

## 입상활성탄에 의한 합성폐수의 용존유기물질의 새로운 흡착등온 모델 및 운동학적 흡착 연구

김성현<sup>1</sup>, 신성훈<sup>1</sup>, 김진혁<sup>1</sup>, 우달식<sup>1</sup>, 이호선<sup>2\*</sup>  
<sup>1</sup>(재)한국계면공학연구소 물환경연구센터, <sup>2</sup>인천대학교 SWG연구단

### Study of new adsorption isotherm model and kinetics of dissolved organic carbon in synthetic wastewater by granular activated carbon

Seung-Hyun Kim<sup>1</sup>, Sunghoon Shin<sup>1</sup>, Jinhyuk Kim<sup>1</sup>, Dalsik Woo<sup>1</sup> and Hosun Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Interfacial Science & Engineering Institute, Water Environmental Center

<sup>2</sup>Smart Water Grid Research Group, Incheon National University

**요약** 본 논문은 입상활성탄에 의해서 합성폐수에서의 용존유기탄소의 흡착평형과 회분식 실험을 통해 흡착성질을 파악하고자 하였다. 흡착평형의 새로운 모델식을 제안하였고 이 식을 바탕으로 회분식 실험데이터를 모사하였다. 합성폐수의 유기 성분은 Beef extract, Peptone, Humic acid, Tannic acid, Sodium lignin sulfonate, Sodium lauryl sulfate, Arabic gum powder, Arabic acid (polysaccharide),  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  등으로 구성되었다. 농도가 낮은 영역 (0~2.5 mg/L)에서는 선형적인 흡착평형을 보여주었고, 농도가 높은 영역 (2.5~6mg/L)에서는 우호적인 흡착평형을 보여주었다. 사용되어진 생물학적 처리방법에서 나오는 유출수의 합성폐수는 알려진 양으로 준비되어졌다. 흡착평형 모델링은 Freundlich, Langmuir, Sips 및 하이브리드 식을 이용하여 모사하였다. 특히, 선형과 Sips를 이용한 하이브리드 흡착평형식은 낮은 농도와 높은 농도 역에서 매우 좋은 흡착평형식이었다. 용수 및 폐수처리에 활성탄 흡착에 있어서, 선형식과 Sips식을 합친 새로운 하이브리드 식은 새로운 흡착평형식이 될 수 있었다. 하이브리드 흡착평형식 (선형+Sips)을 이용하여 LDFA 운동학적식을 통하여 다양한 흡착제 양에 따른 회분식 반응조에서의 실험데이터를 잘 모사할 수 있었다.

**Abstract** In this study, we conducted the adsorption equilibrium and batch experiments of dissolved organic carbon (DOC) in the wastewater by granular activated carbon (GAC). The components of organic compound were Beef extract (1.8 mg/L), Peptone (2.7 mg/L), Humic acid (4.2 mg/L), Tannic acid (4.2 mg/L), Sodium lignin sulfonate (2.4 mg/L), Sodium lauryl sulfate (0.94 mg/L), Arabic gum powder (4.7 mg/L), Arabic acid (polysaccharide) (5.0 mg/L),  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (7.1 mg/L),  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  (7.0 mg/L),  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  (19.8 mg/L),  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (0.71 mg/L). The adsorption characteristics of DOC in synthetic wastewater was described using the mathematical model through a series of isotherm and batch experiments. It showed that there was linear adsorption region in the low DOC concentration (0~2.5 mg/L) and favorable adsorption region in high concentration (2.5~6 mg/L). The synthetic wastewater used was prepared using known quantities of organic and/or inorganic compounds. Adsorption modelling isotherms were predicted by the Freundlich, Langmuir, Sips and hybrid isotherm equations. Especially, hybrid isotherm of Linear and Sips equation was a good adsorption equilibrium in the region of the both the low concentration and high concentration. In applying carbon adsorption for treating water and wastewater, hybrid adsorption equation plus linear equation with Sips equation will be a good new adsorption equilibrium model. Linear driving force approximation (LDFA) kinetic equation with Hybrid (linear+Sips) adsorption isotherm model was successfully applied to predict the adsorption kinetics data in various GAC adsorbent amounts.

