

## 폐 활성슬러지를 이용한 Rhodamine B의 생체흡착: 흡착평형 및 흡착속도 모델링

이 창 한 · 안 갑 환\*

삼영이엔테크(주), 부산가톨릭대학교 환경과학부\*  
(2005년 6월 17일 접수; 2005년 9월 23일 채택)

## Biosorption of Rhodamine B onto Waste Activated Sludge: Equilibrium and Kinetic Modelling

Chang-Han Lee and Kab-Hwan Ahn\*

SamYeong Environment Technology Co, Ltd, Busan 606-062, Korea

\*School of Environmental Science, Catholic University of Pusan, Busan 609-323, Korea

(Manuscript received 17 June, 2005; accepted 23 September, 2005)

The biosorption of dye, Rhodamine B(Rh-B), onto waste activated sludge was investigated. The biosorption capacity and contact time were shown as a simulation of dye adsorption equilibrium and kinetics models.

We observed that biosorption of Rh-B occurred rapidly less than 4 hr. These experimental data could be better fitted by a pseudo-second-order rate equation than a pseudo-first-order rate equation. The equilibrium dependence between biosorption capacity and initial concentration of Rh-B was estimated and it was found that the equilibrium data of biosorption were fitted by four kinds of model such as Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson, and Koble-Corrigan model. The average percentage errors,  $\varepsilon(\%)$ , observed between experimental and predicted values by above each model were 21.19%, 9.97%, 10.10% and 11.76%, respectively, indicating that Freundlich and Redlich-Peterson model could be fitted more accurately than other models.

Key Words : Waste activated sludge, Equilibrium, Kinetics, Dye, Rhodamine B, Biosorption.

### 1. 서 론

합성 염료물질은 섬유, 제지, 인쇄 산업 및 염색 공장 등에서 다양하게 사용되고 있다. 염색공장 및 공단지역에서 배출되는 염색폐수는 유해 중금속, 난분해성 유기물질 및 폐수색도 처리에 많은 문제점이 발생되고 있다. 이와 같은 산업체에서 발생하는 폐수는 색도가 높고, 중금속을 포함한 유독물질을 함유하고 있어 수계의 오염 및 자연 생태계의 파괴 원인이 되고 있다<sup>1,2)</sup>.

염색폐수에 포함된 염료물질은 생분해가 어려운 복잡한 화학구조를 가지고 있어 색도제거 및 함유된 유해물질의 처리에 대한 고도처리에 관심이 집

중되고 있다. 염색폐수 처리는 물리·화학적 및 생물학적 처리방법을 많이 사용하고 있다. 물리·화학적 염색폐수 처리 방법은 무기응집제 및 고분자응집제에 의한 응집법, 활성탄에 의한 흡착법 및 산화제에 의한 고도산화법 등이 사용되고 있으며, 최근 염색폐수의 색도제거는 전해산화 및 오존산화법을 이용한 처리공정으로 높은 처리효율을 얻을 수 있다고 보고되었지만, 높은 처리비용으로 현장적용에 제약을 받고 있다<sup>3)</sup>.

생물학적 처리공정은 염료분해 미생물을 이용하므로, 염료의 분해속도가 느리며 저 농도의 영역에서만 적용이 가능하다는 단점을 가지고 있어 생체흡착(biosorption)과 같은 대체공정으로 보완이 이루어지고 있다. 생체흡착은 박테리아, 효모, 식물, 및 조류를 생체흡착제로 많이 이용하였으나, 최근 발효 및 하·폐수처리 공정에서 발생하는 폐 바이오매스를 이용하여 미생물의 활성에 관계없이 유해물질,

Corresponding Author : Kab-Hwan Ahn, School of Environmental Science, Catholic University of Pusan, Busan 609-323, Korea  
Phone: +82-51-510-0623  
E-mail: khahn@cup.ac.kr

중금속 및 염료 등을 선택적으로 흡착 및 회수에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다<sup>4)</sup>. 특히, 하·폐수처리공정에서 발생하는 폐 활성슬러지는 매립, 소각 및 재활용 등에 의해 폐기되고 있다. 폐 활성슬러지는 플럭의 크기가 대개 90~200 μm 정도로서 구성성분이 다양하고, 무정형성과 다공성의 성질을 가지고 있어 생체흡착제로서의 활용 가능성이 높으며, 폐 활성슬러지를 이용한 염료<sup>5-8)</sup> 및 중금속<sup>9)</sup>의 생체흡착(biosorption)에 관한 연구 결과가 보고되고 있다.

