

입상활성탄에 의한 Cibacron Brilliant Red 3B-A의 흡착거동 및 동력학적 특성

이종집[†]

공주대학교 화학공학부
331-717 충남 천안시 서북구 부대동 275
(2014년 1월 29일 접수, 2014년 3월 12일 수정본 접수, 2014년 3월 18일 채택)

Adsorption Behavior and Kinetic Characteristic of Cibacron Brilliant Red 3B-A by Granular Activated Carbon

Jong Jib Lee[†]

Division of chemical Engineering, Kongju National University, 275 Budae-dong, Seobuk-gu, Cheonan, Chungnam 331-717, Korea
(Received 29 January 2014; Received in revised form 12 March 2014; accepted 18 March 2014)

요 약

본 연구는 입상활성탄을 사용하여 수용액으로부터 cibacron brilliant red 3B-A의 흡착 거동과 동력학적 특성에 대해 회분식 실험을 통해 알아보았다. 흡착변수로는 흡착제의 양, pH, 초기농도와 접촉시간과 온도를 사용하였다. 평가된 Langmuir 상수(R_L)와 Freundlich 상수($1/n$)로부터 활성탄에 의한 cibacron brilliant red 3B-A의 흡착조각이 적절한 처리방법이 될 수 있음을 알았고, Temkin 상수(B)와 Dubinin-Radushkevich 상수(E)로부터 물리흡착공정임을 알았다. 흡착공정에 대한 동력학적 해석을 통해 반응속도식의 적용결과는 유사이차반응속도식에 잘 맞는 것으로 나타났다. Gibbs 자유에너지와 엔탈피값으로부터 입상활성탄에 대한 cibacron brilliant red 3B-A의 흡착은 자발적인 물리흡착 및 흡열 과정으로 진행되었다.

Abstract – In this paper, the adsorption behavior and kinetic characteristics of cibacron brilliant red 3B-A from aqueous solution using granular activated carbon were investigated. The effect of various parameters such as adsorbent dose, pH, initial concentration, contact time and temperature on the adsorption system were studied. Base on the estimated Langmuir constant (R_L) and Freundlich constant ($1/n$), This process could be employed as effective treatment method. From the Temkin constant (B) and Dubinin-Radushkevich constant (E), This adsorption process is physical adsorption. From kinetic experiments, the adsorption process followed the pseudo second order model with good correlation. Base on the Gibbs free energy and enthalpy, the adsorption of cibacron brilliant red 3B-A onto granular activated carbon was physisorption and endothermic in nature.

Key words: Cibacron Brilliant Red 3B-A, Adsorption, Dye, Equilibrium, Kinetic

1. 서 론

염료폐수를 정화하지 않고 방류하게 되면 염료자체가 가지고 있는 독성뿐만 아니라 수중에 COD 축적으로 인해 수질오염의 주범이 되곤 한다. 이렇게 축적된 염료들은 수중에 존재하며 수중생물에 의해 흡입되고, 상위 먹이사슬의 인간이 이를 반복적, 장기적으로 섭취하게 되면 신체 내에 독성이 축적되어 피부병, 암, 신경계 손상 등 인간건강에 악영향을 끼칠 수 있다. 이러한 부작용을 막기 위하여 인간은 방출된 폐수에 포함된 독성을 제거하는데 많은 연구를 진행해

왔다. 염료의 배출과 오염을 개선하기 위하여, 수중으로부터 염료성분을 제거하기 위한 여러 방안들이 연구되었는데, 현재 고급산화, 광촉매, 흡착, 응집법 등이 사용되고 있다[1-4]. 이 중에서도 흡착은 여러 방법들 중 설계가 단순하고 조작이 간편한 이점을 가지고 있어 여러 처리시설에 널리 사용되고 있다. 흡착에 사용되는 흡착 물질로는 활성탄, 점토(clay), 실리카, 제올라이트 등과 같은 물질들이 있으며 수용액 중에 존재하는 저농도의 염료를 제거할 수 있는 가능성에 대해 조사된 바가 있다[5,6].

Cibacron brilliant red 3B-A는 주로 직물산업에서 많이 사용되는 염료인데, 염색에 사용된 후에 적절한 처리과정 없이 폐수로 유출이 된다면 수생생태계의 파괴를 야기하고, 사람이 섭취하게 되면 신경계의 손상, 간의 손상, 또는 내분비계의 교란 등의 심각한 질병을 유발할 수 있다[7,8].

