

## 吸着劑 表面에서의 吸着質과 水分子의 置換을 考慮한 修正 Langmuir 等溫吸着式<sup>†</sup>

\*金 東 秀

梨花女子大學校 環境學科

### Altered Langmuir Adsorption Isotherm under the Consideration of the Displacement of Water Molecules with Adsorbate Ion at the Surface of Adsorbent<sup>†</sup>

\*Dong-Su Kim

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

#### 요 약

수중에서 일어나는 흡착반응에 대해 고전적 Langmuir 등온흡착식에서 고려되고 있지 않은 흡착제 표면에서의 흡착질과 물분자 간의 치환과정을 고려한 수정된 Langmuir 등온흡착식을 제시하였다. 활성탄 표면에 대한 Cd<sup>2+</sup>의 흡착을 대상으로 도출된 수정 등온흡착식을 적용한 결과, 흡착특성의 검토 및 반응양상의 해석에 있어 고전적 Langmuir 등온흡착식에 비해 그 적용성이 향상되는 것으로 파악되었다. 이에 의거하여 Langmuir 모델을 따르는 흡착계에 있어 제시된 수정 등온흡착식을 적용할 경우, 공정의 설계 및 운영과정에서 보다 정밀하고 향상된 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료되었다.

주제어 : Langmuir 등온흡착식, 수정, 흡착질, 물분자, 치환

#### Abstract

Altered Langmuir adsorption isotherm has been suggested for adsorption reactions occurring in aqueous environment based upon the concept of the steric displacement between adsorbates and water molecules at the surface of adsorbent. For the adsorption of Cd<sup>2+</sup> on activated carbon, the suggested adsorption isotherm was shown to be more well applied to the experimental results compared with the classical Langmuir adsorption isotherm. Based on this, regarding the adsorption system which following the Langmuir model more precise design and controllable operation of the process were considered to be attainable when the adsorption process is analyzed employing the altered adsorption isotherm.

Key words : Langmuir Adsorption Isotherm, Alteration, Adsorbate, Water Molecule, Displacement

#### 1. 서 론

자원재활용을 포함한 환경공학 분야의 전반에 걸쳐 흡착은 그 활용도가 매우 높은 단위공정이다. 폐수처리 과정에서 흡착은 생물학적으로 분해가 용이하지 않은 난분해성 유기물이나 중금속 이온 등을 수중으로부터 제거하기 위해 적용되고 있으며 여러 산업공정에서 발

생하는 기체상의 오염물을 처리하는 단계에서도 널리 활용되고 있다.<sup>1-3)</sup> 현재 흡착공정에서 흡착제로 가장 많이 사용되고 있는 것은 활성탄인 바, 활성탄 흡착에 의한 오염물의 제거 효율은 상대적으로 높은 것은 사실이나 각종 원료물질로부터 활성탄을 제조하는 단계에서 소요되는 비용이 낮지 않아 공정 운영상의 단점으로 간주되고 있다. 이러한 이유로 활성탄을 대체할 수 있는 흡착제의 개발과 관련된 연구들이 많이 진행되고 있으며 이에 연계된 연구의 일환으로 산업공정 및 일상생활