생체흡착제의 흡착특성은 Aldrich와 Feng<sup>10)</sup>이 *Laminaria ochroleuca*를 이용한 중금속의 흡착에서 Freundlich 식 보다는 Langmuir와 Koble-Corrigan 식으로서 묘사된 것을 제시한 바 있다. Gulnaz<sup>11)</sup>는 활성슬러지를 이용한 염료(Basic Red 18과 Basic Blue 9)의 생체흡착에서 흡착시간에 따른 흡착량은 유사 2차 흡착속도식에 의해 묘사된 예측치와 실험치가 일치한다고 보고하였다. 또한 Sugar cane dust<sup>12)</sup>와 Orange peel<sup>13)</sup>을 이용한 염료, Rh-B의 생체흡착시 최대흡착량이 각각 4.16과 3.23 mg/g이었다고 보고하였다.

본 연구는 하·폐수처리장에서 발생하는 폐 활성슬러지를 생체흡착제로 사용하여 염료, Rh-B의 생체흡착 특성을 고찰하였다. 또한, 흡착공정의 기초적인 설계조건을 도출하기 위하여 Rh-B의 흡착속도 및 흡착평형에 대한 다양한 모델을 이용하여 모델에 관련된 상수를 구하고 실험치와 예측치가 일치하는 정도를 비교하였다.

## 2. 생체흡착 동역학 및 등온흡착 모델

### 2.1. 동역학 모델

생체흡착의 메커니즘과 율속단계에 대한 연구를 위하여 Lagergen 동역학적 모델을 본 실험에 사용하였다. 유사 1차 반응식은 용액중의 염료 농도가 세포표면의 염료 농도와 동일하다는 가정을 포함하고 있다<sup>7)</sup>.

1차 반응식은 시간에 따른 염료의 흡착량과 평형상태의 흡착량을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dq}{dt} = k_{1,ad}(q_e - q) \quad (1)$$

경계조건을  $t=0$ 에서  $t=t$ ,  $q=0$ 에서  $q=q$ 로 하여 적분하면 식(1)는 다음과 같이 된다.

$$\log(q_e - q) = \log q_e - \frac{k_{1,ad}}{2.303} t \quad (2)$$

여기에서,  $q$ 와  $k_{1,ad}$ 는 흡착시간,  $t$ 에 따른 흡착량과 1차 반응속도상수이다. 식(2)에 제시된 모델의

$\log(q_{eq} - q)$ 와  $t$ 의 관계로부터  $k_{1,ad}$ 를 구할 수 있다.

또한, 유사 2차 반응속도식은  $q$ 와  $t$ 의 관계로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dq}{dt} = k_{2,ad}(q_e - q)^2 \quad (3)$$

1차 반응과 동일한 경계조건에서 적분하면 식(3)은 식(4)과 같이 된다.

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{k_{2,ad}q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (4)$$

동역학적 모델이 2차 반응이라면 식(4)에  $t/q$ 와  $t$ 의 관계로부터  $q_e$ 와  $k_{2,ad}$ 를 구할 수 있다.

Rh-B 생체흡착량의 실험치( $q_{e,i,exp}$ )와 계산치( $q_{e,i,cal}$ ) 사이의 평균 에러율,  $\varepsilon$ 은 식(5)를 이용하여 계산하였다. 그리고  $N$ 은 실험치의 개수이다.

$$\varepsilon(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N |(q_{e,i,exp} - q_{e,i,cal}) / q_{e,i,exp}|}{N} \times 100 \quad (5)$$

염료의 생체흡착은 다양한 바이오매스를 이용하여 중금속과 염료에 대한 흡착 특성을 제시한 바 있으며, 흡착 특성은 흡착제와 피흡착물의 특성, 반응 온도, 그리고 pH에 따라 달라진다고 하였다<sup>5-10)</sup>.

### 2.2. 등온흡착모델

폐 슬러지와 염료 용액을 혼합하면 일정한 온도에서 폐 활성슬러지에 흡착된 염료의량은 용액의 염료농도와 평형을 이룬다. 이러한 흡착평형은 염료 농도와 흡착제 량의 관계로부터 염료의 흡착량(capacity) 및 친화도(affinity)를 알 수 있다. 본 실험에서는 생체흡착공정의 기초설계인자를 도출하기 위하여 일반적으로 알려진 Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson 및 Koble-Corrigan 모델식을 사용하였다<sup>14)</sup>.

Langmuir 흡착등온식은 일정한 흡착점(site)에 단층흡착(monolayer adsorption)이 되어진다고 가정하면 다음 식과 같이 표현된다.

$$q_e = \frac{q_{max} b C_e}{1 + b C_e} \quad (6)$$

여기에서,  $q_{max}$ 와  $b$ 는 단층흡착시 최대흡착량과 흡착 결합에너지를 나타내는 Langmuir 상수이다.

