

## 폐 슬러지를 이용한 Rhodamine B의 생체흡착시 반응특성에 관한 연구

이 창 한 · 안 갑 환 · 송 승 구\*  
부산가톨릭대학교 환경시스템학부 · 부산대학교 화학공학과  
(2004년 3월 11일 접수; 2004년 7월 16일 채택)

### A study on the reaction characteristics at the biosorption of Rhodamine B using waste sludge

Chang-Han Lee, Kab-Hwan Ahn and Seung-Koo Song\*  
School of Environ. Sci., Catholic University of Pusan, Busan 609-757, Korea  
\*Dept. of Chem. Eng., Pusan National University, Busan 609-735, Korea  
(Manuscript received 11 March, 2004; accepted 16 July, 2004)

The properties of biosorption of dye(Rhodamine B) was investigated to figure out the effects of temperature as a function of dye concentration and sludge concentration by the Langmuir and Lagergen adsorption model. It was found that the uptake capacity of biosorption was increased at low temperature. The Langmuir adsorption model was found suitable for describing the biosorption of the dye. The experimental results indicated that the dye uptake process followed the pseudo-first-order kinetics.

Key Words : Waste sludge, Langmuir model, Rhodamine B, Specific surface area, Biosorption

#### 1. 서 론

최근 급속한 산업의 발전은 인류에게 물질문명의 풍요를 안겨주었지만 다양한 오염 물질의 발생으로 자연 생태계의 파괴도 더불어 제공하였다. 하천이나 강으로 배출되는 생활하수, 산업폐수, 각종 폐기물의 매립 및 농약 살포 등의 다양한 오염 물질의 배출로 인해 지구 환경이 파괴되고 있을 뿐만 아니라 인류의 건강까지 위협 당하고 있다. 현재 염색공장 및 공단지역에서 배출되는 염색폐수는 유해 중금속, 난분해성 유기물질 및 폐수색도의 처리에 많은 문제점이 발생되고 있다.

염색폐수의 처리방법은 물리·화학적 및 생물학적 처리방법으로 나눌 수 있다. 현재 사용되고 있는 물리·화학적 염색폐수 탈색처리 방법은 응집법(무기응집제, 고분자 응집제), 흡착법(활성탄, 이온교환수지, 실리카겔 등) 및 산화법(염소, 과산화수소, 표백제 등) 등이다. 최근, 개발된 전해산화법 및 오

존산화법은 높은 처리효율을 얻을 수 있지만 높은 처리비용이 문제점으로 대두되고 있다<sup>1)</sup>. 생물학적 처리공정은 염료분해 미생물에 영양분 공급과 염료의 분해시간이 긴 것으로 알려져 있으며, 이러한 단점을 다소 보완한 생체흡착(biosorption) 공정은 발효 및 하·폐수처리 공정에서 발생하는 폐 바이오매스를 이용하여 미생물의 활성에 관계없이 유해물질, 중금속, 그리고 염료 등을 선택적으로 흡착 및 회수가 가능한 공정이다<sup>2)</sup>. 특히, 하·폐수처리장에서 발생하는 슬러지는 함수율이 80%이상으로 매립, 소각, 재활용 등에 있어 어려움을 겪고 있어 폐슬러지의 처리 및 재이용 방안이 문제시 되고 있다. 그러나, 이들 공정에서 발생하는 폐슬러지를 이용한 염료<sup>3-6)</sup> 및 중금속<sup>7)</sup>의 생체흡착에 관한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구는 하·폐수처리장에서 발생하는 폐슬러지를 염색폐수의 생체흡착제로 사용하여 폐슬러지의 활용성을 증진시키고자 하였다. 생체흡착 실험은 2차 침전조에서 발생된 폐슬러지를 생체흡착제(biosorbent)로 하여 염료(Rhodamine B) 및 슬러지 농도 변화에 따른 염료 흡착량과 반응온도에 따른

Corresponding Author : Kab-Hwan Ahn, School of Environ. Sci., Catholic University of Pusan, Busan 609-757, Korea  
Phone : +82-51-510-0623  
E-mail : khahn@cup.ac.kr

흡착 특성을 실험한 후 Langmuir와 Lagergen 모델을 사용하여 모델 상수를 도출하였다.