그러나 이 염료의 제거에 대한 선행 연구는 진행된 것이 거의 없

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jjlee@kongju.ac.kr

‡이 논문은 공주대학교 박규영 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

다. Nawi 등의 연구 논문을 보면 TiO₂-chitosan의 photocatalyst-adsorbent system에 의해 pH, 접촉시간, 초기농도와 온도를 변수로 cibacron red 3B-A에 대한 흡착실험을 통하여, 흡착평형은 Langmuir 식과 Freundlich 식에 모두 잘 맞고, 흡착과정은 유사이차반응속도식을 따르며, 화학흡착이 속도지배단계라고 예측하였다. 또한 자유에너지와 엔탈피가 모두 음수값(negative value)으로 흡착공정은 자발적인 발열반응으로 진행된다고 하였다[9]. Won 등은 코크스 폐기물을 흡착제로 사용하여 cibacron red 3B-A를 흡착하는 실험을 통해, FT-IR 분석결과로부터 폐기물에는 amine, sulfonate, carboxyl 및 phosphate 등 4가지의 기능성 그룹이 존재하는 것을 알아냈다. 최대흡착능은 강산성인 pH 1에서 나타났으며, 농도가 증가하여도 흡착효율에는 큰 변화가 없고, 흡착공정은 유사이차반응속도식과 부합한다고 보고하였다[10].

본 연구의 목적은 값싸고 흡착능력이 뛰어난 입상활성탄을 흡착제로 사용한 연구가 아직까지 없는 점을 고려하여 cibacron red 3B-A에 대한 흡착특성을 파악하고 흡착공정에 대한 자료를 얻고자 하는 것이다. 유연탄계 입상활성탄을 흡착제로 사용하여 cibacron brilliant red 3B-A를 흡착제거하는 과정을 대상으로 흡착제의 양과 pH에 대한 흡착특성을 알아보고, 등온흡착실험을 통하여 Langmuir 식과 Freundlich 식의 흡착평형인자를 각각 평가하여 활성탄을 사용한 흡착조작의 유효성을 판단해 보고자 하였으며, Dubinin-Radushkevich 식과 Temkin 식으로부터 흡착공정의 특성을 파악하였다. 흡착속도 실험을 통하여 cibacron brilliant red 3B-A의 초기농도와 흡착온도 등이 흡착반응에 미치는 영향을 고찰하여 동력학적인 해석과 함께 열역학적 파라미터를 조사하였다.

2. 실험

2-1. 실험재료

활성탄은 Clarimex사에서 제공한 유연탄을 수증기활성화시켜 제조한 석탄계 입상활성탄을 흡착제로 사용하였다. 전처리 과정으로 순수로 수회 세척한 후 건조기로 105±1 °C에서 12시간 건조한 것을 필요한 양만큼 취하여, 100 °C의 순수로 2시간 동안 침지시킨 후 사용하였다(이하 침지활성탄). 실험에 사용한 활성탄의 물리적 특성을 Table 1에 나타내었다.

Cibacron brilliant red 3B-A는 Sigma-Aldrich사 제품을 사용하여 1000 mg/L의 저장용액(stock solution)을 제조하고, 빛에 의한 분해를 막기 위하여 어두운 곳에 보관한 후 필요에 따라 적절한 농도로 희석하여 사용하였다. 화학구조는 Fig. 1과 같다.

2-2. 흡착실험

초기농도 100 mg/L인 cibacron brilliant red 3B-A 용액 50 ml에 대하여 전처리한 활성탄을 50~500 mg의 범위에서 각각 유리병에 넣고

Table 1. Physical Properties of Granular Activated Carbon

Properties	Unit	Value
Average particle size	mm	1.638
Specific surface area	m ² /g	1,735
Density(at 25 °C)	(g/mL)	0.48~0.55
Iodine adsorption value	mg/g	1,000
Methylene blue adsorption value	mL/g	180
ash	%	<10

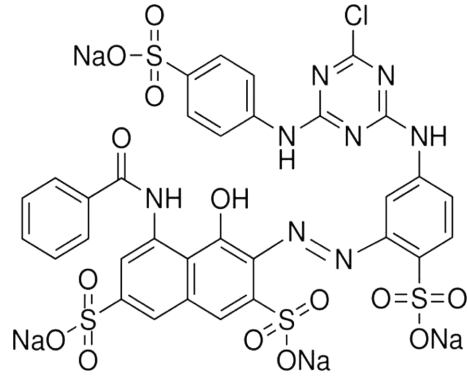


Fig. 1. Molecular structure of cibacron brilliant red 3B-A.