균일한 표면에서 단층흡착을 한다는 Langmuir 흡착등온식에 비해 Freundlich 흡착등온모델은 다양한 흡착점과 다층흡착을 가정하고 있으며, 다음과 같이 표현된다.

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (7)$$

여기에서,  $K_F$ 와  $n$ 은 흡착량과 흡착강도를 나타내는 Freundlich 상수이다.

Redlich-Peterson 모델은 Langmuir와 Freundlich 흡착등온식을 개선한 경험식으로서 다음과 같이 표현된다.

$$q_e = \frac{K_{RP}C_e}{1 + a_{RP}C_e^\beta} \quad (8)$$

여기에서,  $K_{RP}$ ,  $a_{RP}$ 와  $\beta$ 는 Redlich-Peterson 상수이다.  $\beta$ 는 0에서 1사이의 값을 가지며,  $\beta=1$ 이면 Langmuir 흡착등온식과 동일하게 된다.

Koble-Corrigan(Langmuir-Freundlich) 모델은 균일한 표면과 흡착된 물질간의 상호작용이 발생한다는 가정을 포함하고 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_e = \frac{q_{max}bC_e^{1/n}}{1 + bC_e^{1/n}} \quad (9)$$

### 3. 재료 및 방법

Rhodamine B는 acid chain을 가진 양이온성 염료(cationic dye)로서 물에 잘 용해된다. 이 염료는  $-N(C_2H_5)_2$ 와  $=N^+(C_2H_5)_2$ 의 측쇄를 가지는 공명구조(Fig. 1)를 가지고 있으며, 가시영역인 파장 550nm 부근에서 최대흡수파장을 가진다(Fig. 2). 염료 농도

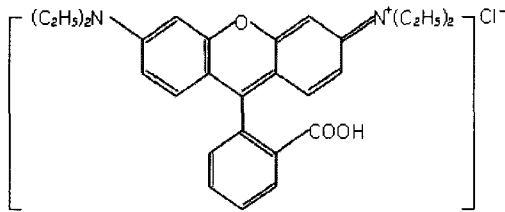


Fig. 1. Structure of Rhodamine B.

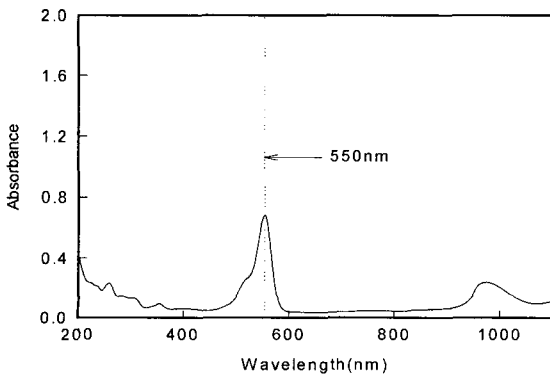


Fig. 2. UV/VIS spectrum of Rhodamine B with wavelength.

는 UV/VIS spectrometer (PERKIN ELMER Lambda 20)를 사용하여 550nm의 파장에서 흡광도와 염료농도에 대한 검량선으로부터 환산하였다.

폐 활성슬러지는 생활하수를 처리하는 S 하수처리장에서 침전공정에서 반송되는 폐 활성슬러지를 채취하여 사용하였다. 채취된 폐 활성슬러지는 200mm 구경의 채를 이용하여 협잡물을 제거하였으며, 이 폐 활성슬러지를 3000rpm에서 원심분리시켜 탈이온수로 세척하는 과정을 3회 반복하여 팽릿형태로 냉장보관하였다. 이 폐 활성슬러지를 실험시에 증류수에 재부유시켜 농도를 일정하게 조절한 후 실험하였다.

염료의 흡착실험은 폐 폐활성슬러지 현탁액(50 mL)과 염료용액(50 mL)를 각각 원하는 농도의 2배가 되도록 준비하여 300 mL의 삼각플라스크에서 1대1의 부피비로 혼합한 후 진탕배양기에서 100 rpm으로 교반하면서 반응시켰다. 흡착반응이 종료된 후 시료를 채취하여 3000 rpm에서 15분간 원심분리하여 상등액을 채취한 후 회석하여 염료의 흡광도를 측정하여 농도를 구하였다.

폐 활성슬러지 농도는 시료를 채취하여 습식법에 의한 폐 활성슬러지 건조중량을 측정하였다<sup>11)</sup>. 반응온도는 진탕배양기를 사용하여 30°C로 유지하고 pH는 6.8에서 실험하였다. 또한, 흡착제(폐 활성슬러지) 농도는 0.5 g/L로서 조절하여 사용하였다. 염료 농도는 4.77~178.27 mg/L로 하여 수행하였다.