1.1. 흡착등온모델

폐 슬러지와 염료 용액을 혼합하면 일정한 온도에서 폐 슬러지에 흡착되는 염료의 양은 용액의 염료농도와 평형을 이룬다. 염료의 흡착평형은 일반적인 흡착평형과 유사하게 높은 염료 농도에서는 일정한 최대 흡착량을 나타내고, 흡착량이 급격히 증가하는 경향을 나타내는데 이러한 특성으로부터 폐 슬러지에 흡착되는 염료의 친화도(affinity)를 알 수 있다. 본 실험에서는 위의 가정들을 가장 잘 만족하는 Langmuir모델을 이용하여 흡착량을 구하였다. Langmuir모델은,

$$q = \frac{q_{eq}bC_e}{1 + bC_e} \tag{1}$$

와 같이 표현되면, 이 식을 역수로 취하면 식(2)을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_{eq}bC_e} + \frac{1}{q_{eq}} \tag{2}$$

1.2. 생체흡착에 대한 동역학적 모델

생체흡착의 율속(또는 반응속도)에 대한 연구를 위하여 식(3)과 같은 동역학적 모델을 본 실험에 사용하였다. 유사 1차 반응식은 용액중의 염료 농도가 세포표면의 염료 농도와 동일하다는 가정하에서 사용하였다. Lagergen이 제시한 1차 반응식은 고형물량을 기초로 하였으며, 식(3)과 같이 나타낼 수 있다<sup>6)</sup>.

$$\frac{dq}{dt} = k_{1,ad}(q_{eq} - q) \tag{3}$$

경계조건을  $t=0$ 에서  $q=0$ ,  $t=t$ 에서  $q=q$ 로 하여 적분하면 식(3)은 다음과 같이 된다.

$$\log(q_{eq} - q) = \log q_{eq} - \frac{k_{1,ad}}{2.303} t \tag{4}$$

식(4)에 제시된 모델의  $\log(q_{eq} - q)$ 와  $t$ 의 관계로부터  $k_{1,ad}$ 를 구하였다. 식(4)에 적용을 위한 평형흡착농도,  $q_{eq}$ 는 실험으로 구하여 식(3)의 모델식에 의한 이론치와 비교하였다. 염료의 생체흡착은 다양한 바이오매스를 이용하여 중금속과 염료에 대한 흡착 특성이 보고한 바 있으며, 흡착 특성은 흡착제와 피흡착물의 특성, 반응온도, 그리고 pH에 따라 달라진다고 하였다<sup>3~8)</sup>.

2. 재료 및 방법

2.1. 염료 및 활성슬러지

Rhodamine B(basic violet 10 : C.I. 45170)는 acid

chain을 가진 양이온성 염료(cationic dye)로서 물이나 유기용매에 잘 용해된다. 이 염료는  $-N_2(C_2H_5)$ 와  $=N^+(C_2H_5)_2$ 의 측쇄를 가지는 공명구조(Fig. 1)를 가지고 있으며, Fig. 2에 나타낸 바와 같이 가시영역 파장인 550nm부근에서 안정적인 최대흡수파장을 가진다. 염료 농도는 UV/VIS spectrometer (PERKIN ELMER Lambda 20)를 사용하여 550nm의 파장에서 흡광도를 측정된 후 검량선을 이용하여 농도로 환산하였다.

폐 슬러지는 S 하수처리장(생활하수처리공정)와 J 하수처리장(공장폐수처리공정)의 침전조에서 반송되는 슬러지를 채취하여 사용하였다.

2.2. Rhodamine B의 흡착실험

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

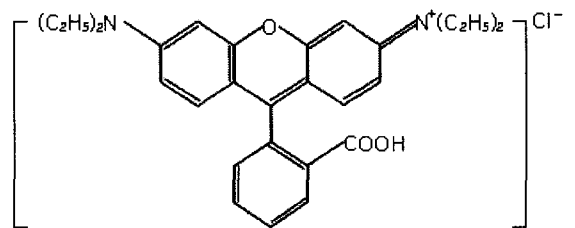


Fig. 1. Structure of Rhodamine B.