왕복식 항온수조(Jeiotec, BS-21)에서 100 rpm의 속도로 24시간 동안 흡착시켰다. 흡착이 끝나면 여과분리하여 여액의 농도를 UV-Vis 흡수분광기(Shimadzu, UV-1800)를 이용하여 최대흡수파장 517 nm에서 흡광도를 측정하여 결정하였다. pH 변화에 따른 cibacron brilliant red 3B-A의 흡착특성을 조사하기 위하여 완충용액(pH 3~5: CH₃COOH-CH₃COONa, pH 6~8: KH₂PO₄-K₂HPO₄, pH 9~11: NH₄Cl-NH₄OH)을 사용하여 용액의 pH를 조정하였다.

농도별 흡착속도실험은 최적 pH에서 cibacron brilliant red 3B-A의 초기농도를 100, 200, 300 mg/L로 조정된 상태에서 흡착을 100 rpm으로 24시간 실시하고 1시간 간격으로 농도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 흡착제 양의 영향

초기농도 100 mg/L의 cibacron brilliant red 3B-A 용액 50 mL에 대하여 침지한 활성탄을 50~500 mg(건조기준질량) 범위에서 서로 다르게 첨가하고 25 °C에서 24시간 항온진탕한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 그림을 보면 활성탄의 투입량 증가에 따라 cibacron brilliant red 3B-A의 흡착율도 증가하는데, 활성탄의 투입량이 200 mg, 250 mg, 300 mg, 400 mg, 500 mg일 때 각각 81%, 88%, 95%, 98%, 99%의

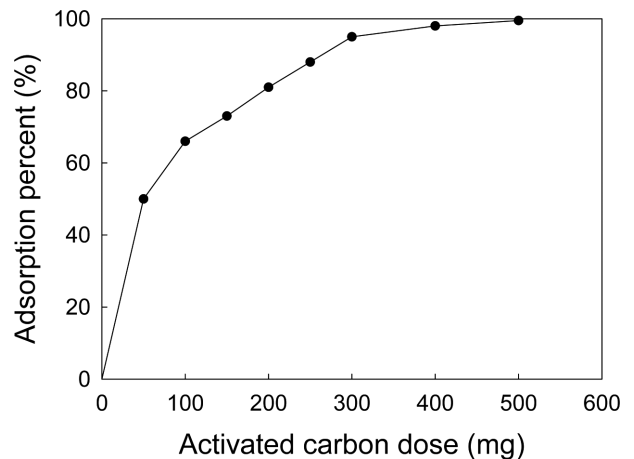


Fig. 2. Effect of granular activated carbon doses for adsorption of cibacron brilliant red 3B-A (initial concentration: 100 mg/L, 298 K).

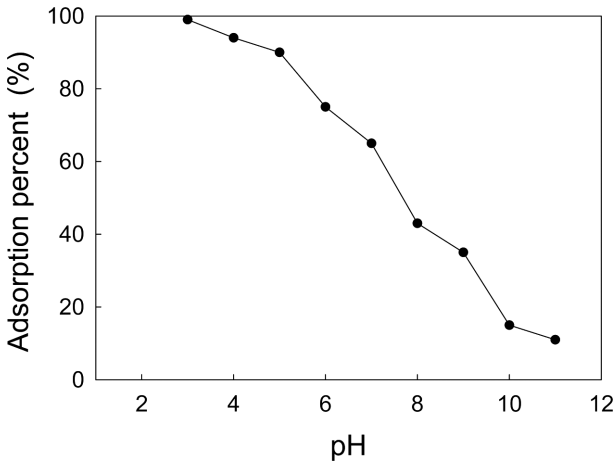


Fig. 3. Effect of pH on adsorption of cibacron brilliant red 3B-A by granular activated carbon (initial concentration : 100 mg/L, GAC: 200mg, 298 K).

흡착율을 나타냈다. 실험결과에 의하면 500 mg 투입 시의 흡착률이 가장 높지만 pH 조절에 의한 흡착량 증가효과조사 및 경제적인 측면을 고려하여 흡착률의 증가폭이 완만해지기 시작하는 200 mg을 활성탄 투입량으로 선정하고 후속실험을 수행하였다.

