	47.87	0.767	0.9583	126.60	0.0309	0.9992

도실험데이터를 위식들에 적용하여 본 결과는 Figure 5와 Figure 6과 같이 직선으로 나타났다. 이들 그래프로부터 속도식의 파라미터 값들을 계산한 결과를 Table 2에 나타냈다.

Table 2에서 알 수 있듯이 속도식에 대한 일치도를 나타내는 상관계수 값을 비교해 보면 유사이차흡착반응속도식의 상관계수가 0.9992~0.9998로 유사일차흡착반응속도식의 상관계수 0.9583~0.9874 보다 크기 때문에 활성탄에 대한 아마란스 염료의 흡착반응은 유사이차흡착반응속도식을 더 잘 따르는 것을 알 수 있었다. 유사이차흡착반응속도식의 속도상수와 평형흡착량을 조사해 보면 초기농도가 증가할수록 속도상수 k_2 값은 감소하는 것으로 나타났다. 유사이차흡착반응속도식에 의해 구한 평형흡착량($q_{e,cal}$) 값들에 대한 오차율은 다음 식에 의해 계산하였다. 아마란스 염료의 초기농도가 100, 200, 300 mg/L일 때 오차율은 각각 2.82%, 3.16%, 4.14%로 나타나 5% 이내의 오차율 범위에서 잘 맞는 것으로 나타났다.

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

3.3. 열역학적 해석

흡착공정에 있어서 에너지와 엔트로피를 둘 다 고려해 주어야만 흡착공정이 자발적으로 일어날지를 판단할 수 있다. 열역학적 파라미터의 값들은 실제적인 공정운전에 중요한 지표가 될 수 있다. 활성탄에 대한 아마란스 염료의 흡착에 있어서 반응온도가 미치는 영향을 조사하고자 아마란스 염료의 초기농도를 200 mg/L로 하고 반응온도를 298, 308, 318 K로 변화시켜가면서 시간에 따른 흡착량의 변화를 알아보았다. Figure 7과 같이 반응온도가 증가할수록 평형흡착량은 증가하는 것으로 나타났으며, 이 결과를 식 (5)의 유사이차흡착반응속도식에 적용하여 각 반응온도에서의 속도상수 및 평형흡착량을 계산한 결과는 Table 3에 나타난 바와 같이 반응온도가 증가할수록 평형흡착량은 증가하지만 속도상수는 $0.0531 > 0.0360 > 0.0332$ 순으로 감소하는 것으로 나타났다.

염료흡착에서의 유사이차반응속도상수 k_2 는 다음과 같은 Arrhenius형 관계식에 의해 온도의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\ln k_2 = \ln A - \frac{Ea}{RT} \quad (8)$$

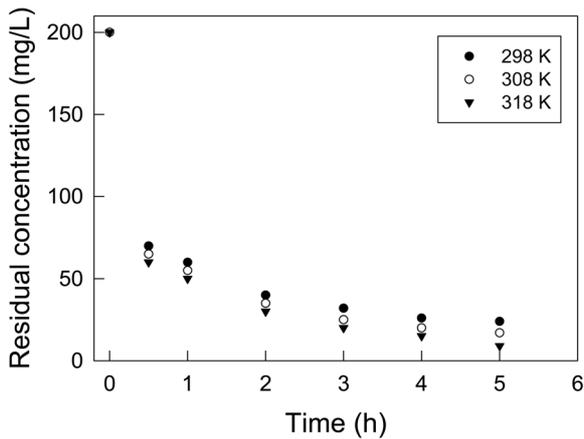


Figure 7. Adsorption kinetic curves of amaranth dye at different temperature.

Table 3. Pseudo second order kinetic model parameters of amaranth dye onto activated carbon at different temperature

Temperature (K)	Experimental equilibrium capacity $q_{e,exp}$ (mg/g)	Pseudo second order kinetic model		
		Calculation equilibrium capacity, $q_{e,cal}$ (mg/g)	Rate constant k_2 (g/mg h)	Correlation factor r^2
298	88.34	91.13	0.0531	0.9996
308	91.52	96.41	0.0360	0.9997
318	95.54	100.08	0.0332	0.9994

여기서 E_a 는 흡착반응의 Arrhenius 활성화에너지(kJ/mol), A 는 Arrhenius 인자, R 은 기체상수(8.314 J/mol · K), T 는 흡착 조작 온도(K)이다. Nollet 등[10]은 흡착에너지의 등급에 따라 물리흡착과 화학흡착으로 나누었는데, 낮은 활성화에너지(5~40 kJ/mol)은 물리흡착의 특성을 가지며 높은 활성화에너지(40~800 kJ/mol)은 화학흡착의 특성을 갖는다고 하였다.