### 4. 결과 및 토론

#### 4.1. 생체흡착 속도 예측

염료(Rh-B)의 생체흡착 실험에서 흡착평형 도달 시간은 폐 활성슬러지의 농도를 2.102 g/L, Rh-B의 농도를 4.77~178.27 mg/L로 변화시키면서 흡착시간에 따른 흡착량( $q$ )을 비교하여 Fig. 3에 나타내었다.

흡착 평형은 Rh-B 농도가 84.30 mg/L이하의 조건에서 2시간이내에 도달하였지만, 178.27 mg/L에서는 흡착평형에 도달하는 시간이 약 4시간정도 소요되었다. Namasivayam 등<sup>12)</sup>은 오렌지껍질에 Rh-B의 흡착시 평형에 도달하는 시간은 약 20분이라고 하였으나, 연구자에 따라 활성슬러지와 염료의 흡착평형 도달시간은 염료의 농도와 종류에 따라 달라진다고 하였다<sup>15-17)</sup>. 본 실험에서도 기존 연구결과와 유사하게 20.77 mg/L이하의 낮은 Rh-B 농도에서는 흡착평형에 도달하는 시간이 1시간 이하였지만, Rh-B 농도가 높아짐에 따라 흡착평형에 도달하는 시간이 지연되는 결과를 보였다.

생체흡착속도를 파악하기 위하여 Fig. 2의 실험자료를 Lagergen 동역학적 모델에 적용하였다. Rh-B

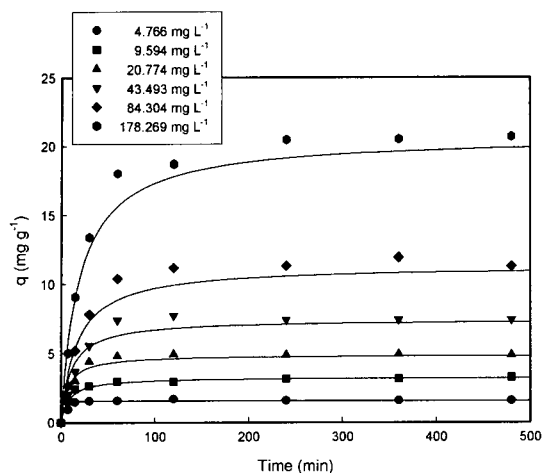


Fig. 3. Kinetics of Rh-B adsorption capacity by waste activated sludge. Lines represent fitting using pseudo-second equation model.

의 생체흡착속도는 Lagergen이 제시한 유사 1차 및 2차 반응속도식을 사용하였으며, Fig. 4는 실험자료를 식(2)의  $\log(q_e - q)$  대  $t$ 의 관계로부터 기울기와 절편을 구하여 유사 1차 반응의 속도상수,  $k_{1,ad}$ 와 예측치,  $q_{e,cal}$  값을 결정하였다.

또한, Fig. 5은 식(4)을 이용하여  $t/q$  대  $t$ 의 관계로부터 기울기와 절편으로 유사 2차 반응의 속도상수  $k_{2,ad}$ 와 예측치,  $q_{e,cal}$  값을 결정하였다. Table 1은 생체흡착 속도상수( $k_{1,ad}$  및  $k_{2,ad}$ ) 및 예측치,  $q_{e,cal}$ 를 나타내었다.

Rh-B의 농도에 따른 생체흡착속도는 유사 1차 반응속도에 의한 모델링은 결정계수( $R^2$ )가 0.890에서 0.997로서 1시간이내의 반응 초기의 흡착량과 흡착시간의 관계로부터 모사된 값이기 때문에 고농도에서는 실험치,  $q_{e,exp}$ 와 예측치,  $q_{e,cal}$ 은 상당한 차이를 보였다. 그러나 유사 2차 반응에 의한 모사는 모든 농도구간에서 결정계수가 0.997이상으로 정확한

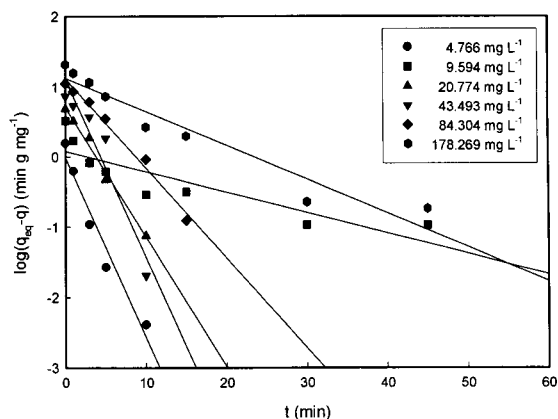


Fig. 4. Pseudo-first order kinetics for Rh-B adsorption to waste activated sludge.