3-2. pH별 흡착평형

용액의 pH 변화에 따른 cibacron brilliant red 3B-A 용액의 흡착 특성을 Fig. 3에 나타내었다. pH 3에서 가장 높은 99%의 흡착률을

나타내었으며, pH가 증가할수록 감소하여 알카리 영역인 pH 8~11에서는 약 43~11%의 낮은 제거율을 나타냈다. 이 현상은 음이온계 염료인 cibacron brilliant red 3B-A는 물에 용해되어 말단에 SO₃⁻기를 가지게 되는데, 활성탄의 표면 하전은 pH가 낮은 산성영역일수록 + 상태로 하전된 양이 많아진다. 그 결과 pH가 낮아질수록 활성탄표면의 양자화된 표면활성기가 증가하면서 cibacron brilliant red 3B-A의 흡착량도 증가하기 때문인 것으로 판단되었다[9]. 결론적으로 pH의 조절을 하지 않은 cibacron brilliant red 3B-A의 흡착률이 약 81%였던 것을 pH 조절에 의해, pH 3에서 18%나 크게 증가한 99%를 제거하는 결과를 얻을 수 있었다. 차후의 실험은 최적조건인 pH 3으로 조정된 상태에서 수행하였다.

3-3. 등온흡착평형 해석

등온흡착평형실험은 298, 308, 318 K의 세 가지 온도에서 각각 실행하였다. Cibacron brilliant red 3B-A의 흡착공정에 대한 성질과 메카니즘에 대한 정보를 얻기 위하여 실험값들을 Langmuir, Freundlich, Temkin 및 Dubinin-Radushkevich 등온흡착식에 적용한 결과는 Fig. 4와 같으며, Table 2에 상수 값들을 종합하여 나타냈다.

3-1-1. Langmuir 등온흡착식

Langmuir 등온흡착식은 흡착제의 표면은 균일하며, 흡착질이 흡착제 표면에 있는 한정된 숫자의 흡착부위에 단분자층을 형성하는 것에 의해 흡착이 일어난다고 가정하였으며 다음과 같은 직선식으로 나타낸다.

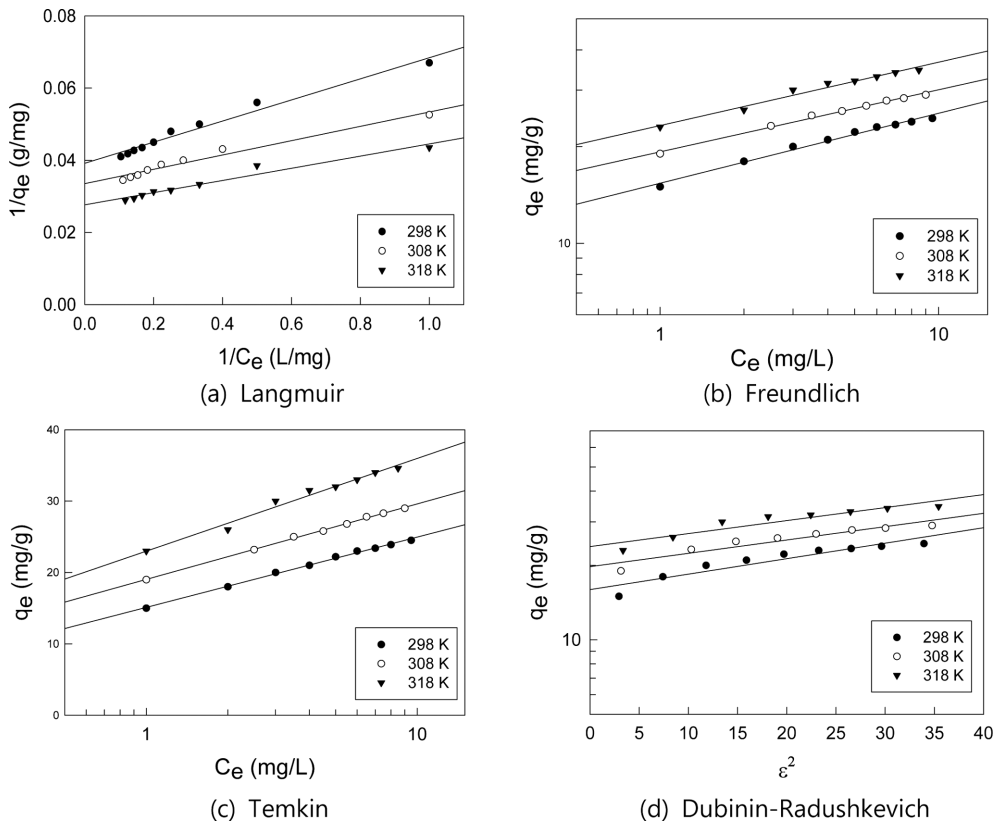


Fig. 4. Isotherms for cibacron brilliant red 3B-A adsorption onto granular activated carbonat different temperatures (initial concentration: 100 mg/L, pH 3, GAC dose : 50-500 mg).