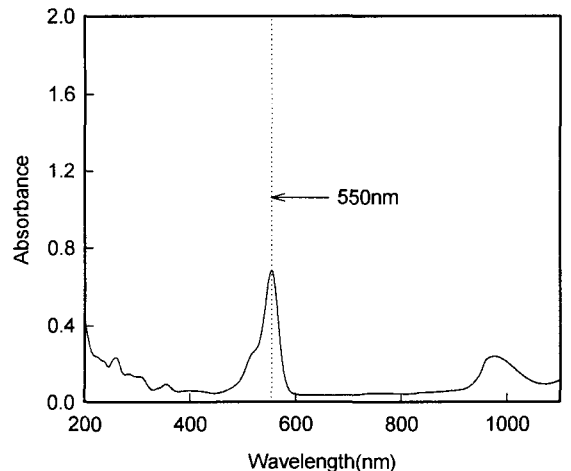


Fig. 2. UV/VIS spectrum of Rhodamine B with wavelength.

폐 슬러지 농도는 시료를 채취하여 습식법에 의한 폐 슬러지 건조중량을 측정하였다<sup>9)</sup>. 반응온도는 진탕배양기를 사용하여 반응조의 온도를 5, 15, 30°C로 유지한 상태에서 폐 슬러지 농도를 일정하게 유지하여 실험하였다. 염료 초기 농도는 반응조의 온도를 5°C로 유지한 후 9.19~379.23  $\mu\text{mol/L}$  범위로 변화시키면서 흡착시켰다. 또한 반응조의 온도를 5°C로 유지하고 염료농도를 379.23  $\mu\text{mol/L}$ 로 하여 폐 슬러지의 초기농도를 1.0~6.0g/L로 바꾸어 가며 실험하였다. 실험에서 도출된 염료의 흡착량으로부터 식(1)과 식(2)의 Langmuir 모델에 의해 최대흡착량,  $q_{\text{eq}}$ 을 구하고, 식(3)과 식(4)의 Lagergen 모델로서 흡착반응속도를 구하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1. 폐 슬러지의 입도 분포

Fig. 3은 pH 7에서 S 슬러지와 J 슬러지 플록의 입도 분포를 나타낸 것이다. S 슬러지는 8  $\mu\text{m}$ 와 50  $\mu\text{m}$  부근에서 피크를 가지는 2봉 분포(bimodal distribution)로서 평균입경은 39.136  $\mu\text{m}$ 인 반면, J 슬러지는 25  $\mu\text{m}$  부근에서 피크를 가지는 1봉 분포(monomodal distribution)로서 평균입경은 30.198  $\mu\text{m}$ 이었으며, J 슬러지가 S 슬러지에 비해 평균입경이 작게 나타났다. 이 결과에서 슬러지 플록의 평균입경의 차이는 각 처리장의 원수 특성에 의한 슬러지 특성의 영향이라고 사료된다.

#### 3.2. Rhodamine B 초기농도의 영향

초기 Rhodamine B 농도에 따른 S 슬러지와 J 슬러지의 건조무게당 흡착량 변화를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 흡착조건을 알아보기 위해서 S 슬러지와 J 슬러지의 농도를 2.01 g/L와 1.81 g/L로 일정하게 유지한 후 Rhodamine B의 초기농도를 각각 9.95~372.17  $\mu\text{mol/L}$ 와 9.19~379.23  $\mu\text{mol/L}$ 로 변화

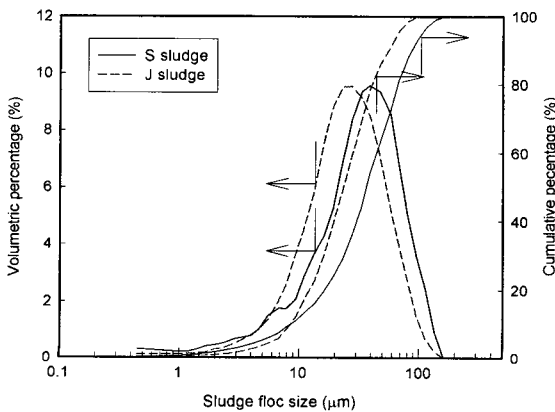


Fig. 3. Floc size distributions of S and J sludges.