**Key Words** : Adsorption, Dissolved Organic Carbon (DOC), Wastewater treatment, Synthetic Wastewater, Granular activated Carbon (GAC)

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12기술혁신C01)에 의해 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Hosun Lee(Incheon National Univ.)

Tel: +82-10-3333-6687 email: hilhs21@gmail.com

Received December 24, 2013

Revised (1st February 3, 2014, 2nd April 9, 2014)

Accepted April 10, 2014

## 1. 서론

일반적으로 사람들은 용수 및 하·폐수처리에 있어서 활성탄의 적용은 알려지지 않은 유기성분의 농도와 성분의 흡착을 어떻게 해석해야 될지 모르는 어려움에 직면하게 된다[1-3]. 왜냐하면, 물속에는 수많은 성분들이 존재하기 때문에 모든 성분에 대해서 다성분 흡착을 연구할 수 없기 때문이다. 그래서, 물속의 용존유기탄소를 측정하여 모든 유기성분을 조사하여 농도를 결정하게 된다. 반면, 흡착모델링 및 계산에 있어서 흡착평형과 운동학적 데이터를 해석하기 위해서는 알려진 흡착제와 흡착질의 명확한 정보가 요구된다. 흡착평형과 회분식 실험에서의 운동학적 실험데이터 없는 흡착모델과 이론을 적용하기 힘들고 공정을 디자인하는 것은 불가능하다[4,5].

본 연구에서는, 유기성분과 무기성분이 함께 존재하는 합성폐수를 이용하여 흡착평형과 운동학적 실험을 진행하였다. 이 결과로부터 유기성분과 무기성분으로 이루어진 합성폐수는 선형적인 흡착성질과 우호적인 흡착성질을 동시에 가지고 있다는 것을 조사하였다. 이 경우에 일반적으로 알려진 흡착등온식은 적용할 수 없었으며 본 연구에는 적용할 수 없었다. 이러한 선형적인 흡착 문제는 적절한 하이브리드 흡착등온식을 적용하여 해석하였다.

이 연구는 입상활성탄에 의한 용존유기탄소의 흡착에 대해서 나타내었다. 이 연구의 목적은 하·폐수 처리에 있어서 용존유기탄소의 흡착을 다루었다.

## 2. 실험방법

### 2.1 합성폐수

이 연구는 합성폐수를 가지고 수행하였다. 합성폐수의 제조에 필요한 성분은 Table 1에 나타내었다. 이 합성폐수는 일반적으로 알려진 생물학적 방법으로 처리되어진 유출수의 성분이다[6]. 유기 성분은 tannic acid, peptone, sodium lignin sulfonate, sodium lauryle sulfate and arabic acid 등으로 이루어졌으며, 무기성분은  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  등으로 이루어졌다.

[Table 1] Constituents of the synthetic wastewater

Compounds	Concentration (mg/L)	Fraction by DOC
Beef extract	1.8	0.065
Peptone	2.7	0.138
Humic acid	4.2	0.082
Tannic acid	4.2	0.237
Sodium lignin sulfonate	2.4	0.067
Sodium lauryle sulfate	0.94	0.042
Arabic gum powder	4.7	0.213
Arabic acid (polysaccharide)	5.0	0.156
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	7.1	-
$\text{K}_2\text{HPO}_4$	7.0	-
$\text{NH}_4\text{HCO}_3$	19.8	-
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.71	-

### 2.2 입상활성탄 (GAC)

사용되어진 흡착제는 상업적으로 이용되고 있는 F400(미국, Calgon)과 7440-44-0(동양탄소, 한국)을 사용하였다. 이러한 입상활성탄은 수처리에 있어서 유기성분을 흡착하는데 적당한 흡착제로 알려져 있다. 우선 사용하기에 앞서서, 모든 활성탄 입자는 불순물을 제거하기 위해서 24시간 동안 증류수에서 가열되었고 세척되었다. 이러한 과정을 거친 다음에, 건조오븐(Drying Oven)에서 온도 103~105 °C의 하루동안 건조한 다음에, 활성탄 입자들은 20 mesh를 통과하고 30 mesh(ASTM)에 남겨진 활성탄을 사용하였다. 평균 입장 직경은  $0.75 \times 10^{-3}\text{m}$  이었다. 이러한 활성탄의 물리적 성질은 Table 2에 나타내었다.