Table 2. Langmuir, Freundlich, Temskin and Dubinin-Radushkevich isotherm constants for adsorption of cibacron brilliant red 3B-A on activated Carbon

Isotherms	Parameters	Temperature (K)		
		298	308	318
Langmuir	Q _o (mg/g)	25.54	29.84	36.18
	K _L (L/mg)	1.338	1.688	1.737
	R _L × 10 ³	7.418	5.889	5.724
	r ²	0.988	0.985	0.978
Freundlich	K _F (mg/g)(L/mg) ^{1/n}	15.86	19.27	23.43
	1/n	0.203	0.193	0.200
	r ²	0.969	0.997	0.969
Temkin	B (J/mol)	4.321	4.593	5.474
	K _T (L/mg)	15.08	19.04	23.14
	r ²	0.999	0.999	0.987
Dubinin-Radushkevich	q _D (mg/g)	15.97	19.78	23.82
	K _{ad} × 10 ⁸ (mol/J) ²	1.440	1.241	1.211
	E (kJ/mol)	5.893	6.347	6.426
	r ²	0.935	0.940	0.947

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{Q_o K_L C_e} + \frac{1}{Q_o} \quad (1)$$

여기서 q_e는 흡착제 단위 질량 당 흡착된 흡착질의 양(mg/g), C_e는 흡착질의 평형농도(mg/L), Q_o와 K_L은 이론최대흡착용량과 흡착속도와 관련된 Langmuir 상수이다. Table 3을 보면, 온도가 증가할수록 Q_o는 25.34<29.84<36.18 mg/g으로 증가하였고, K_L은 1.338~1.737 L/mg이었다. r² 값이 0.978~0.988로 흡착데이터가 Langmuir식에 잘 맞는 것으로 나타났다. Langmuir 식의 특징은 다음 식으로 정의되는 분리계수 또는 평형계수로 부르는 무차원 상수 R_L의 사용이다.

$$R_L = \frac{1}{1 + (K_L C_o)} \quad (2)$$

만약 0<R_L<1이면 흡착처리공정이 적합하다는 것을 의미한다[11]. 실험으로부터 구한 R_L은 0.0074~0.0057로 입상활성탄에 의한 cibacron brilliant red 3B-A의 흡착처리가 적합한 처리방법이 될 수 있다는 것을 알았다.

3-1-2. Freundlich 등온흡착식

Freundlich는 불균일한 흡착제의 표면에 다분자층으로 이루어진 비이상적인 흡착을 고려한 경험식을 제시하였다.

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3)$$

여기서 C_e는 흡착질의 평형농도(mg/L), q_e는 흡착제의 평형흡착량(mg/g)이고, Freundlich 상수인 K_F는 흡착제의 흡착용량, n은 흡착강

도를 나타낸다. Table 2로부터, r² 값이 0.969~0.997로 식에 대한 일치도가 높은 것을 알 수 있고, K_F는 온도가 증가할수록 15.86<19.27<23.43 순으로 증가하였다. 분리계수 1/n 값으로부터 흡착조작의 유효성을 판단할 수 있는 데, 0~1 범위에 있으면 흡착조작이 적합하고, 0.1~0.5 범위에 있으면 더욱 효과적이라고 하였다. 본 실험으로부터 계산한 분리계수(1/n) 값은 0.237~0.267로 아주 효과적인 흡착조작이 가능한 영역에 있음을 알 수 있었다[12].

3-1-3. Temkin 등온흡착식

이 식은 자유흡착에너지가 표면덮임의 함수로 단순화된 흡착에 바탕을 두고 흡착제와 흡착질 사이의 상호작용을 계산에 고려하고 있다.

$$q_e = B \ln K_T + B \ln C_e \quad (4)$$

여기서 B(=RT/b_T, J/mol)은 흡착열에 대응하는 상수이고, R은 기체상수(8.314 /mol K), T는 절대온도(K), b_T는 Temkin 등온상수, K_T는 최대결합에너지에 대응하는 평형결합상수(L/g)이다. Table 3을 보면 r² 값이 0.987~0.999로 식에 대한 일치도가 4가지 등온식 중에서 가장 높다. 흡착열 관련 상수, B<20 J/mol 이면 물리흡착공정에 속하는데 평가된 실험값 들은 4.321~5.474 J/mol로 물리흡착공정임을 알 수 있었다[13].