<sup>†</sup> 2005년 12월 26일 접수, 2006년 3월 30일 수리

\*E-mail: dongsu@ewha.ac.kr

에서 발생하는 폐기물을 흡착제로 활용하는 방안에 대해서도 심도있게 고려되고 있다.<sup>4,6)</sup>

활성탄을 흡착제로 사용하는 흡착공정에서 공정의 경제성 및 효율과 관련하여 필수적으로 고려되어야 할 사항은 사용된 활성탄의 재생이라고 할 수 있다. 즉, 활성탄의 표면에 흡착된 흡착질을 물리화학적 방법을 적용해 효과적으로 탈착시킴으로써 활성탄의 재사용율을 향상시키고, 이의 결과로 공정의 경제성을 높임과 동시에 발생하는 폐기물의 양을 저감시키는 것이 가능하다. 현재 사용된 활성탄을 재생시키는 방법으로는 열처리, 스팀처리, 용매추출, 산/염기 처리, 그리고 화학적 산화 등이 적용되고 있는데,<sup>7-10)</sup> 이 가운데 열처리를 제외한 나머지 방법들은 In-Situ 적이라는 측면에서 나름대로 장점이 있으나 이러한 방법들에 의할 경우 활성탄의 재생효율이 상대적으로 낮은 단점이 있다. 흡착공정의 경제성을 생각할 때, 흡착제의 재생과 더불어 고려될 수 있는 사항은 흡착제로부터 탈착된 흡착질의 효과적인 회수라 할 수 있다. 즉, 상대적으로 회석된 상태로 발생하는 오염물을 고농도의 상태로 회수하게 되면 이는 오염물이 아니라 경제적 가치를 지닌 2차 자원의 개념으로 간주할 수 있다.<sup>11,12)</sup> 이러한 점을 고려할 때 오염물의 흡착처리 공정에서 흡착질의 흡착상태의 안정성 및 탈착성, 그리고 흡착특성 등을 포괄적으로 검토할 필요가 있으며 이에 의거하여 전체 공정을 설계하고 운영하는 것이 요구된다.

일반적으로 특정 흡착제에 대한 흡착질의 흡착특성을 정성적, 혹은 정량적으로 파악하기 위해 이의 등온흡착식이 이용된다. 등온흡착식은 평형상태에서 흡착질의 흡착거동을 표현함으로써 흡착공정에 사용될 흡착제의 양이나 전처리의 정도, 후처리의 필요성, 그리고 공정의 운영 등에 관한 유용한 정보를 제공한다.<sup>13,14)</sup> 흡착과 관련하여 현재 여러 등온흡착식들이 제시되어 있는데, 이들 가운데 그 적용도가 가장 높은 흡착식으로는 Freundlich 등온흡착식과 Langmuir 등온흡착식을 들 수 있다. Freundlich 등온흡착식은 경험식으로서 흡착특성을 전반적으로 파악하는데 있어 유용하게 활용되고 있으며 Langmuir 등온흡착식은 흡착과 탈착의 속도론적 면으로 고려하여 이론적으로 도출된 식이라 할 수 있다. 그런데, Langmuir 등온흡착식의 도출 과정에서 흡착질의 흡착이 일어나는 흡착제의 표면은 Bare 한 상태로 간주되고 있는 바, 이는 특히 폐수에 함유된 오염물의 흡착과 같이 수증 분위기에서 흡착이 진행되는 경우에는 반응상태의 실질적인 면이 고려되

지 못한 상황이라고 할 수 있다. 즉, 흡착제의 표면에 흡착이 일어나기 전에 물분자들이 존재하고 있으며 흡착질의 흡착은 흡착제 표면에서의 흡착질에 의한 물 분자의 치환과정이라고 생각할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 수증에서 활성탄 표면에 대한 중금속 이온의 흡착반응을 대상으로 수정된 Langmuir 등온흡착식을 제시하고자 하였으며 이에 의거하여 흡착처리의 효율성 향상 및 흡착제의 재사용과 관련해 보다 정밀한 공정운영에 요구되는 기초자료를 제공하고 자 하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서 흡착질로 선택한  $Cd^{2+}$  이온을 함유하는 용액은 카드뮴 질산염( $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ , Duksan Chemical Co.)을 3차 증류수( $>18 M\Omega$ )에 용해시켜 제조하였다. 또한, 흡착제로서는 삼천리사에서 입수한 입상 활성탄을 분쇄하여 -18/+25 Mesh 부분을 취해 105°C로 조절된 오븐에서 2시간 이상 건조시킨 다음, 고순도 질소가스로 충전한 데시케이터 내에 보관하여 사용하였다. Ethylene Glycol Monoethyl Ether 흡착법으로<sup>15)</sup> 측정된 흡착제의 표면적은 약 960 m<sup>2</sup>/g 이었다.