시키면서 흡착시켰다. 폐 슬러지와 Rhodamine B의 흡착반응은 반응초기에 급격하게 일어났다. 본 실험에서 사용한 Rhodamine B의 모든 초기농도에서 S 슬러지와 J 슬러지에 의한 흡착은 1시간 이내에 흡착 평형에 도달함을 알 수 있었다. 또한 슬러지의 종류에 따라 흡착량이 달라짐을 알 수 있었다. Namasivayam 등<sup>10)</sup>은 오렌지껍질에 염료 흡착시 흡착평형시간은 Congo red, Procion orange 및 Rhodamine B의 경우 각각 90, 25 및 20분으로서 염료의 종류에 영향을 받으며, Aksu 등<sup>6)</sup>은 Remazol Blue reactive dye의 흡착실험에서 미생물의 종류에 따라 흡착속도가 달라진다고 보고하였다. 이들의 보고와 본 실험의 결과에서 Rhodamine B의 흡착속도

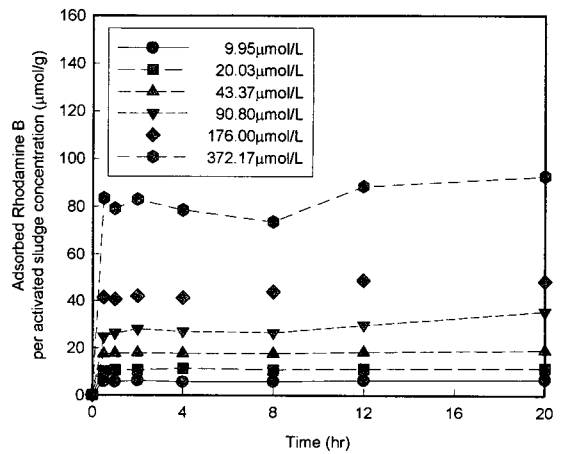


Fig. 4. Effect of reaction time on the Rhodamine B adsorption to S sludge with the change of initial dye concentration.

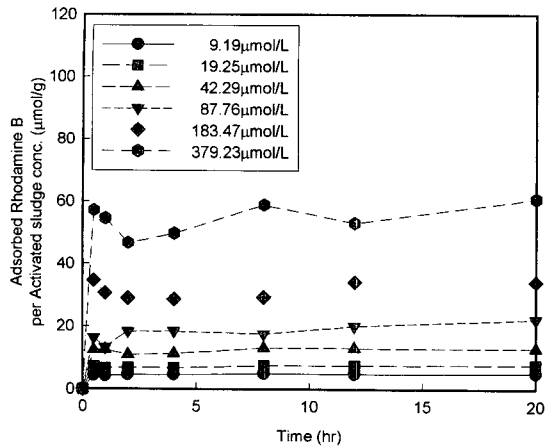


Fig. 5. Effect of reaction time on the Rhodamine B adsorption to J sludge with the change of initial dye concentration.

는 폐 슬러지의 특성에 영향을 받으며, 1시간 이내에서 반응에 의해 흡착평형에 도달하는 특성을 보였다.

3.3. 폐 슬러지 초기농도의 영향

Fig. 6은 S 슬러지와 J 슬러지의 농도에 따른 활성슬러지 단위질량당 Rhodamine B의 흡착량을 나타낸 것이다. 이 결과에서 S 슬러지가 J 슬러지에 비해 단위질량당 염료흡착량이 약 2배정도로 높게 나타났으며, 이전 연구의 염료흡착에 따른 슬러지 플록의 비표면적이 S 슬러지가 123.61m<sup>2</sup>/g로서 41.53 m<sup>2</sup>/g인 J 슬러지에 비해 높게 나타난 결과와 일치하였다<sup>11)</sup>.

초기 Rhodamine B 농도는 379.22 μmol/L로 하였으며, 슬러지 초기농도를 1.0~5.3 g/L로 하여 흡착량의 변화를 측정하였다. 농도가 1.0~3.0 g/L에서 S 슬러지의 단위질량당 Rhodamine B의 흡착량이 약 63.0 μmol/g으로서 거의 일정하다는 것을 알 수 있었다. J 슬러지는 1.0~3.0 g/L의 범위에서 약 31.0 μmol/g의 흡착량을 나타내었다. J 슬러지를 사용할 경우 3.0 g/L이상의 농도에서는 슬러지 단위질량당 염료 흡착량이 20.0 μmol/g까지 점차 감소하였다. 1.0~3.0 g/L의 농도에서는 S 슬러지와 J 슬러지에서

염료 흡착량이 각각 일정한 값을 나타내었다. 이 결과는 슬러지 농도가 증가함에 따라 슬러지 플록의 평균입경<sup>12)</sup>과 슬러지부피지수(Table 1)가 변화되어 슬러지의 표면적이 감소하기 때문에 슬러지 단위 질량당 염료 흡착량이 감소한 것으로 사료되었다. Andeadakis 등<sup>13)</sup>은 활성슬러지에 염료(Lissamine Scarlet 4R)를 흡착시켰을 때 0.3~2.0 g/L의 농도 범위에서만 약 130.0 μmol/g biomass로서 거의 일정한 흡착량을 가진다고 보고하였다.