[Table 2] Physical properties of granular activated carbons

Spec.	GAC1	GAC2
Product code	F-400	7440-44-0
Surface Area, $\text{m}^2/\text{g}$	1112	1042
Mean pore Dia., Å	26.14	17.2
Micropore Vol., $\text{cc}/\text{g}$	0.269	0.360
Mean Dia., mm	0.75	0.75

### 2.3 용존유기탄소 (DOC)

용존유기탄소를 분석하기 위한 측정기기는 일본제품으로 자동샘플러가 장착되어진 Shimadzu V-series, TOC-CHP 분석기를 사용하였다. 모든 샘플들은 DOC의

측정기준을 맞추기 위해서 측정하기 앞서서 0.45 μm CA Syring Filter로 입자가 큰 유기성분을 제거하고 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 흡착등온식의 수학적 모델링

흡착평형 데이터는 합성폐수의 다양한 활성탄의 양을 첨가하여 평형농도를 구하였다. 삼각플라스크를 이용하여 온도를 고정하기 위해서 인큐베이터를 이용하였다. 일정한 온도 25℃ 유지하였으며 5일동안 진행하였다. 용존유기탄소가 충분히 활성탄에 흡착될 수 있도록, 즉 평형에 도달하기 위해서 충분한시간을 주어 평형에 도달하게 하였다. 흡착평형이 도달한 후에, 각 삼각플라스크로부터 샘플을 채취하였다. 각각의 농도는 위에서 설명한 TOC 분석기를 이용하였다. 각각의 활성탄에 대한 흡착평형량은 아래식 (1) 물질수지식을 이용하여 계산하였다.

$$q = (C_i - C_e) V / W \quad (1)$$

위 식의 파라미터는 각각 흡착평형량  $q$  (mg/g), 초기 DOC 농도  $C_i$  (mg/L), 평형에 도달한 DOC 농도  $C_e$  (mg/L), 투입되어진 활성탄 양  $W(g)$ , 실험되어진 용액의 부피  $V(L)$ 를 나타내고 있다.

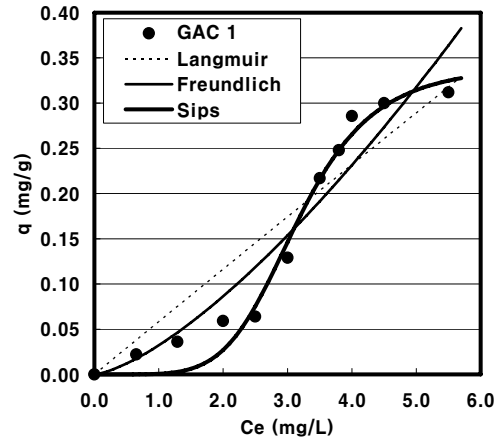
실험결과를 모델링하기 위해서 우리는 포트란 파워스 테이션 4.0 프로그램을 사용하였다. 여기에 프로그램을 작성하여 각각의 알고자 하는 파라미터 값을 찾았다. 파라미터 값들이 많기 때문에 비선형식 방정식의 파라미터를 찾기 위해서 Minpack 패키지를 사용하였다. Minpack 패키지는 비선형 방정식을 풀기위한 포트란 서브프로그램이며 찾아야 하는 값들을 최적화시켜주는 프로그램이다. Table 3에 본연구에서 적용되어진 흡착등온식을 나타내었다.