수증 pH에 따른  $Cd^{2+}$  이온의 안정성을 고려하여 흡착실험은 pH 4의 조건에서 수행하였다. 흡착질의 농도가 조절된 용액 50 mL를 100 mL Erlenmeyer Flask에 넣고 여기에 50 g/L의 비율로 활성탄을 첨가한 다음, 이를 20°C로 조절된 Shaking Incubator(Jeil Scientific Co., Model 150-A) 내에서 200 rpm의 조건으로 교반하면서 시간에 따른 흡착질의 농도변화를 관찰하였다. 용액중의  $Cd^{2+}$ 의 농도는 Whatman No. 5A 여과지를 사용해 용액으로부터 활성탄을 분리한 후 Atomic Absorption Spectroscopy(Analytik Jena AG, Model AAS Vario 6)를 사용해 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

선행 실험을 통해  $Cd^{2+}$ 의 농도가 20~100 mg/L인 조건에서 흡착반응은 반응개시 20분 이내에 평형에 도달하는 것으로 파악되었으며, 흡착질의 초기 농도를 20, 40, 60, 80, 그리고 100 mg/L로 변화시키면서 50분간 흡착시킨 후 용액에 잔존하는  $Cd^{2+}$ 의 농도를 측정할 바, 그 값이 각각 1.14, 3.96, 8.10, 14.64, 그리고 19.94 mg/L인 것으로 관찰되었다.

고전적 Langmuir 등온흡착식은 흡착반응의 Kinetics 를 고려할 때 다음의 과정으로 유도되어진다. 즉, 흡착 질의 흡착속도와 탈착속도가 각각 식 (1) 및 (2)로 표현되어질 때( $k_1$ ; Rate Constant for Adsorption,  $k_2$ ; Rate Constant for Desorption,  $\theta$ ; Surface Coverage,  $C_e$ ; Concentration of Adsorbate at Equilibrium),

$$\text{Adsorption Rate} = k_1(1 - \theta)C_e \quad (1)$$

$$\text{Desorption Rate} = k_2\theta \quad (2)$$

평형상태에서  $k_1(1 - \theta)C_e = k_2\theta$ 이므로 이를 정리하면 식 (3)이 되고,

$$\theta/(1 - \theta) = (k_1/k_2) \times C_e \quad (3)$$

여기서,  $k_1/k_2$ 는 흡착반응의 평형상수(K)이므로 식 (3)은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\theta/(1 - \theta) = KC_e \quad (4)$$

이를 다시  $\theta$ 에 대해 정리하면 다음의 식으로 표현되어지며,

$$1/\theta = 1/KC_e + 1 \quad (5)$$

Surface Coverage,  $\theta$ 는 흡착제의 단위질량당 흡착된 흡착질의 최대량에 대한 임의의 조건에서의 흡착제의 단위질량당 흡착된 흡착질의 양의 비인  $(x/m)/(x/m)_{\max}$ 와 같으므로( $x$ ; Adsorbed Amount of Adsorbate,  $m$ ; Weight of Adsorbent), 식 (5)는 식 (6)으로 표현될 수 있다.

$$1/(x/m) = 1/[(x/m)_{\max}KC_e] + 1/(x/m)_{\max} \quad (6)$$

즉, 수중에서 흡착질의 흡착이 평형상태에서 Langmuir 모델을 따를 때 흡착질의  $1/C_e$ 의 변화에 따른  $1/(x/m)$ 의 변화는 직선적이며 그 변화율과 Y-절편은 각각  $1/[(x/m)_{\max}K]$  및  $1/(x/m)_{\max}$ 인 것으로 생각할 수 있다. 활성탄 표면에 대한  $Cd^{2+}$ 의 흡착실험을 통해 얻어진 결과를 식 (6)에 의거하여 표현한 것이 Fig. 1이며 이로부터 산정된  $Cd^{2+}$ 의  $(x/m)_{\max}$ 은 1.57399 mg/g인 것으로 파악되었다. Fig. 1에 제시된 회귀직선의 결정계수 ( $r^2$ )는 특정 흡착계가 Langmuir 모델을 따르는 정도를 정량적으로 나타내는 수치라고 할 수 있다.