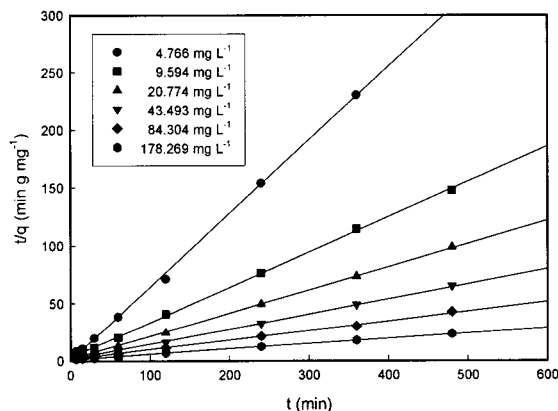


Fig. 5. Pseudo-second order kinetics for Rh-B adsorption to waste activated sludge.

모사가 가능하였다. 4.766과 84.304 mg/L의 Rh-B 농도에서 측정된 흡착량은 1.565와 11.299 mg/g이고 이론 흡착량이 1.570 mg/g과 11.979 mg/g로서 측정치와 이론치의 흡착량은 거의 일치하였다. 본 실험에서 Rh-B의 생체흡착이 유사 1차 반응속도

Table 1. Comparison of the first- and second-order adsorption rate constants and calculated and experimental  $q_e$  values obtained at different initial Rh-B concentrations

$C_{Rh-B}$ (mg L <sup>-1</sup> )	$q_{e,exp}$ (mg g <sup>-1</sup> )	$k_{1,ad}$ (min <sup>-1</sup> )	$q_{e,cal}$ (mg g <sup>-1</sup> )	$r^2$	$k_{2,ad}$ (g mg <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	$q_{e,cal}$ (mg g <sup>-1</sup> )	$r^2$
4.766	1.565	6.194	1.179	0.938	2.024	1.570	0.999
9.594	3.256	7.195	2.615	0.890	0.037	3.273	0.999
20.774	4.870	71.337	4.870	0.994	0.030	4.983	0.999
43.493	7.397	2.833	7.250	0.928	0.013	7.622	0.998
84.304	11.299	4.900	7.562	0.997	0.005	11.979	0.997
178.269	20.672	-	-	-	0.003	21.585	0.999

보다는 유사 2차 반응속도 모델에 잘 일치하였으며, 이러한 결과는 Rh-B 분자가 활성슬러지 표면에 생체흡착되는 현상이 전자 공유 및 이온교환이 이루어지는 화학흡착(chemisorption)이 유효단계로 작용한 것으로 사료되었다. 다른 연구에서 유사 2차 반응속도식에 의해 실험치와 이론적 예측치가 매우 높은 결정성을 가지는 것이 피흡착제(중금속<sup>8)</sup>, 염료<sup>14)</sup>)와 흡착제(조류)의 흡착 현상이 화학흡착에 의한 반응유효 단계가 결정되기 때문이라고 제안한 바 있다. 건조 활성슬러지를 이용한 Reactive Blue 2와 Reactive Yellow 2의 생체흡착에서 흡착평형시간은 고농도에서도 1시간 이내에 흡착등온에 도달하였으며, 유사 2차 반응 모델에 의해 잘 모사된다고 하였다<sup>16)</sup>.

4.2. 흡착등온 모델

생체흡착에서 흡착평형은 Rh-B의 농도와 흡착제량의 관계로부터 Rh-B의 흡착량(capacity) 및 친화도(affinity)를 알 수 있다. 흡착평형에 대한 예측은 다른 운전조건하에서 흡착 공정의 설계 및 운전 최적화를 위한 기초적인 자료가 될 수 있다.

본 실험에서는 생체흡착의 기초설계인자를 도출하기 위하여 Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson 및 Koble-Corrigan 모델식을 사용하여 계산하였다<sup>9)</sup>. 흡착등온 실험을 위한 조건은 폐 활성슬러지 농도를 2.01 g/L로 일정하게 하여 흡착평형시간을 2시간

으로 한 상태에서 Rh-B 농도를 4.77~178.27 mg/L로 변화시켰다.

Fig. 6와 7는 식(6)과 식(7)을 사용하여 Langmuir와 Freundlich 흡착등온식에 의해 Rh-B의 흡착량을 모사한 것이다.

Table 2는 Langmuir와 Freundlich 흡착등온식을 실험치에 적용시켜  $q_{max}$ ,  $b$ ,  $K_F$  및  $1/n$ 를 계산하여 나타내었다. Langmuir 흡착등온식에 의한 이론적 Rh-B의 최대흡착량이 24.13 mg/g으로 나타났다. 결정계수( $r^2$ )는 Langmuir 식이 0.845에 비해 Freundlich 식이 0.983으로서 더 잘 모사됨을 알 수 있었다.