[Table 3] Adsorption isotherm equations

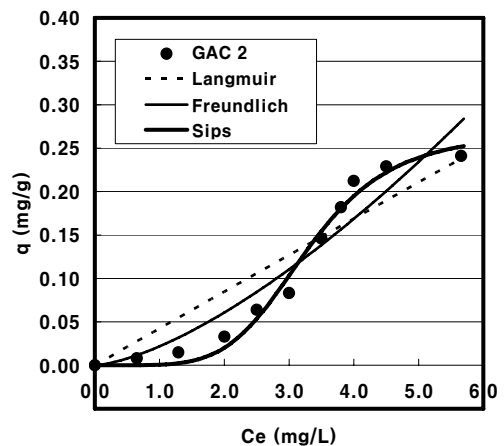
Isotherm	Model Equations	Parameters
Freundlich	$q = k_f \times C^{1/n}$	$k_f, n$
Langmuir	$q = \frac{q_m \times b \times C}{1 + b \times C}$	$q_m, b$
Sips	$q = \frac{q_m \times b \times C^{1/n}}{1 + b \times C^{1/n}}$	$q_m, b, n$
Hybrid1 (Linear+Freu)	$q = a \times C + k_f \times C^{1/n}$	$a, k_f, n$

ndlich) Hybrid2 (Linear+Langmuir)	$q = a \times C + \frac{q_m \times b \times C}{1 + b \times C}$	$a, q_m, b$
Hybrid3 (Linear+Sips)	$q = a \times C + \frac{q_m \times b \times C^{1/n}}{1 + b \times C^{1/n}}$	$a, q_m, b, n$

본 연구에서는, 일반적으로 알려진 Langmuir, Freundlich, Sips 등 3종류, 하이브리드 등온식 3종류 linear+Freundlich, linear+Langmuir, linear+Sips 등의 총 6가지 모델을 DOC 흡착평형을 묘사하기 위해서 적용하였다.



(a)



(b)

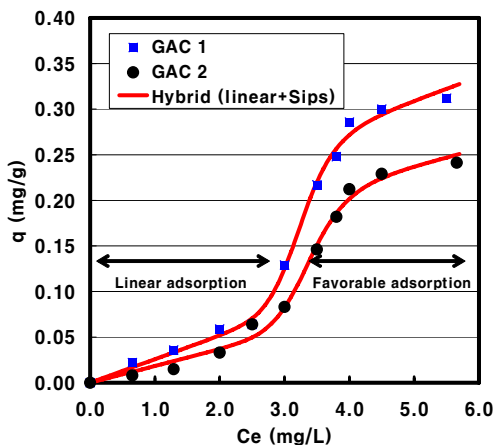
[Fig. 1] Adsorption equilibrium isotherm of (a) GAC1 and (b) GAC2 fitted by the conventional model.

Fig. 1에 GAC1, GAC2의 입상활성탄 2종류에 대한 흡착평형 결과를 나타내었다. 흡착평형은 S자 형태의 보여 주었다. 즉, 낮은 농도영역(0~2.5 mg/L)에서는 선형적인 흡착성질을 보여주었으며, 높은 농도영역(2.5~6 mg/L)에서는 우호적인 흡착성질을 보여주고 있다. 이러한 형태의 흡착평형은 일반적인 흡착등온식으로는 흡착평형 결과 잘 묘사하지 못하였다. Langmuir식보다는 경험적인 식인 Freundlich보다는 실험에러가 높았다. 일반적인 흡착등온식의 파라미터값들을 Table 4에 나타내었다. 에러함수인 R<sup>2</sup> 값이 낮음을 알 수 있었다. Sips식의 경우 Langmuir, Freundlich 식보다 에러가 작았지만 낮은 농도 영역에서는 잘 묘사되지 못함을 알 수 있다.

[Table 4] Parameters of single adsorption isotherm

		GAC1	GAC2
Freundlich	k <sub>f</sub>	3.22X10 <sup>-02</sup>	2.19X10 <sup>-02</sup>
	n	7.03X10 <sup>-01</sup>	6.79X10 <sup>-01</sup>
	R <sup>2</sup>	0.92	0.91
Langmuir	q <sub>m</sub>	20.75	20.1
	b	2.13X10 <sup>-03</sup>	2.12X10 <sup>-03</sup>
	R <sup>2</sup>	0.87	0.86
Sips	q <sub>m</sub>	3.42X10 <sup>-01</sup>	2.68X10 <sup>-01</sup>
	b	2.10X10 <sup>-03</sup>	2.49X10 <sup>-03</sup>
	n	1.87X10 <sup>-01</sup>	1.99X10 <sup>-01</sup>
	R <sup>2</sup>	0.97	0.98

따라서, 이러한 문제점인 선형적인 흡착성질과 우호적인 흡착성질을 동시에 만족시키기 위해서 해결하기 위해서 우리는 3종류의 하이브리드(linear+Freundlich, linear+Langmuir, linear+Sips)등온식을 적용하였다.