3-1-4. Dubinin-Radushkevich 등온흡착식

Dubinin-Radushkevich식은 흡착에너지의 불균일도와 흡착제의 기공특성을 추론하기 위해 응용한다. 세공을 채우는 흡착기구를 산정한 반경형식으로 불균일한 표면에 Gaussian 분포를 가지는 흡착기구를 나타내며 다분자층 흡착특성을 가진다[14].

$$\ln q_e = \ln q_p - (K_{DR} e^2) \quad (5)$$

$$e = RT \ln \left[1 + \frac{1}{C_e} \right] \quad (6)$$

여기서 q_D는 이론포화용량(mg/g), K_{DR}은 흡착질 1 몰당 평균 흡착자유에너지(mol²/J²), R은 기체상수(8.314 /mol K), T는 절대온도(K)이다. 흡착에너지(kJ/mol)는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$E = \frac{1}{\sqrt{2K_{DR}}} \quad (7)$$

Table 2에서 r² 값이 0.935~0.947로 다른 등온흡착식보다 낮지만 식에 대한 일치도는 비교적 양호하며, 온도증가에 따라 q_D가 15.97<19.78<23.82 mg/g으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 흡착에너지 값은 E=5.893~6.426 kJ/mol을 나타냈는데, 이 값들은 Monika 등이 앞선 연구에서 제시한 E<8 kJ/mol 범위에 속하므로 물리흡착 공정임을 알 수 있었다[15].

Table 3. Pseudo First Order and Pseudo Second Order Kinetic Model Parameters of Adsorption of cibacron brilliant red 3B-A by Granular Activated Carbon for Different Initial Concentration at 298 K

Initial concentration (mg/L)	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 × 10 ² (g/mg·h)	r ²
100	24.56	0.333	0.968	32.89	1.314	0.999
200	34.40	0.333	0.992	47.67	1.010	0.997
300	36.83	0.298	0.992	58.97	1.029	0.998

3-4. 동력학적 해석

3-4-1. 반응속도식

유사일차와 유사이차 반응속도식은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \tag{8}$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \tag{9}$$

여기서 q_e 와 q_t 는 각각 평형상태와 t 시간에서 흡착된 cibacron brilliant red 3B-A의 양(mg/g)이며, k_1 은 유사일차반응속도상수(1/h), k_2 는 유사이차반응속도상수(g/mg h)이다. q_e 는 시간당 흡착량으로 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$q_t = \frac{(C_o - C_t)V}{W} \tag{10}$$

실험값들을 유사일차 반응속도식에 적용한 결과는 Fig. 5에, 유사이차 반응속도식에 적용한 결과는 Fig. 6에 각각 나타냈다. Table 3에 속도식의 파라미터 값들을 계산한 결과를 나타냈는데, 속도식에 대한 일치도를 나타내는 r^2 값을 보면 유사일차반응속도식(0.968~0.992) < 유사이차반응속도식(0.997~0.999)로 입상활성탄에 의한 cibacron

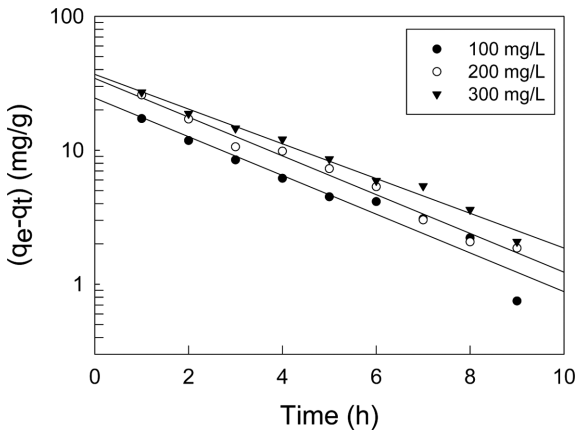


Fig. 5. Pseudo first order kinetics plots for cibacron brilliant red 3B-A adsorption onto Granular activated carbon at different initial concentrations (pH 3, GAC dose: 200 mg, 298 K, 100 rpm).