서론에서 언급하였듯이 수중에서 흡착제 표면에 흡착질이 흡착될 때, 흡착제 표면에 이미 존재하고 있는 물분자는 흡착과정에서 흡착질과 치환되어야 한다. 흡착질과 물분자간의 이러한 Steric Displacement는 흡착질

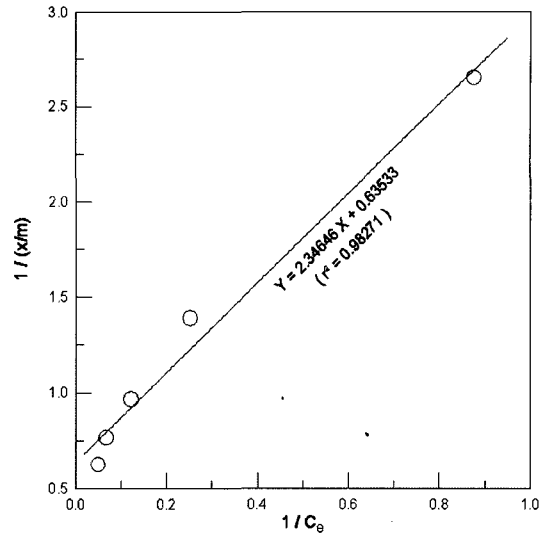


Fig. 1. Linearized Langmuir isotherm for the adsorption of  $Cd^{2+}$  ion on activated carbon without the consideration of the displacement of water molecule at the surface of adsorbent (pH 4, Temp.; 20°C).

의 크기 및 배열 방향, 흡착질의 Polarizability, 흡착 메커니즘, 흡착제 표면의 친수성 정도, 그리고 온도 등의 영향을 받는 것으로 예상할 수 있다. 그런데, 고전적 Langmuir 등온흡착식에서는 이러한 흡착질과 물분자간의 치환에 대한 면이 고려되고 있지 않은 바, 이는 실제로 진행되는 흡착반응의 조건을 충분히 제시하지 못하고 있다고 간주할 수 있다. 따라서, 보다 명확한 Langmuir 모델을 구성하기 위해서는 흡착제 표면에서 일어나는 이러한 현상이 등온흡착식 도출과정에서 고려되어야 한다.

열역학적인 관점에서 볼 때, 흡착질이 물분자와 치환되어 흡착제 표면에 흡착되는 과정에 있어서 Gibbs Free Energy의 변화가 최소의 값을 가질 때 흡착이 가장 잘 일어나는 것으로 생각할 수 있다. 만일 용액중에 존재하고 있는 흡착질( $A_{sol}$ )이 흡착과정에서 흡착제 표면에 부착되어 있는  $n$ 개의 물분자( $nH_2O_{ads}$ )와 치환되어 흡착질은 흡착되고( $A_{ads}$ ) 물분자  $n$ 개가 용액중으로 방출된다( $nH_2O_{sol}$ )라고 할 때, 평형상태에서의 흡착반응은 다음의 식으로 제시될 수 있다.



위 반응에 대한 평형상수는 용액의 Ionic Strength Effect를 무시할 때 식 (8)로 표현될 수 있는 바,

$$K = [A_{ads}][H_2O_{sol}]^n / [A_{sol}][H_2O_{ads}]^n \quad (8)$$

이를 용액중 및 흡착된 상태에서의 각 화학종들의 Mole Fraction(X)으로 나타내면 다음과 같게 된다.

$$K = (X_{A,ads})(X_{H_2O,sol})^n / (X_{A,sol})(X_{H_2O,ads})^n \quad (9)$$

그런데, 용액중 물의 Mole Fraction인  $X_{H_2O,sol}$ 는 근사적으로 1로 간주할 수 있고, 또한 293 K에서 물 자체의 농도는 약 55.4 M이므로<sup>16)</sup> 용액에서의 흡착질의 평형농도를  $C_e$ 라고 할 때 일반적으로  $C_e$ 는 물의 농도에 비해 매우 작으므로 용액중 흡착질의 Mole Fraction인  $X_{A,sol}$ 은 근사적으로  $C_e/55.4$ 로 나타낼 수 있다.