[Fig. 2] Adsorption equilibrium isotherm of GAC1 and GAC2 fitted by the hybrid model.

하이브리드 흡착등온식의 결과를 Fig. 2와 Table 5에 나타내었다. 3가지의 하이브리드 흡착등온식중에서 선형식과 Sips식이 결합되어진 하이브리드 흡착등온식 3이 매우 만족할 만한 결과를 얻었다. 이 의미는 하·폐수 처리에 있어서 이러한 S자 형태의 흡착평형을 해석하기 위해서는 이식을 적용할 수 있다는 것을 의미하고 운동학적 실험결과를 예측할 수 있다는 것을 의미한다.

[Table 5] Parameters of single adsorption isotherm

Hybrid isotherm	Para	GAC1	GAC2
Linear + Freundlich	a	1.80X10 <sup>-03</sup>	5.62X10 <sup>-10</sup>
	k <sub>f</sub>	3.22X10 <sup>-02</sup>	2.19X10 <sup>-02</sup>
	n	7.04X10 <sup>-01</sup>	6.79X10 <sup>-01</sup>
	R <sup>2</sup>	0.92	0.92
Linear + Langmuir	a	5.80X10 <sup>-02</sup>	9.09X10 <sup>-06</sup>
	q <sub>m</sub>	8.31X10 <sup>-08</sup>	4.26X10 <sup>-02</sup>
	b	1.58X10 <sup>-05</sup>	7.27X10 <sup>-08</sup>
	R <sup>2</sup>	0.87	0.86
Linear + Sips	a	2.59X10 <sup>-02</sup>	1.84X10 <sup>-02</sup>
	q <sub>m</sub>	1.80X10 <sup>-01</sup>	1.46X10 <sup>-01</sup>
	b	2.97X10 <sup>-07</sup>	4.64X10 <sup>-07</sup>
	n	7.85X10 <sup>-02</sup>	8.38X10 <sup>-02</sup>
	R <sup>2</sup>	0.99	0.99

### 3.2 운동학적 흡착 연구

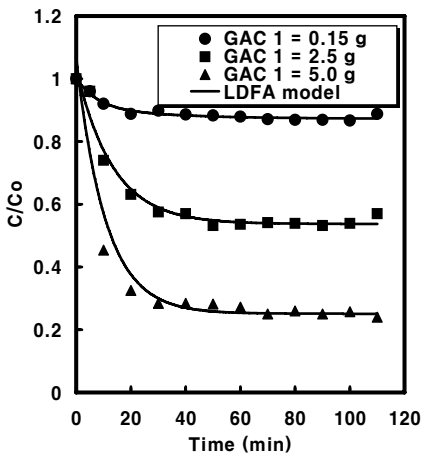
운동학적 흡착의 물질전달계수를 구하기 위해서 LDFA (linear driving force approximation) 모델을 적용하였다. 이 모델과 회분식 반응조의 물질수지식을 합하여 운동학적 흡착을 해석할 수 있다. 이것은 수처리의 있어서 DOC의 다성분을 해석하기 위해서는 복잡한 수식보다는 단순한 확산모델을 적용하여 프로그램을 단순화시키고자 하였다. 회분식 전체 물질 수지식은 아래의 수식2와 같이 나타낼 수 있다[7,8].