또한, 실험치와 이론적 예측치의 정확한 모사를 위하여 Langmuir와 Freundlich 흡착등온식을 개선한 경험식 Redlich-Peterson과 Koble-Corrigan 식을 이용하여 Rh-B의 생체흡착량을 모사하였다. Fig. 8과 Fig. 9은 식(8)과 식(9)를 사용하여 Redlich-Peterson 식과 Koble-Corrigan 식에 의해 Rh-B의 흡착량을 모사하기 위한 상수  $\beta$ 와  $1/n$ 을 시행오차법(trial and error method)으로서 계산하여 나타낸 것이다.

Redlich-Peterson 식은  $\beta$ 가 0.80, 0.65, 0.48, 및 0.30에서 결정계수가 각각 0.899, 0.937, 0.970 및 0.986로서 나타났으며,  $\beta$ 가 0.48일 때 실험된 Rh-B 농도 범위에서 실험치와 예측치가 유사하게 된다는 것을 알 수 있었다. 본 실험의 결과에서  $\beta=0.48$ 로서

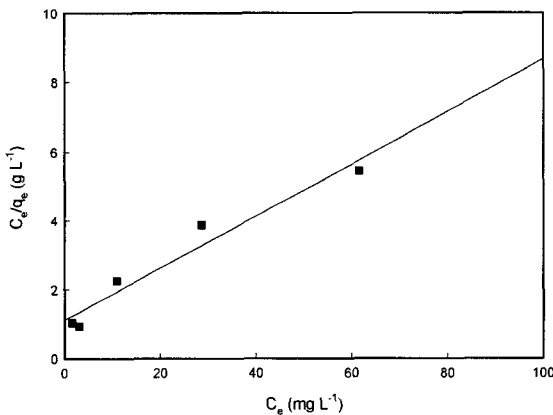


Fig. 6. The Linearized Langmuir adsorption isotherm of Rh-B adsorption to waste activated sludge.

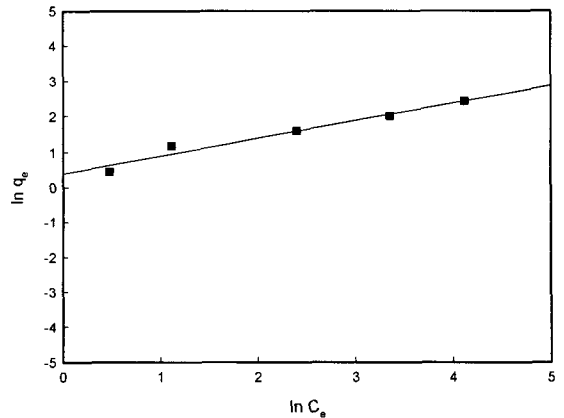


Fig. 7. The Linearized Freundlich adsorption isotherm of Rh-B adsorption to waste activated sludge.

Table 2. Equilibrium constants of Langmuir and Freundlich isotherm for Rh-B adsorption onto waste activated sludge

Langmuir				Freundlich			
$q_{max}(mgg^{-1})$	$b$	$r^2$	$\epsilon(\%)$	$1/n$	$K_F$	$r^2$	$\epsilon(\%)$
24.127	0.025	0.845	21.195	0.568	1.171	0.983	9.996

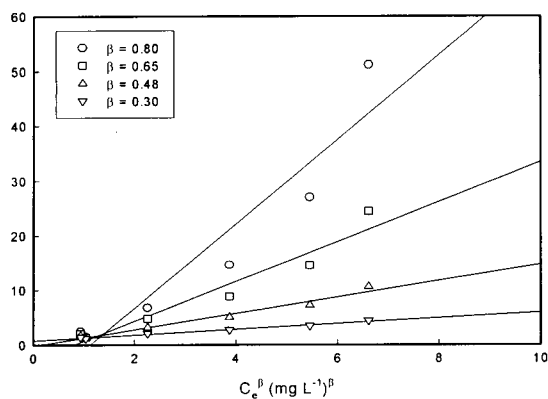


Fig. 8. The Linearized Redlich-Peterson model of Rh-B adsorption to waste activated sludge.

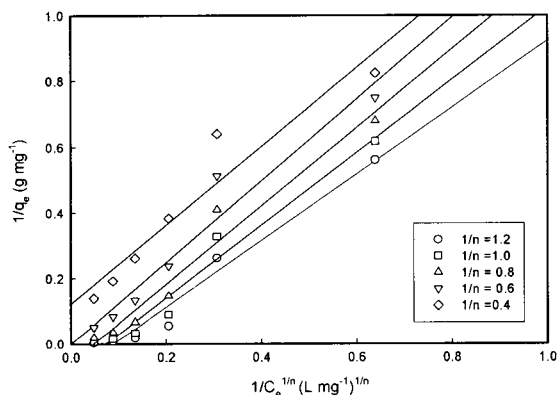


Fig. 9. The Linearized Koble-Corrigan model of Rh-B adsorption to waste activated sludge.