한편, Langmuir 모델에서  $\theta$ 는 흡착제 표면에 대한 흡착질의 Adsorption Density의 최대값( $\Gamma_{A,max}$ )에 대한 임의의 조건에서의 흡착질의 Adsorption Density( $\Gamma_A$ )의 비와 동일하므로  $\Gamma_A = \theta\Gamma_{A,max}$ 의 관계가 성립한다. 또한, 흡착제 표면에서  $1 - \theta$ 는 물분자에 의한 Surface Coverage이므로  $\Gamma_{H_2O}/\Gamma_{H_2O,max}$ 와 같은데 흡착과정에서 흡착질 1분자와 n개의 물분자가 치환될 경우  $\Gamma_{H_2O,max} = n\Gamma_{A,max}$  관계가 성립하므로  $1 - \theta$ 는  $\Gamma_{H_2O}/n\Gamma_{A,max}$ 로 바꾸어 표현할 수 있다. 그런데,  $X_{A,ads}$ 는 다음의 식으로 나타낼 수 있는 바,

$$X_{A,ads} = \Gamma_A / (\Gamma_A + \Gamma_{H_2O}) \quad (10)$$

여기에 위의 관계식들을 대입하면 식 (11)이 된다.

$$X_{A,ads} = \theta\Gamma_{A,max} / [\theta\Gamma_{A,max} + (1 - \theta)n\Gamma_{A,max}] = \theta / [\theta + (1 - \theta)n] \quad (11)$$

그리고,  $X_{A,ads}$ 와  $X_{H_2O,ads}$ 의 합은 1이므로 식 (11)로부터  $X_{H_2O,ads}$ 는 다음의 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$X_{H_2O,ads} = (1 - \theta)n / [\theta + (1 - \theta)n] \quad (12)$$

이렇게 표현된 각 Mole Fraction들을 식 (9)에 대입하여 정리하면 다음의 식을 도출할 수 있다.

$$\theta \times [\theta + n(1 - \theta)]^{n-1} / [n(1 - \theta)]n = K \times (C_e/55.4) \quad (13)$$

즉, 식 (13)은 흡착질의 흡착과정에서 흡착질과 물분자와의 Steric Displacement를 고려했을 때의 Langmuir 등온흡착식으로서 이를 두 화학종간의 치환을 고려하지 않은 고전적 Langmuir 등온흡착식(식 (4))과 비교하였을 시 그 차이점을 알 수 있다.

흡착질이 흡착될 때 물분자와 치환되는 과정을 고려한 수정 Langmuir 등온흡착식의 적용성을 검토하기 위

해 앞서 제시된 활성탄에 대한  $Cd^{2+}$ 의 흡착실험 결과를 식 (13)에 의거하여 해석하고자 하였다. 이를 위해서는  $Cd^{2+}$  이온이 흡착될 때 활성탄 표면에서 치환되어 용액중으로 방출되는 물분자의 수(n)가 결정되어야 한다. 물분자의 구조에서  $O^{2-}$ 와  $H^+$ 의 Bond Length는 약 0.96 Å이고<sup>17)</sup>  $H^+$ 의 크기는 이에 비해 무시될 수 있으므로 물분자의 Random Orientation을 가정할 경우, 활성탄 표면에서의 물분자 1개의 Parking Area는 약  $2.89 \times 10^{-20} m^2$ 인 것으로 간주할 수 있다. 또한,  $Cd^{2+}$ 의 Effective Ionic Radius는 Coordination Number가 6일 때 95 pm이므로<sup>18)</sup>  $Cd^{2+}$ 의 형태를 구형으로 가정할 경우, 이의 최대 단면적은 약  $2.83 \times 10^{-20} m^2$ 가 될 것으로 생각할 수 있다. 그러므로,  $Cd^{2+}$  이온 1개가 활성탄 표면에 흡착될 때 흡착제 표면에서의 물분자와의 치환율은 근사적으로 1:1이 될 것으로 고려할 수 있다. 따라서, 식 (13)의 n에 1을 대입하여 정리하면 식 (14)가 되고,

$$1/\theta = 55.4/KC_e + 1 \quad (14)$$

앞서와 같이  $\theta$ 를  $(x/m)/(x/m)_{max}$ 로 바꾸어 정리하면 다음의 식이 도출되게 된다.