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{M}{V} \frac{dq}{dt} \tag{2}$$

흡성폐수속의 DOC와 흡착제간의 물질전달계수는 전체물질전달계수가 실험하는 동안 변하지 않는다는 가정하에서 구할 수 있다. 수식3과 LDFA모델을 결합한 식을 수식 3에 나타내었다.

$$\frac{dq}{dt} = \frac{3 \times k_f}{R \times \rho_p} (C_i - C_e) = k_m (q_s - q) \quad (3)$$

위 식의 파라미터는 각각 R=흡착제의 직경 (m),  $k_f$ =전체물질전달계수 (m/s),  $k_m$ =물질전달계수 (1/s),  $C_i$ =DOC 초기농도 (mg/L),  $C_e$ =DOC 평형농도 (mg/L),  $q_s$ =흡착제 입자 외부에서의 흡착량 (mg/g),  $q$ =평균 DOC 흡착량 (mg/g) and  $\rho_p$ =활성탄 입자밀도(kg/m<sup>3</sup>)을 나타낸다. 활성탄 입자표면에서의 농도와 평균 흡착상태에서의 흡착 농도의 차이로 정의되어지는 LDFA 식으로부터 흡착속도를 구할 수 있다. 이 모델은 흡착등온식으로 부터, 즉 이 연구에서는 하이브리드3, 흡착속도계수를 구할 수 있다. 회분식조에서의 운동학적 흡착 물질수지식을 풀기 위하여 직교배열법 (orthogonal collocation)을 사용하였다. 방정식의 불연속화는 흡착 농도에 대한 시간 미분 상미분 방정식 (ODE)의 집합의 결과로 공간 변수에 대해 이루어졌다. 상미분 방정식의 결과 세트는 서브 루틴 LSODA에 의해 마이크로소프트 포트란 스튜디오4.0를 사용하여 모델링 하였다[9,10].



[Fig. 3] Kinetic experiments with different GAC amount

Fig. 3은 각각 다른 흡착제 양에 따른 운동학적 결과를 보여주고 있다. 흡착속도는 초기에는 매우 빨라지며, 30분이 지난 다음에 흡착평형에 도달하였다. 흡착되어진 DOC의 양은 흡착제의 양이 증가할수록 증가하였다. 회분식 물질수지식과 하이브리드 흡착등온식3 (선형식과 Sips 흡착등온식 결합)과 함께하는 LDFA 운동학적 식에 의해서 성공적으로 예측되어짐을 알 수 있었다.

## 4. 결론

입상활성탄에서의 DOC 흡착평형과 운동학적 흡착 실험을 연구하였다. 몇 가지의 결론을 아래와 같이 만들 수 있다.

- 본 연구의 합성폐수는 DOC 흡착성질은 다음과 같다. 낮은 DOC 농도 영역(DOC: 0~2.5mg/L)에서는 선형적인 성질을 보여주었으며, 높은 DOC 농도 영역(DOC: 2.5~6mg/L)에는 우호적인 흡착성질을 보여주었다.
- 입상활성탄에서의 DOC 흡착등온 실험 데이터는 하이브리드 흡착등온식 3 (선형과 Sips식 결합)을 적용할 수 있었다. 이같은 새로운 흡착등온식은 흡착량을 예측하는데 적용되어 질 수 있는 매우 유용한 식이 될 것이다.
- 흡착속도는 초기에는 매우 빨랐으며, 30분이 지난 다음 흡착평형에 도달하였다. 흡착되어진 DOC의 양은 흡착제의 양이 증가할수록 증가하였다. 회분식 실험데이터는 하이브리드 흡착등온식3 (선형식과 Sips 흡착등온식 결합)과 함께하는 LDFA 운동학적 식에 의해서 성공적으로 예측되어졌다.

## References

- [1] Matsui, Y., Member, ASCE, Yuasa, A., and Li, F., "Overall adsorption isotherm of natural organic matter", J. of Env. Eng., pp. 1099-1105, November 1998. DOI : [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1998\)124:11\(1099\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1998)124:11(1099))
- [2] Yuasa, A., Li, F., Matsui, Y. and Ebie, K., "Adsorption equilibria of multicomponent organic mixtures of unknown composition", Proc. of Env. Eng. Res., 33, pp. 123, 1996.
- [3] Y.X. Zhao, B.Y. Gao, H.K. Shon, Q.B. Qi, S. Phuntsho, Y. Wang, Q.Y. Yue, Q. Li, J.-H. Kim, "Characterization of coagulation behavior of titanium tetrachloride coagulant for high and low molecule weight natural organic matter removal: The effect of second dosing", Chem. Eng. J., 228, 15 July 2013, pp. 516-525, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ccej.2013.05.042>
- [4] Eric Kristia Putra, Ramon Pranowo, Jaka Sunarso, Nani Indraswati, Suryadi Ismadji, "Performance of activated carbon and bentonite for adsorption of amoxicillin from

wastewater: Mechanisms, isotherms and kinetics" Water Research, 43, Issue 9, pp. 2419-2430, May 2009.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2009.02.039>