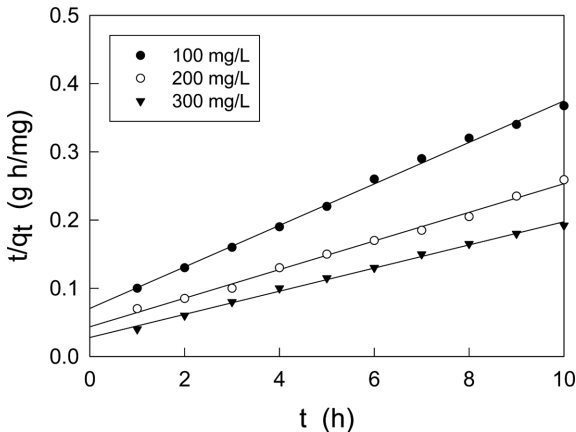


Fig. 6. Pseudo second order kinetics plots for cibacron brilliant red 3B-A adsorption onto activated carbon at different initial concentrations (pH 3, GAC dose: 200 mg, 298 K, 100 rpm).

Table 4. Thermodynamic Parameters for Adsorption of cibacron brilliant red 3B-A by Granular Activated Carbon for Different Temperature

Temperature (K)	ΔH (kJ/mol)	ΔG (kJ/mol)	ΔS (J/mol K)
298		-0.721	
308	10.207	-1.341	36.95
318		-1.460	

brilliant red 3B-A의 흡착공정은 유사이차반응속도식에 따라 진행된다는 것을 알 수 있었다.

3-5. 열역학적 해석

흡착공정의 열역학적 파라미터 값들은 그 공정의 자발성을 평가하여 실제적인 공정운전에 필요한 중요한 지표로 사용될 수 있는데, 흡착공정의 흡열성과 타당성을 평가하기 위해 주로 Gibbs 자유에너지 변화(ΔG), 엔탈피변화(ΔH) 및 엔트로피 변화(ΔS)와 같은 열역학적 파라미터들의 변화를 밝히는 것이 필요하다.

Gibbs 자유에너지변화는 다음 식으로 구할 수 있다[16].

$$\Delta G = -RT \ln K_L \tag{8}$$

여기서 K_L 은 Langmuir 상수이다. 흡착공정의 엔트로피와 엔탈피는 다음과 같은 Gibbs 자유에너지식으로부터 평가할 수 있다.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \tag{9}$$

K_L 값과 (8), (9) 식으로부터 구한 열역학적 파라미터 값들은 Table 4에 종합하여 나타냈다. Gibbs 자유에너지변화는 온도가 298, 308, 318 K로 증가할수록 -0.721 > -1.341 > -1.460 kJ/mol 순으로 감소하였다. 이것으로부터 입상활성탄에 의한 cibacron brilliant red 3B-A의 흡착공정은 온도가 올라갈수록 자발성이 더 높아진다는 것을 알 수 있었다. 또한 일반적인 물리흡착의 자유에너지변화영역인 -20~0 kJ/mol 범위 속하기 때문에 이 흡착공정이 물리흡착공정으로 진행된다는 것을 다시 확인할 수 있었다[17].

엔탈피 변화값은 +10.207 kJ/mol로 입상활성탄에 대한 cibacron brilliant red 3B-A의 흡착공정이 흡열반응임을 알 수 있었다. 엔트로피 변화값이 양의 값인 +36.95 J/mol K을 갖는 것은 고액계면에서 무질서도가 증가하였다는 것으로, 그만큼 입상활성탄에 대한 cibacron brilliant red 3B-A의 친화력이 좋은 것으로 판단되었다[18].

4. 결 론

본 연구에서는 입상활성탄을 사용하여 cibacron brilliant red 3B-A 염료를 흡착하는데 필요한 흡착평형과 흡착동역학 및 열역학 파라미터에 대하여 조사하였다. Cibacron brilliant red 3B-A는 pH 3에서 pH를 조절하지 않았을 때보다 흡착효율이 대폭 향상되어 초기농도 10 mg/L의 99%를 흡착할 수 있었다. 등온흡착평형관계를 검토한 결과 Langmuir 식의 R_L 과 Freundlich 식의 $1/n$ 값으로부터 활성탄에 의한 cibacron brilliant red 3B-A의 흡착조작이 적절한 처리방법이 될 수 있다는 것을 알았고, Temkin식의 흡착열관련상수(B)와 Dubinin-Radushkevich식의 흡착에너지(E)로부터 흡착공정이 물리흡착공정임을 확인하였다. 흡착공정에 대한 동력학적 해석을 통해 반응속도식의 적용결과는 유사이차반응속도식이 유사일차반응속도식에 비해 일치도가 높은 것으로 나타났다. 입상활성탄에 대한 cibacron brilliant

red 3B-A의 흡착반응은 온도가 올라갈수록 Gibbs 자유에너지값이 감소하여 자발성이 높아졌으며, 엔탈피 변화값(+10.207 kJ/mol) 으로부터 흡착공정이 흡열반응으로 진행됨을 알았다.