Langmuir 등온식의 평균 에러율이 21.20%인데 비해 Redlich-Peterson 식은 평균 에러율이 10.10%로서 더 정확한 모사가 가능하였다. Koble-Corrigan 식은 1/n이 1.2, 1.0, 0.8, 0.6 및 0.4에서 결정계수가 각각 0.967, 0.966, 0.959, 0.945 및 0.918로서 Redlich-Peterson 식에 비해 약간 낮기는 했지만, 1/n이 0.6에서 평균에러율이 11.76%로 나타내었다.

Fig. 10은 폐 활성슬러지의 흡착평형 실험치를 Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson 및 Koble-Corrigan 모델에 의한 흡착평형 예측치를 비교하여 나타내었다. Table 2와 3에 나타낸 것과 같이 평균

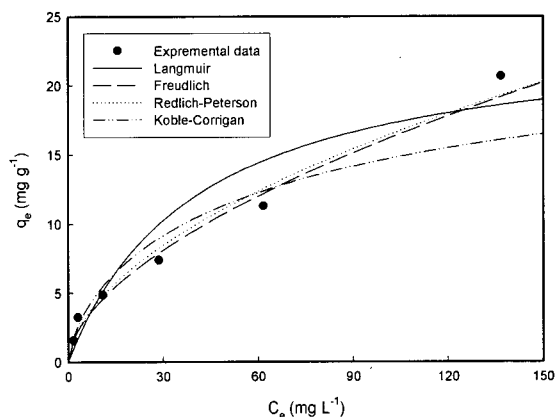


Fig. 10. The model fitting of the Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson and Koble-Corrigan equations for Rh-B adsorption to waste activated sludge.

Table 3. Equilibrium constants of Redlich-Peterson and Koble-Corrigan model for Rh-B adsorption onto waste activated sludge

Redlich-Peterson					Koble-Corrigan				
K <sub>RP</sub>	a <sub>RP</sub>	b	r <sup>2</sup>	ε(%)	q <sub>max</sub> (mgg <sup>-1</sup> )	b	1/n	r <sup>2</sup>	ε(%)
4.156	2.687	0.480	0.970	10.102	74.710	0.018	0.600	0.945	11.757

Table 4. A comparison of calculated value, q<sub>e,cal</sub>, by Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson and Koble-Corrigan models and experimental value, q<sub>e,exp</sub>, obtained at different Rh-B dye concentrations

C <sub>e</sub> (mgL <sup>-1</sup> )	q <sub>e,exp</sub> (mgg <sup>-1</sup> )	q <sub>e,cal</sub> (mgg <sup>-1</sup> )			
		Langmuir	Freundlich	Redlich-Peterson	Koble-Corrigan
0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.000
3.0	3.3	1.684	2.207	2.268	2.486
11.0	4.9	5.134	4.572	4.812	5.164
28.6	7.4	9.971	7.881	8.238	8.706
61.6	11.3	14.536	12.182	12.538	12.910
136.7	20.7	18.598	19.168	19.280	18.834

에러율이 Langmuir 식은 21.20%이었으나 Freundlich, Redlich-Peterson 및 Koble-Corrigan 식은 평균 에러율이 각각 9.99%, 10.10% 및 11.76%로 비교적 낮은 값을 나타내었다. Langmuir와 Koble-Corrigan 식은  $C_e$ 가 11.0 mg/L이상의 농도 영역에서 실험치와 예측치가 차이를 보인다는 것을 알 수 있었다. 그러나 Freundlich와 Redlich-Peterson 식은 실험된 평형농도범위의  $C_e$ 에서 실험치와 예측치가 상당히 실험치에 근접한 결과를 나타내었다. Table 4는 상기의 4가지 모델에 의한 예측치와 실험치를 비교한 것이다. 평형농도,  $C_e$ 가 136.7 mg/L에서 실험치,  $q_{e,exp}$ 은 20.7 mg/g이었다. Freundlich와 Redlich-Peterson 식에 의한 예측치,  $q_{e,cal}$ 는 각각 19.17과 19.28 mg/g로서 Langmuir와 Koble-Corrigan 식에 의한 예측치,  $q_{e,cal}$ 는 18.60와 18.83 mg/g보다 실험치에 근접하였다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 폐 활성슬러지와 반응성 염료인 Rhodamine B를 이용하여 염료의 흡착능력을 흡착속도(Lagergen 식)와 흡착등온(Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson 및 Koble-Corrigan 식)에 대한 다양한 모델식을 이용하여 실험치와 이론적 예측치를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

폐 활성슬러지에 Rhodamine B가 생체흡착될 때 흡착속도는 유사 1차 반응속도 보다는 유사 2차 반응속도 모델에 잘 일치하였으며, 이러한 결과는 Rhodamine B 분자가 폐 활성슬러지 표면에 생체흡착되는 현상이 화학흡착(chemisorption)이 율속단계로 작용한 것으로 사료되었다.