3.4. 염료 흡착시 반응온도의 영향

Fig. 7은 반응온도를 5℃, 15℃ 그리고 30℃로 하였을 때 Rhodamine B의 흡착량을 나타내었다. 반응온도에 따른 S 슬러지의 최대 흡착량(q<sub>eq</sub>)은 각각 75.04 μmol/g, 61.68 μmol/g 그리고 39.23 μmol/g 이었고, J 슬러지는 47.75 μmol/g, 54.54 μmol/g 그리고 56.17 μmol/g로 나타내었다. Rhodamine B 흡착시 두 활성슬러지에서 모두 온도가 낮을수록 흡착량이 증가한다는 것을 알 수 있었다. 이전 연구자들에 의해 제시된 생체흡착에 있어 반응온도는 열역학적인 특성<sup>8)</sup>과 바이오매스의 생화학적 특성<sup>5)</sup>에 영향을 받는다고 알려져 있다. Fig. 7의 결과는 기존 염료의 온도에 대한 특성과 달리 흡착량이 온도에 반비례

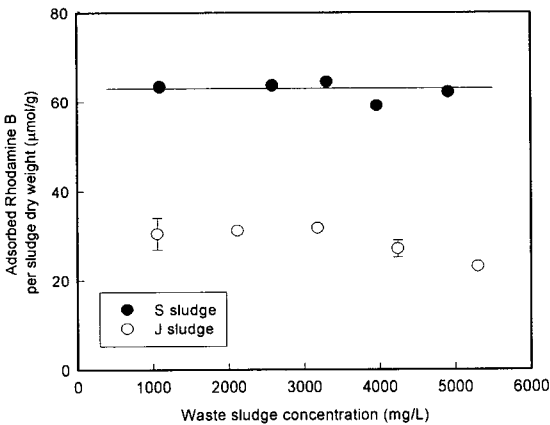


Fig. 6. Effect of waste sludge concentration on the Rhodamine B adsorption.

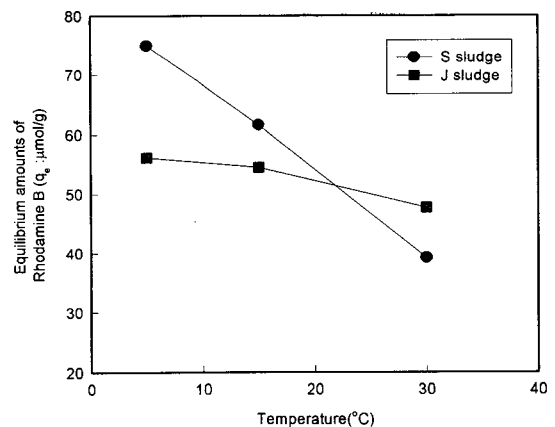


Fig. 7. Effect of temperature on Rhodamine B adsorption.

Table 1. Physico-chemical characteristics of S and J sludge

Sludge concentration (mg/L)		Sludge Volume Index (SVI : mL/mg)		Sludge floc density (g/cm <sup>3</sup> )	
S sludge	J sludge	S sludge	J sludge	S sludge	J sludge
1097	1060	165	179	1.037	1.024
2587	2120	163	172	1.035	1.021
3307	3180	158	167	1.038	1.025
3970	4240	155	158	1.033	1.023
4913	5300	154	159	1.037	1.023