$$[1/(x/m)]/55.4 = 1/[(x/m)_{max}KC_e] + 1/55.4(x/m)_{max} \quad (15)$$

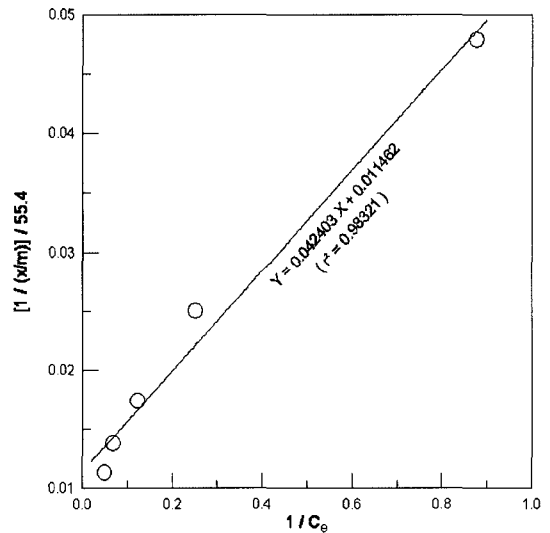


Fig. 2. Linearized Langmuir isotherm for the adsorption of  $Cd^{2+}$  ion on activated carbon in the consideration of the displacement of water molecule at the surface of adsorbent (pH 4, Temp.; 20°C).

Fig. 2는  $Cd^{2+}$  흡착실험의 결과에 대해  $1/C_e$ 에 따른  $[1/(x/m)]/55.4$ 의 변화양상을 회귀직선식과 함께 나타낸 것으로 이의 결정계수값을 Fig. 1의 경우와 비교하여 볼 때 미소하나마 그 값이 증가하였음을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 검토한 수정 Langmuir 등온흡착식이 고전적 Langmuir 등온흡착식에 비해 동일한 실험결과를 대상으로 해석하는데 있어 향상된 적용성을 보임을 의미하는 것으로 간주할 수 있다. 즉, Langmuir 모델에 의한 수중 흡착반응의 해석시, 반응조건의 실질적인 면에 있어 흡착질이 흡착제 표면에 흡착될 때 이에 상응하는 흡착제 표면으로부터의 물분자들의 탈착이 동시에 고려되어야 하며 이에 의거하여 흡착특성의 보다 정밀한 파악이 가능할 것으로 사료된다. Fig. 2의 회귀직선식으로부터 산정된 활성탄 표면에 대한 반응조건에서의  $Cd^{2+}$ 의  $(x/m)_{max}$ 는 1.57482 mg/g으로 고전적 Langmuir 등온흡착식의 적용 결과와 비교하여 이론적으로 차이가 나는 결과를 나타내었다.