Rhodamine B의 흡착등온은 평균 에러율로 비교하였을 때 Langmuir 식은 21.20%이었으나 Freundlich, Redlich-Peterson 및 Koble-Corrigan 식은 평균 에러율이 각각 9.99%, 10.10% 및 11.76%로 비교적 낮은 값을 나타내었다. Langmuir와 Koble-Corrigan 식은  $C_e$ 가 11.0 mg/L이상의 농도 영역에서 실험치와 예측치가 차이를 보인다는 것을 알 수 있었으며, Freundlich와 Redlich-Peterson 식은 실험된 평형농도범위의  $C_e$ 에서 실험치와 예측치가 상당히 실험치에 근접한 결과를 나타내었다.

## 참 고 문 헌

- Kumar, K. V. and A. Kumaran, 2005, Removal of methylene blue by mango seed kernel powder, *Biochem. Eng. Jour.*, 27, 83-93.
- Gupta, V. K., I. Ali and M. D. Suhas, 2003, Equilibrium uptake and sorption dynamics for the removal of a basic dye using low-cost adsorbents, *J. Colloid. Interface Sci.*, 265, 257-264.
- 한태성, 윤현희, 김병식, 1998, 산성염료폐수 처리에서 염료물성에 따른 응집 탈색효율에 관한 연구, *화학공학*, 36(1), 20-26.
- Rozada, F., L. F. Calvo, A. I. García, J. Martín-Villacorta and M. Otero, 2003, Dye adsorption by sewage sludge-based activated carbons in batch and fixed-bed systems, *Biores. Tech.*, 87(3), 221-230.
- Göksungur, Y., S. Üren and U. Güvenç, 2005, Biosorption of cadmium and lead ions by ethanol treated waste baker's yeast biomass, *Bioresour. Tech.*, 96(1), 103-109.
- Chen, J. P., W. R. Chen and R. C. Hsu, 1996, Biosorption of copper from aqueous solutions by plant root tissues, *J. of Ferm. & Bioeng.*, 81(5), 458-463.
- Crist, R. H., K. Oberholser, N. Shank and M. Nguyen, 1981, Nature of bonding between metallic ions and algal cell walls, *Environ. Sci. Technol.*, 15(10), 1212-1217.
- Davis, T. A., B. Volesky and A. Mucci, 2003, A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae, *Wat. Res.* 37(18), 4311-4330.
- Neufield, R. D. and E. R. Herman, 1975, Heavy metal removal by activated sludge, *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, 47, 310-329.
- Aldrich, C. and D. Feng, 2000, Removal of heavy metals from wastewater effluents by biosorptive flotation, *Mine. Eng.*, 13(10-11), 1129-1138.
- Gulnaz, O., A. Kaya, F. Matyar and B. Arıkan, 2004, Sorption of basic dyes from aqueous solution by activated sludge, *J. Hazardous Materials*, B108, 183-188.
- Khattri, S. D. and M. K. Singh, 1999, Colour removal from dye wastewater using sugar cane dust as an adsorbent, *Adsorpt. Sci. Technol.*, 17, 269-282.
- Namasivayam, N., K. Muniasamy, M. Gayatri, K. Rani and K. Ranganathan, 1996, Removal of Dyes from Aqueous Solutions by Cellulosic Waste Orange Peel, *Biores. Technol.*, 57, 37-43.
- Aksu, Z. and S. Tezer, 2004, Biosorption of reactive dyes on the green alga *Chlorella vulgaris*

- ris, *Process Biochemistry*, 40(3-4), 599-613.
15. Chu, H. C. and K. M. Chen, 2002, Reuse of activated sludge biomass: I. Removal of basic dyes from wastewater by biomass, *Process Biochem.*, 37, 595-600.
16. Aksu, Z., 2001, Biosorption of reactive dyes by dried activated sludge : equilibrium and kinetic modelling, *Biochem. Eng. J.*, 7, 79-84.
17. Basibuyuk, M. and C. F. Forster, 2002, Reuse of activated sludge biomass: II. The rate processes for the adsorption of basic dyes on biomass, *Process Biochem.*, 37, 1129-1134.