

## 페타이어를 흡착제로 한 카드뮴 함유 폐수 처리 특성

백미화 · 김동수<sup>†</sup>

이화여자대학교 환경학과

### Adsorption Treatment Characteristics of Cadmium Ion Containing Wastewater Using Waste Tire as an Adsorbent

Mi-Hwa Baek · Dong-Su Kim<sup>†</sup>

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

(Received 7 December 2005, Accepted 18 January 2006)

#### Abstract

Adsorption features of Cd<sup>2+</sup> on waste tire particles have been investigated for the purpose of enhanced wastes recycling along with the development of an economic process for wastewater treatment. The isoelectric point of waste tire particles was found to be ca. pH 7 and the adsorbed amount of Cd<sup>2+</sup> was increased with pH under experimental conditions. The variation of the adsorption behavior of Cd<sup>2+</sup> with pH was well explained by the change of the electrokinetic potential of waste tire particles according to the pH. Adsorption of Cd<sup>2+</sup> was observed to reach its equilibrium within 45 minutes after the adsorption started under experimental conditions and followed the Freundlich model well. Kinetic analysis showed that the adsorption reaction of Cd<sup>2+</sup> was second order and thermodynamic estimation substantiated the endothermic behavior of Cd<sup>2+</sup> adsorption. As the amount of adsorbent increased, more adsorption of Cd<sup>2+</sup> was accomplished and the adsorption capacity of adsorbent was found to be enhanced by its pre-treatment with NaOH. Also, the adsorption of adsorbate was promoted as the ionic strength of wastewater was increased.

**keywords** : Adsorption, Cadmium ion, Waste tire, Wastewater treatment

### 1. 서론

산업의 발달로 인하여 납, 구리, 카드뮴, 수은, 니켈 등 다양한 중금속이 함유된 폐수의 발생량이 급속히 증가하여 심각한 환경오염을 일으키고 있다. 이러한 중금속이 토양에 유입되면 토양내에 지속적으로 잔존하며 생물체내에 축적되어 궁극적으로 이들의 성장을 저해하는 경향이 있다. 또한 중금속은 미량이라도 체내에 축적이 되면 잘 배출되지 않고 장기간에 걸쳐 부작용을 나타내고 다양한 독성을 나타낸다. 이 중 카드뮴은 알칼리 건전지, 구리 합금, 도금, 페인트, 플라스틱, 그리고 세라믹 제조 등 산업에서 널리 사용되는 금속으로(Lodeiro et al., 2005; Li et al., 2003), 인체에 유입 시 체내에 오랜 기간동안 잔존하여 신장장애, 빈혈, 중추신경장애, 고혈압 및 골격계 장애 등을 일으킨다(Kumar et al., 2005). 따라서 환경 중에 배출시 토양 및 생태계에 심각한 환경오염을 유발하므로 공정 중에 발생하는 카드뮴 등 중금속이 함유된 폐수를 처리하는 방안이 필요하다.

산업폐수로부터 중금속을 제거하는 물리화학적 방법에는 화학 응집법, 흡착법, 추출법, 이온교환법, 막분리법 등 다

양한 공정이 적용되고 있으며 이 중 흡착법은 비교적 간단한 조작에 의해 효과적으로 중금속 폐수를 처리할 수 있다는 장점이 있으며 흡착제로서 활성탄이 널리 상용화되고 있다(Babel et al., 2003). 그러나 활성탄은 흡착효율은 좋으나 재생과정에서 소요되는 비용이 크다는 단점이 있어 최근에는 높은 효율의 저렴한 흡착제로 산업 및 농업으로부터 발생하는 폐기물이나 여러 종류의 점토, 또는 생체흡착제를 사용하여 폐수 속에 존재하는 중금속을 제거하는 연구가 많은 연구자들에 의해 수행되고 있다(Leyva-Ramos et al., 2005; Srivastava et al., 2005; Singh et al., 2005; Tahir et al., 2004; Hanzlik et al., 2004).

한편, 자동차의 생산량이 증가함에 따라 이의 결과로 발생하는 페타이어의 양이 해마다 늘어나고 있는 추세이다. 페타이어의 처리방법에는 매립과 소각이 이루어지고 있으나 매립방식은 심각한 매립지 부족에 대한 문제가 발생되며, 페타이어는 분해되지 못하는 난분해성 물질로 소각시 불완전 연소에 따른 매연과 입자상 물질 및 악취가 발생되어 환경오염 등이 야기될 수 있다(박 등, 2004). 따라서 이러한 여러 가지 문제점을 해결하고 폐자원의 재활용 측면에서 페타이어의 재활용률을 높이기 위한 다양한 기술개발 및 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 페타이어를 재활용하는 방안과 관련하여