#### 4. 결 론

수중 흡착반응에 대한 Langmuir 모델의 적용 과정에서 고전적 Langmuir 등온흡착식의 경우, 흡착질의 흡착에 따른 흡착제 표면으로부터의 물분자의 탈착을 고려하지 않고 있다. 따라서, 특정 흡착계에 대해 Langmuir 등온흡착식에 의한 흡착특성의 파악 및 반응양상의 해석에 있어 그 정밀성을 향상시키기 위해서는 고전적 Langmuir 등온흡착식의 이러한 면을 보완한 수정 등온흡착식이 제시되어야 한다. 본 연구에서는 활성탄 표면에 대한  $Cd^{2+}$ 의 흡착을 대상으로 고전적 Langmuir 등온흡착식과 수정 등온흡착식의 적용성을 비교한 결과, 흡착질과 물분자의 Steric Displacement 를 고려한 수정 등온흡착식이 Langmuir 모델을 따르는 흡착반응의 해석에 있어 더욱 적합한 것으로 파악되었으며 산정된 이론적인 흡착질의 최대흡착량도 고전적 Langmuir 등온흡착식의 경우와 차이가 나는 결과를 보였다. 결론적으로 흡착질의 재사용 및 흡착처리의 효율성 향상과 관련하여 본 연구에서 제시된 수정 등온흡착식을 적용할 경우 반응공정의 설계 및 운영에 있어 보다 향상된 결과를 얻을 수 있을 것으로 고려되었다.

#### 사 사

본 연구는 환경기술개발사업의 연구비 지원에 의하여

수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Al-Sarawy, A., Rashed, I. G., Hanna, M. A., and Wali, F. K. M., 2005: "Removal of some 4-pyrazolone dyes from aqueous solutions by adsorption onto different types of carbon", *Desalination*, **186**, pp.129-153.
2. Tarasevich, Yu. I., and Klimova, G. M., 2001: "Complex-forming adsorbents based on kaolinite, aluminium oxide and polyphosphates for the extraction and concentration of heavy metal ions from water solutions", *Applied Clay Science*, **19**, pp.95-101.
3. Hsieh, C. T., and Chen, J. M., 2002: "Adsorption energy distribution model for VOCs onto activated carbons", *Journal of Colloid and Interface Science*, **255**, pp.248-253.
4. Vilar, Vitor J. P., Sebesta, F., Botelho, Cidalia M. S., and Boaventura, Rui A. R., 2005: "Equilibrium and kinetic modelling of  $Pb^{2+}$  biosorption by granulated agar extraction algal waste", *Process Biochemistry*, **40**, pp. 3276-3284.
5. 이고은, 안주현, 김동수, 2003: "인산활성화제에 의한 폐 호도껍질을 원료로 한 활성탄 제조 및 이의 중금속 이온 흡착특성", *자원리사이클링학회지*, **12**, pp.13-24.
6. Kuh, S. E., and Kim, D. S., 2000: "Removal characteristics of cadmium ion by waste egg shell", *Environmental Technology*, **21**, pp.883-890.
7. Ania, C. O., Parra, J. B., Menendez, J. A., and Pis, J. J., 2005: "Effect of microwave and conventional regeneration on the microporous and mesoporous network and on the adsorptive capacity of activated carbons", *Microporous and Mesoporous Materials*, **85**, pp.7-15.
8. San Miguel, G., Lambert, S. D., and Graham, N. J. D., 2001: "The regeneration of field-spent granular activated carbons", *Water Research*, **35**, pp.2740-2748.
9. Brown, N. W., Roberts, E. P. L., Garforth, A. A., and Dryfe, R. A. W., 2004: "Electrochemical regeneration of a carbon-based adsorbent loaded with crystal violet dye", *Electrochimica Acta*, **49**, pp.3269-3281.
10. Alvarez, P. M., Beltran, F. J., Gomez-Serrano, V., Jaramillo, J., and Rodriguez, E. M., 2004: "Comparison between thermal and ozone regenerations of spent activated carbon exhausted with phenol", *Water Research*, **38**, pp.2155-2165.
11. Gupta, V. K., Mittal, A., Krishnan, L., and Gajbe, V., 2004: "Adsorption kinetics and column operations for the removal and recovery of malachite green from wastewater using bottom ash", *Separation and Purification Technology*, **40**, pp.87-96.

12. Deosarkar, S. P., and Pangarkar, V. G., 2004: "Adsorptive separation and recovery of organics from PHBA and SA plant effluents", Separation and Purification Technology, **38**, pp.241-254.

13. Ho, Y. S., Chiu, W. T., and Wang, C. C., 2005: "Regression analysis for the sorption isotherms of basic dyes on sugarcane dust", Bioresource Technology, **96**, pp.1285-1291.