하였으며, 이러한 현상은 폐 슬러지와 Rhodamine B의 흡착반응이 발열반응으로 진행되기 때문에 온도가 낮아짐에 따라 반응열을 감소시킬 수 있어 흡착량이 증가한 것으로 사료되지만, 염료의 흡착반응에 대한 반응기구에 관한 현상은 명확히 해석하기 어렵다고 사료된다. 그러나, 흡착시 반응온도는 폐 슬러지의 세포 외 고분자 물질(EPS)의 생성 영향을 줄 것이라고 가정하여 반응온도를 5~30°C로 하여 10°C간격으로 세포 외 고분자 물질 추출량을 비교하였다(Fig. 8). 온도가 증가함에 따라 세포 외 고분자 물질의 방출량은 0.02~0.065 g EPS/g으로 증가하는 것을 알 수 있었다. 하지만, 활성슬러지의 표면에 존재하는 세포 외 고분자 물질에 의해 Rhodamine B의 흡착량이 증가하기 보다는 흡착반응의 열역학적인 특성에 기인하여 흡착량이 변화한 것으로 사료된다.

*S. uvarum*을 이용한 Azo계 염료의 흡착시 온도에 비례하여 흡착량이 증가한다고 보고된 바 있으며<sup>14)</sup>, Chu 등<sup>15)</sup>은 활성슬러지를 이용한 basic dye에 대한 흡착에 있어서 20~40°C에서 최대흡착량은 변화하지 않지만 흡착속도는 온도에 따라 증가한다고 하였다. 그러나, *A. spinosus*을 이용한 구리흡착에서는 온도와 흡착량이 온도에 반비례한다는 경향을 보고한 바 있다<sup>8)</sup>.

### 3.5. 반응온도에 대한 반응속도론적 고찰

Fig. 9는 379.23 μmol/L의 초기 염료농도를 반응온도를 5, 15, 그리고 30°C하여 반응시간에 따른 염료흡착량을 나타낸 것이다. 2절의 염료농도의 영향에 대한 실험과 유사하게 반응시간이 120시간 이상이면 거의 평형 농도에 도달하였다. 하지만 온도가

증가할수록 흡착평형에 도달하는 시간이 늦어지면서 염료의 흡착량이 감소하였다. 반응시간이 240시간 후 5, 15, 및 30°C에서 Rhodamine B의 흡착량은 J 슬러지에서 55.14, 53.50, 및 44.68 μmol/g, 그리고 S 슬러지에서 74.92, 60.23, 및 38.35 μmol/g이었다.

초기 염료농도를 379.23 μmol/L로 하여  $\log(q_{eq} - q)$  대  $t$ 의 기울기와 절편으로부터 흡착속도에 관한 식(3)과 식(4)의 1차 반응식에서 속도상수  $k_{1,ad}$ 와  $q_{eq}$  값을 결정하였다. Fig. 10은 흡착시 초기 60분 동안의 흡착실험 결과를 식(4)와 같이 선형화하여 도시한 것이다. 이 결과에서 흡착반응속도 상수,  $k_{1,ad}$ 는 온도가 감소함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. Table 2에 나타낸 것과 같이 염료의 평형흡착량,  $q_{eq, cal}$ 은 S 슬러지와 J 슬러지에서 각각 67.46, 57.88, 및 36.08 μmol/g 그리고 53.03, 53.63, 및 47.02 μmol/g이었으며, S 슬러지와 J 슬러지의 반응속도상수,  $k_{1,ad}$ 는 각각  $5.00 \times 10^2 / \text{min}$  ( $R^2=0.90$ ),  $3.98 \times 10^2 / \text{min}$  ( $R^2=0.98$ ),

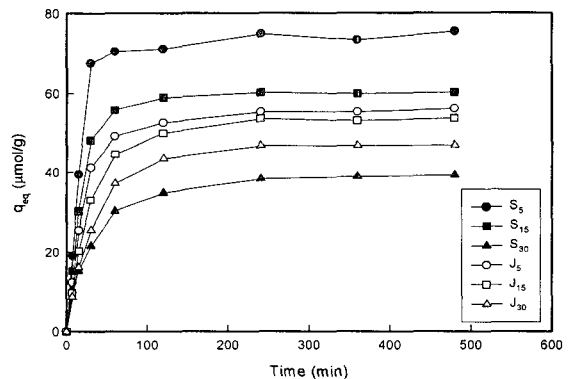


Fig. 9. Variation of Rhodamine B biosorption kinetics with temperature of S and J sludges at initial dye concentration of 379.12 mg/L.