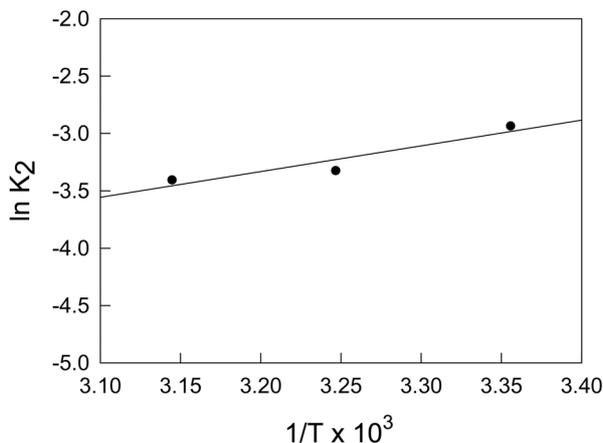


Figure 8. Plot of $\ln k_2$ vs. $1/T$ for estimation of thermodynamic parameters for adsorption of amaranth dye onto activated carbon.

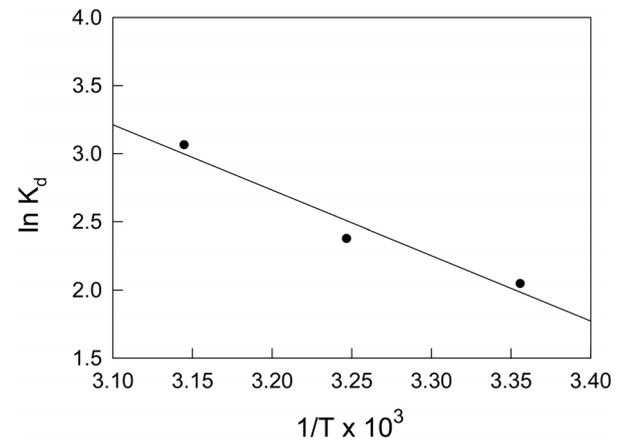


Figure 9. Plot of $\ln k_d$ vs. $1/T$ for estimation of thermodynamic parameters for adsorption of amaranth dye onto activated carbon.

Table 4. Thermodynamic parameters calculated with the pseudo second order rate constant for amaranth dye onto activated carbon

Temperature (K)	K_d	ΔH° (kJ/mol)	ΔG° (kJ/mol)	ΔS° (J/mol K)
298	7.756		-5.08	
308	10.792	39.88	-6.09	150.33
318	21.422		-8.10	

Figure 8과 같이 식 (8)을 이용하여 $\ln k_2$ 와 $1/T$ 의 관계를 나타내면 직선의 기울기(E_a/R)로부터 얻은 아마란스 염료의 흡착반응의 활성화에너지는 25.29 kJ/mol인 것으로 조사되어, 아마란스 염료의 흡착은 물리흡착의 특성을 갖는 것임을 알 수 있다.

다른 열역학적 파라미터들인 표준자유에너지(ΔG°), 표준엔탈피(ΔH°) 및 표준엔트로피(ΔS°)는 다음 식들을 이용하여 구하였다. 식 (11)에 따라 $\ln k_2$ 와 $1/T$ 의 관계를 나타낸 것이 Figure 9이며, 기울기와 절편으로부터 구한 값들을 Table 4에 나타냈다.

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

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

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

흡착반응의 표준엔탈피변화는 39.88 kJ/mol로 양의 값을 가지기 때문에 활성탄에 대한 아마란스 염료의 흡착반응은 흡열반응임을 알 수 있다. 또한 실험조건에서의 표준엔탈피변화가 일정하다고 가정한 상태에서, 298, 308, 318K에서의 표준자유에너지변화는 온도가 증가할수록 $-5.08 > -6.09 > -8.10$

kJ/mol 순으로 감소하였는데, 이것은 온도가 증가할수록 활성탄에 대한 아마란스 염료의 흡착이 더 자발적으로 일어난다는 것을 의미한다. 흡착현상은 동일한 흡착제라고 하더라도 흡착제에 따라 흡열 또는 발열반응, 물리흡착 또는 화학흡착으로 달라지는 경우가 많은데, 본 실험의 결과는 활성탄으로 에오신(eosin) 염료를 흡착한 결과와 탈지한 겨자(mustard)로 에리스로신(erythrosine) 염료를 흡착한 결과와 일치한다 [11,12]. 또한 실험값들은 일반적인 물리흡착의 자유에너지 변화 범위인 -20~0 kJ/mol에 들어가므로, 활성탄에 대한 아마란스 염료의 흡착반응이 물리흡착이라는 것을 나타내준다 [13]. 한편 엔트로피 변화값이 양의 값(150.33 J/mol·K)으로 나타난 것은 활성탄에 아마란스 염료의 흡착이 진행됨에 따라 흡착종의 자유도가 증가하여 고체와 액체계면에서의 무질서도가 증가한다는 것을 나타낸다[14,15].