14. Strohein, G., Mazzotti, M., and Morbidelli, M., 2005: "Optimal operation of simulated-moving-bed reactors for nonlinear adsorption isotherms and equilibrium reactions", Chemical Engineering Science, **60**, pp.1525-1533.

15. Sparks, D., 1995: Environmental Soil Chemistry, pp.42-43, Academic Press, Inc., San Diego, USA.

16. Lide, D., 1992: Handbook of Chemistry and Physics, 73rd Ed., 15-16, CRC Press, Inc., Boca Raton, USA.

17. Stumm, W. and Morgan, J., 1996: Aquatic Chemistry, 3rd Ed., pp.7-8, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.

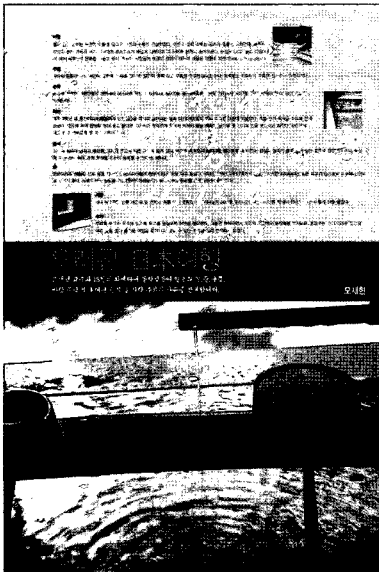
18. Richens, D., 1997: The Chemistry of Aqua Ions, p. 580, John Wiley & Sons, Inc., Chichester, UK.

金東秀

- 현재 이화여자대학교 환경공학과 교수
- 본 학회지 제8권 5호 참조

오래된 일본여행

오재현 교수와 15인의 와세다대 동창생들이 일본의 길, 물, 구름, 바람, 문학, 역사, 여관, 음식, 술, 사람, 추억을 안내합니다.



오재현 지음, 박영률출판사 발행,  
 신국판 344 쪽 / 값 15,000 원  
 ISBN 89-5887-015-X

와세다 대학 광산학과 동기동창들은 매년 2박 3일 각자 일본 연구지에서 동창모임을 가져왔다. 저자 오재현 교수는 유례없이 화려한 이동창 모임에 참석하여 일본 각지를 여행하면서 우리가 몰랐던 일본은 은은한 깊이 있는 어조로 풀어내고 있다.

이 책은 도쿄 어느 거리, 어느 골목에 최고(最高)의 라멘집이 있는지, 최고(最古)의 선술집이 있는지 알려주지 않는다. 예산에 맞는 호텔이 어디 있는지, 이동 수단으로 어떤 종류가 있는지 상세한 설명도 기대할 수 없다. 그러나 가메노이별장(龜の井別莊)의 남달랐던 유서, 구로베(黒部) 깊은 협곡의 우렁찬 계곡물소리, 가루이자와(輕井澤)의 돌담을 거닐며 읊조리는 시 낙엽송의 여유가 있다. 역사와 문화, 예술에 대한 저자의 풍부한 이해로 난해하지 않으면서 역사에 조금 더 방점이 찍힌 기행문이다.

저자 오재현 교수

1929년 경남 함양에서 태어나 와세다대학(早稻田大學)에서 공학사, 공학석사, 공학박사 학위를 받았다. 인하대학교 광산공학과 교수, (재)금속, 연료종합연구소 선광연구실장, 연세대학교 금속공학과 교수를 역임하였으며 현재 연세대학교 명예교수이자 (사)한국자원리사이클링학회 명예회장이자이다.

15인의 와세다대 동창들

1950년 와세다대 이공학부 광산학과 입학 동기인 이들은 해마다 각자의 고향에서 동창모임을 가져왔다. 차례가 된 동창은 친구들에게 소개할 자기 고장의 명소를 찾아 일정을 짜고 최고의 숙박시설을 선택하고 어떤 특별한 체험을 선사할까를 고민하며 일년간 행복한 준비를 한다.