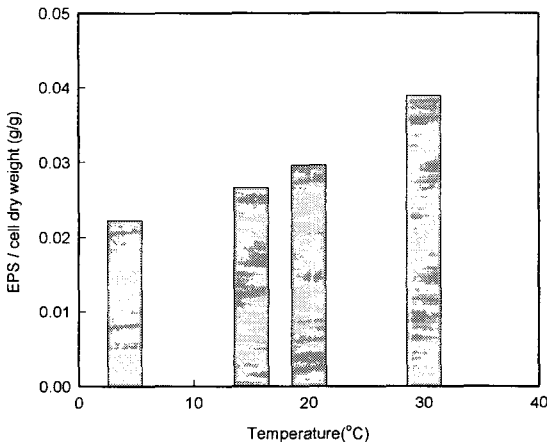


Fig. 8. Effect of temperature on the EPS extraction of S sludge.

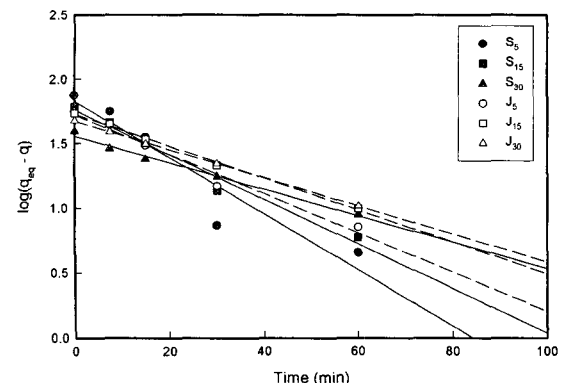


Fig. 10. Plot of  $\log(q_{eq} - q)$  vs.  $t$  obtained with change of temperature at initial dye concentration of 379.12 μmol/L.

Table 2. Experimental first-order rate constants and comparison of the calculated and experimental  $q_{eq}$  values obtained at different temperature conditions

Temperature (°C)			$C_0$ (μmol/L)	$q_{eq,exp}$ (μmol/g)	$k_{1,ad} \times 10^2$ (1/min)	$q_{eq,cal}$ (μmol/g)	$R^2$
S sludge	S <sub>5</sub>	5	379.23	75.04	5.00	67.46	0.90
	S <sub>15</sub>	15	379.23	61.68	3.98	57.88	0.98
	S <sub>30</sub>	30	379.23	39.23	2.35	36.08	0.99
J sludge	J <sub>5</sub>	5	379.23	56.17	3.50	53.03	0.98
	J <sub>15</sub>	15	379.23	54.54	2.85	53.63	0.99
	J <sub>30</sub>	30	379.23	47.75	2.50	47.02	0.99

및  $2.35 \times 10^2 / \text{min}$  ( $R^2=0.99$ ) 그리고  $3.50 \times 10^2 / \text{min}$  ( $R^2=0.98$ ),  $2.85 \times 10^2 / \text{min}$  ( $R^2=0.99$ ), 및  $2.50 \times 10^2 / \text{min}$  ( $R^2=0.99$ ) 으로서 yeast를 사용한 Remazol blue reactive dye의 실험에서 2차 흡착반응속도식으로 잘 묘사된다는 Aksu<sup>5)</sup>의 결과와는 달리 염료의 평형흡착량,  $q_{eq}$ 은 식(4)의 1차 흡착 반응속도식에 의해 잘 묘사할 수 있음을 알 수 있었다. 다만 실험치와 이론치를 비교하면, 정성적인 경향은 일치하지만 정량적인 흡착량은 다소 차이를 나타내었다.