4. 결론

본 연구에서 활성탄에 대한 아마란스 염료의 흡착평형과 흡착역학에 대하여 조사하였다. 입상활성탄에 대한 아마란스 염료의 흡착속도는 약 1시간 정도면 초기농도의 67~85%까지 흡착되지만 이후의 흡착속도는 느려져서 최종 흡착평형에 도달하는데 걸리는 시간은 약 5시간으로 관찰되었다. 아마란스 염료의 초기농도가 증가할수록 활성탄에 대한 흡착량이 증가하는 것으로 나타났다. 이 실험값들을 반응속도식에 적용하여 본 결과, 유사이차반응속도식에 대한 상관계수가 0.997~0.999로 유사일차흡착반응식의 상관계수 0.968~0.994로 컸으며, 실험으로 구한 평형흡착량과 유사이차반응속도식에 의해 구한 평형흡착량의 계산값은 오차율 5% 이내로 일치도가 높아 본 흡착반응은 유사이차반응으로 진행됨을 알았다. 흡착평형관계를 등온흡착식에 적용하여 본 결과 Langmuir 흡착 등온식에 더 잘 맞는 것으로 나타났다. 유사이차반응속도상수로 부터 평가된 활성화에너지값은 25.29 kJ/mol로 물리흡착임을 알았다. 표준자유에너지가 -5.08 ~ -8.10 kJ/mol로 흡착반응이 물리흡착이며 자발적으로 일어난다는 것을 알 수 있었다. 또한 흡착반응온도가 높아질수록 평형흡착량이 증가하는 경향을 보여 흡열반응의 특성을 가지는 것으로 판단되었다. 이것은 흡착반응의 표준엔탈피변화는 39.88 kJ/mol로 양의 값을 가지는 것에 의해 확인되었다.

참고문헌

1. Korea Food & Drug Administration, "Food Additives Code," Dongwon Publisher, 2002, pp. 182-212.
2. Ha, S. D., Park, K. H., Moon E. S., Ko, M. H., Ryu, K., and Cho Y. H., "Blind Side of Colorant," *Food Science and Industry*, **38**(4), 105-112 (2005).
3. Mital, A., Kurup, L., and Gupta, V. K., "Use of Waste Materials-Bottom Ash and De-Oiled Soya, as Potential Adsorbents for the Removal of Amaranth from Aqueous Solutions," *J. Harzad Mater.*, **B117**, 171-178 (2005).
4. Fam, L., Zhou, Y., Yang, W., Chen, G., and Yang, F., "Electrochemical Degradation of Amaranth Aqueous Solution on ACF," *J. Harzad Mater.*, **B137**, 1182-1188 (2006).
5. Zargar, B., Parham, H., and Hatamie, A., "Fast Removal and Recovery of Amaranth by Modified Iron Oxide Magnetic Nanoparticles," *Chemosphere*, **76**, 554-557 (2009).
6. Lee, J. J., "Removal of Amaranth by Activated Carbon Adsorption," *J. Korean Soc. Safety*, **24**(4), 34-39 (2009).
7. Weber, T. W., and Chakrabarti, R. K., "Pore and Solid Diffusion Kinetics in Fixed Bed Adsorption Under Constant Pattern Conditions," *Ind. Chem. Eng. Fund.*, **5**, 212-223 (1996).
8. Tan, I. A. W., Ahmad, A. L., and Hameed, B. H., "Adsorption of Basic Dye on High-surface-area Activated Carbon Prepared from Coconut Husk," *J. Hazard. Mater.*, **154**, 337-346 (2008).
9. Fukukawa, B. H., "Activated Carbon Water Treatment Technology and Management," Donghwa Technology, 2003, p. 69.
10. Nollet, H., Roels, M., Lutgen, P., Van der Meer, P., and Verstraete, W., "Removal of PCBs from Wastewater Using Fly Ash," *Chemosphere*, **53**(6), 655-665 (2003).
11. Purkait, M. K., DasGupta, S., and De, S., "Adsorption of Eosin Dye on Activated Carbon and its Surfactant Based Desorption," *J. Environ. Manage.*, **76**(2) 135-142 (2005).
12. Jain, R., and Sikarwar, S., "Adsorptive Removal of Erythrosine Dye onto Activated Low Cost De-oiled Mustard," *J. Hazard. Mater.*, **164**, 627-633 (2009).
13. Jaycock, M. J., and Parfitt, G. D., "Chemistry of Interfaces," Ellis Horwood Ltd., Chichester (1981).
14. Sulak, M. T., Demirbas, E., and Kobya, M., "Removal of Astrazon Yellow 7GL from Aqueous Solutions by Adsorption onto Wheat Bran," *Bioresour. Technol.*, **98**, 2590-2598 (2007).
15. Özcan, A., and Özcan, A. S., "Adsorption of Acid Red 57 from Aqueous Solutions onto Surfactant-modified Sepiolite," *J. Hazard. Mater.*, **B125**, 252-259 (2005).