- [5] Monica Berrios, Maria Angeles Martin, Antonio Martin, "Treatment of pollutants in wastewater: Adsorption of methylene blue onto olive-based activated carbon", J. of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 18, Issue 2, 25, pp. 780-784, March 2012.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2011.11.125>

- [6] Seo, G.T., Ohgaki, S., Suzuki, Y., Sorption characteristics of biological powdered activated carbon in BPAC-MF (biological activated carbon-microfiltration) system for refractory organic removal. Water Science and Technology 35 (7), pp.163-170, 1997.

DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00127-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00127-3)

- [7] W. Xing, H.H. Ngo, S.H. Kim, W.S. Guo, P. Hagare, "Adsorption and bioadsorption of granular activated carbon (GAC) for dissolved organic carbon(DOC) removal in wastewater", Biores. Technol., Vol. 99, Iss. 18, pp. 8674-8678 December 2008.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2008.04.012>

- [8] S.H. Kim, Huu Hao Ngo, H.K. Shon, S. Vigneswaran, "Adsorption and photocatalysis kinetics of herbicide onto titanium oxide and powdered activated carbon", Sep and Puri. Technol., Vol. 58, Issue 3, pp. 335-342, 15 January 2008.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2007.05.035>

- [9] Gordon M., "Solution to the homogeneous surface diffusion model for batch adsorption systems using orthogonal collocation", Chem. Eng. J. 81(1-3) pp. 213-221, 2001.

DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1385-8947\(00\)00191-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1385-8947(00)00191-1)

- [10] Tien, C. Adsorption calculations and modelling. Butterworth-Heinemann, 1994.

### 김 성 현(Seoung-Hyun Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 전남대학교 공과대학 화학공학과(공학석사)
- 2002년 3월 : 전남대학교 공과대학 응용화학공학부(공학박사)
- 2013년 2월 ~ 현재 : (재)한국계면공학연구소 책임연구원

<관심분야>

정수 및 하수 처리, 신재생에너지

### 신 성 훈(Sung-Hon Shin)

[정회원]



- 2009년 2월 : 중앙대학교 토목공학과(공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 토목환경공학과(박사과정)
- 2009년 3월 ~ 2012년 3월 : (주)오웍스 기술연구소 주임연구원
- 2012년 4월 ~ 현재 : (재)한국계면공학연구소 선임연구원

<관심분야>

정수처리, 하수처리, 폐수처리

### 김 진 혁(Jin-Hyok Kim)

[정회원]



- 2012년 2월 : 충북대학교 공과대학 환경공학과(공학석사)
- 2012년 3월 ~ 12월 : 한국환경공단 환경보건정책팀 연구원
- 2013년 5월 ~ 현재 : (재)한국계면공학연구소 연구원

<관심분야>

수처리, 신재생에너지

### 우 달 식(Dal-Sik Woo)

[정회원]



- 1988년 2월 : 건국대학교 환경공학과(공학석사)
- 1998년 2월 : 건국대학교 환경공학과(공학박사)
- 1999년 3월 ~ 2010년 12월 : (재)한국계면공학연구소 실장
- 2011년 ~ 현재 : (재)한국계면공학연구소 대표

<관심분야>

수처리

이 호 선(Ho-Sun Lee)

[정회원]



- 2004년 2월 : 인천대학교 토목환경시스템공학과(공학석사)
- 2010년 2월 : 인천대학교 토목환경시스템공학과(박사학위)
- 2008년 3월 ~ 2012년 7월 : 한국환경공단 연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 스마트워터그리드 연구단 사무국장

<관심분야>

수처리, 스마트워터그리드