#### 4. 결 론

폐 활성슬러지와 반응성 염료인 Rhodamine B를 이용하여 염료의 초기농도 및 슬러지 초기농도, 그리고 반응온도 등의 변화에 따른 흡착특성을 조사한 본연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Rhodamine B의 초기농도에 따른 활성슬러지의 염료 흡착속도는 각 슬러지의 특성에 따라 영향을 받으며, S 및 J 슬러지 모두에서 반응초기에 급격히 흡착되고 1시간 이내에 흡착 평형에 도달함을 알 수 있었다.
- 2) S 슬러지와 J 슬러지는 초기농도가 모두 1.0~3.0g biomass/L에서 각각 일정한 염료 흡착량을 나타내지만, 4.2 g biomass/L 이상의 고농도 조건에서는 활성슬러지 플록의 평균입경이 증가되어 염료 분자가 흡착할 수 있는 슬러지의 표면적이 감소하여 슬러지 단위 질량당 흡착량이 감소하였다.
- 3) S 슬러지와 J 슬러지 모두에서 온도가 낮을수록 Rhodamine 흡착량이 증가하였다. 이러한 결과는 반응온도에 따른 활성슬러지의 표면에 존재하는 세포 외 고분자 물질의 방출량의 변화 따른 생화학적 특성의 변화보다는 Rhodamine 흡착반응의 열역학적인 특성에 기인하는 것으로 사료되었다.
- 4) 활성슬러지의 Rhodamine B 흡착 반응속도는 Langmuir 모델과 Lagergen 모델과 같이 유사 1차 반응식으로 묘사될 수 있었으며, 반응속도상수는 온도 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

#### Nomenclature

- $b$  = Lang adsorption constant, (1/μmol)
- $C_e$  = residual dye concentration at equilibrium, μmol/L
- $Q_{max}$  = Langmuir adsorption constant, μmol/g
- $q_{eq}$  = adsorbed dye quantity per gram of biomass at equilibrium, μmol/g
- $q$  = adsorbed dye quantity per gram of biomass, μmol/g
- $k_{1,ad}$  = the rate constant of first-order at biosorption, 1/min
- $t$  = reaction time of biosorption, min
- $R^2$  = linear correlation coefficient

#### 참 고 문 헌

- 1) 한태성, 윤현희, 김병식, 1998, 산성염료폐수 처리에서 염료물성에 따른 응집 탈색효율에 관한 연구, 화학공학, 36(1), 20-26.
- 2) 서정호, 1997, Saccharomyces cerevisiae와 Aureobasidium pullulans의 납 흡착 특성, 부산대학교 대학원 박사학위논문, 1-10pp.
- 3) Otero, M., F. Rozada, L. F. Calvo, A. I. García and A. Morán, 2003, Kinetic and equilibrium modelling of the methylene blue removal from solution by adsorbent materials produced from sewage sludges, Biochem. Eng. Jour., 15(1), 59-68.
- 4) 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.
- 5) Wang, J., C. P. Huang, H. E. Allen, D. K. Cha and D. W. Kim, 1998, Adsorption characteristics of dye onto sludge particulates, J. of Colloid and Interface Sci., 208(15), 518-528.
- 6) Aksu, Z. and Gönül Dönmez, 2003, A com-

- parative study on the biosorption characteristics of some yeasts for Remazol blue reactive dye, *Chemosphere*, 50, 1075-1083.
- 7) Arican, B., C. F. Gokcay and U. Yetis, 2002, Mechanistics of nickel sorption by activated sludge, *Process Biochem.*, 37(11), 1307-1315.
  - 8) Chen, J. P., W. R. Chen and R. C. Hsu, 1996, Biosorption of copper from aqueous solutions by plant root tissues, *J. of Fer. and Bioeng.*, 81(5), 458-463.
  - 9) APHA, AWWA and WEF, 1995, *Standard Methods*, 19th Edition.
  - 10) Namasivayam, C., N. Muniasamy, K. Gayatri, M. Rani and K. Ranganathan, 1996, Removal of Dyes from Aqueous Solutions by Cellulosic Waste Orange Peel, *Bioresource Technology*, 57, 37-43.
  - 11) 이창한, 윤준섭, 김도한, 나영수, 송승구, 2001, Rhodamine B를 사용한 염료흡착법에 의한 활성슬러지의 비표면적 측정, *대한환경공학회지*, 23(10), 1633-1639.
  - 12) Chaignon, V., 2002, Evolution of size distribution and transfer of mineral particles between flocs in activated sludges : an insight into floc exchange dynamics, *Wat. Res.*, 36, 676-684.
  - 13) Andreadakis, A. D., 1993, Physical and chemical properties of activated sludge floc, *Wat. Res.*, 27(12), 1707-1714.
  - 14) OLIVEIRA, J. E., 1983, Investigation on the Adsorption Equilibria of the Acid Azo Dye Amaranth(C.I. 16.185) from Aqueous Solutions on *Saccharomyces uvarum* IZ 1904 Cells, *Naturalia*, 8, 211-217.
  - 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(10), 595-600.