References

- Vijaya, Kumar, G., Ramalingam, P., Kim, M. J., Yoo, C. K. and Kumar, M. D., "Removal of Acid Dye (violet 54) and Adsorption Kinetics Model of Using Musa spp. Waste: A Low-cost Natural Sorbent Material," *Korean J. Chem. Eng.*, **27**(5), 1469-1475(2010).
- Mahanta, D., Madras, G., Rdhakrishnan, S. and Patil, S., "Adsorption and Desorption Kinetics of Anionic Dyes on Doped Poly-aniline," *J. Phys. Chem.*, **112B**, 10153-10157(2008).
- Chen, W., Lu, W., Yao, Y. and Xu, M., "Highly Efficient Decomposition of Organic Dyes by Aqueous-fiber Phase Transfer and in Situ Catalytic Oxidation Using Fiber-supported Cobalt Phthalocyanine," *Environ. Sci. Technol.*, **41**, 6240-6245(2007).
- Wong, Y., Szeto, Y. Cheung, W. and McKay, G., "Equilibrium Studies for Acid Dye Adsorption onto Chitosan," *Langmuir*, **19**, 7888-7894(2003).
- Lee, J. I., Park, J. H., Beum, H. T., Yi, K. B., Ko, C. H., Park, S. Y., Lee, Y. T. and Kim, J. N., "Adsorption and Desorption Dynamics of Ethane and Ethylene in Displacement Desorption Process using Faujasite Zeolite," *Korean Chem. Eng. Res.*, **48**(6), 768-775(2010).
- Samiey, B. and Toosi, A., "Kinetics and Thermodynamics Adsorption of Congo Red on Cellulose," *Central Eur. J. Chem.*, **8**, 906-912(2010).
- Srivastava, V. C. and Agarwal, N. K., "Removal of Orang-G and Methyl Violet Dyes by Adsorption onto Bagasse Fly Ash-kinetic Study and Equilibrium Isotherm Analyses," *Dyes Pig.*, **69**(3), 210-223(2006).
- Blackburn, R., "Natural Polysaccharides and their Interaction with Dye Molecules: Applications in Effluent Treatment," *Environ. Sci. Technol.*, **38**, 4905-4909(2004).
- Nawi, M. A., Sabar, S. Jawad, A. H., Sheilatina, W. S. and Ngah, W., "Adsorption of Reactive Red 4 by Immobilized Chitosan on Glass Plates: Towards the Design of Immobilized TiO₂ Chitosan Synergistic Photocatalyst-adsorption," *Biochem. Eng. J.*, **40**, 317-325 (2010).
- Won, S. W., Wu, G. Ma, H., Liu, Q., Yah, Y., Cui, L., Liu, C. and Yun, Y. S., "Adsorption Performance and Mechanism in Binding of Reactive Red 4 by Coke Waste," *J. Hazard. Mater.*, **B138**, 370-317(2006).
- 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).
- 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).
- Sivakumar, P. and Palanisamy, P. N., "Adsorption Studies of Basic Red 29 by a Non Conventional Activated Carbon Prepared from Euphorbia Antiquorum L," *Int. J. Chem. Tech. Res.*, **1**(3), 502-510 (2009).
- Dubinina, M. M. and Zaverina, E. D., and Radushkevich, L. V., "Sorptions and Structure of Active Carbons," *J. Phys. Chem.*, **21**, 1351-1362(1947).
- Monika, J., Garg, V. and Kadirvelu, D. K., "Chromium (VI) Removal from Aqueous Solution, Using Sunflower Stem Waste," *J. Hazard. Mater.*, **162**, 365-372(2009).
- Zhang, Li, Y., Zhang, C. and Jing, Y., "Adsorption of Malachite Green from Aqueous Solution onto Carbon Prepared from Arundo Donax Root," *J. Hazard. Mater.*, **150**, 774-782 (2008).
- Jaycock, M. J. and Parfitt, G. D., *Chemistry of interfaces*, Ellis Horwood Ltd., Chichester(1981).
- Dorğan, M., Alkan, M., Demirbas, O., Özdemir, Y. and Özmetin, C., "Adsorption Kinetics of MaxilonBlue GRL onto Sepiolite from Aqueous Solutions," *Chem. Eng. J.*, **124**, 89-101(2006).