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
dongsu@ewha.ac.kr

이의 물성을 고려하여 흡착제로 활용하는데 대한 기초연구를 수행하였다. 이는 산업폐기물을 재활용함으로써 환경오염문제의 해결 뿐 아니라 경제적 측면에서도 많은 이득을 창출할 것으로 기대되며, 이와 더불어 흡착제에 의해 처리된 중금속 성분을 다시 회수하여 공정에 재사용하는 경우 그 경제적 효과는 더욱 향상될 것으로 예상된다. 흡착질로는 도금 및 합금제조 등 화학공업에서 다량으로 방출되고 있는 카드뮴 이온을 선정하여 시간별 흡착량의 변화로부터 흡착반응의 속도론적인 관점을 고찰하고, 평형흡착량으로부터 등온흡착식을 유도하였다. 또한 온도에 따른 흡착량의 변화를 토대로 흡착반응의 열역학적 인자들을 파악하고, 폐수의 pH 및 이온강도의 변화가 흡착에 미치는 영향을 검토하였으며 흡착제의 전처리에 따른 흡착거동의 변화양상을 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 흡착제 물성

본 연구에서 흡착제로 사용한 페타이어는 크기 1 cm 이하로 절단한 후 증류수로 수 회 이상 세척한 다음 이를 Mechanical Mixer를 사용하여 분쇄하였다. 분쇄된 페타이어는 체질하여 -100/+200 Mesh 크기의 입자들을 흡착제로 사용하였으며 -400 Mesh 부분을 따로 취해 증류수에 넣어 수 시간 이상 방치한 후 안정한 Colloid 입자를 대상으로 pH에 따른 Electrokinetic Potential의 변화를 측정하였다 (Zeta-Meter Co., Model 3.0+).

또한, 페타이어의 흡착능을 검토하기 위해 이의 요오드가를 다음의 식에 의거하여 구하였다.

$$I = (10 \times f - K \times f) \times 12.69 \times 5 / S \quad (1)$$

여기서 I는 요오드가 (mg/g) 이며 K는 적정에 소비된 0.1 M 티오황산나트륨 용액의 부피(mL), f와 f는 각각 티오황산나트륨 용액과 반응하는 요오드 용액과 티오황산나트륨 용액의 농도계수, 12.69는 티오황산나트륨 용액 단위의 부피의 요오드 상당량(mg), 그리고 S는 흡착제의 무게(g)이다. 흡착제 크기로 조절된 페타이어 입자에 요오드 용액을 가하여 흡착시킨 다음, 상층액에 녹말 용액을 지시약으로 첨가하고 0.1 M 티오황산나트륨 용액을 적가하여 요오드의 잔류 농도가 2.5 g/1000 mL일 때의 흡착량으로부터 페타이어의 요오드가는 약 32.9 mg/g인 것으로 파악되었다.

### 2.2. 흡착실험

흡착질로 사용한 Cd<sup>2+</sup>가 함유된 폐수는 Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O (Duksan Chemicals Co.)를 사용하여 3 차 증류수를 이용해 조제하였으며 Cd<sup>2+</sup>의 Pourbaix Diagram에 의거하여 pH의 변화에 따른 실험을 제외하고는 Cd<sup>2+</sup>가 이온상태로 안정한 pH 4의 조건에서 흡착실험을 수행하였다. 농도 및 pH가 조절된 폐수에 흡착제를 넣고 온도 조절이 가능한 Shaking Incubator를 이용해 25°C, 200 rpm의 조건에서 흡착시간에

따른 흡착량의 변화를 관찰하여 평형 흡착시간을 도출하였다. Cd<sup>2+</sup>의 흡착량은 흡착 후 용액 중에 잔존하는 흡착질의 농도를 Atomic Absorption Spectrophotometer(Perkin Elmer Co. LTD., ANALYST 100)로 분석하여 산정하였으며 필요에 따라 Shaking Incubator의 온도를 변화시켰다. 폐수의 pH는 HNO<sub>3</sub>와 NaOH를 사용하여 조절하였으며 흡착제의 전처리가 흡착양상에 미치는 영향을 검토하기 위해 농도가 조절된 NaOH 용액을 사용하여 -100/+200 Mesh 페타이어 입자를 1 g/L의 비로 3 시간동안 교반 처리한 다음 증류수로 수 회 이상 세척한 흡착제로 흡착실험을 하였다. 또한, 폐수의 이온강도가 흡착에 미치는 영향을 관찰하기 위해 KNO<sub>3</sub>의 농도를 변화시켜 이온강도를 조절한 폐수에 대해서도 흡착양상을 검토하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 페타이어 입자의 수중 표면 특성

Fig. 1은 pH에 따른 페타이어 입자의 Electrokinetic Potential의 변화를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 이로부터 알 수 있는 바와 같이 페타이어 입자의 수중에서의 Isoelectric Point는 pH 7 부근인 것으로 파악되었으며, 그 이하의 pH에서는 양의 전하로 그리고 그 이상의 pH에서는 음의 전하로 대전되어 있는 것으로 관찰되었다. 이러한 결과는 pH가 감소하여 수중 H<sup>+</sup>의 농도가 증가하게 되면 페타이어 입자 표면에 흡착하는 H<sup>+</sup>의 양이 증가함으로 인한 현상으로 생각할 수 있으며, 이와 반대로 pH가 상승함에 따라 흡착제 표면의 Electrokinetic Potential이 음의 방향으로 변화하는 것은 수중의 OH<sup>-</sup> 이온의 농도가 증가하여 이의 흡착에 의한 현상으로 해석할 수 있다. pH 10을 정점으로 pH가 그보다 높아질 때 Electrokinetic Potential의 절대값이

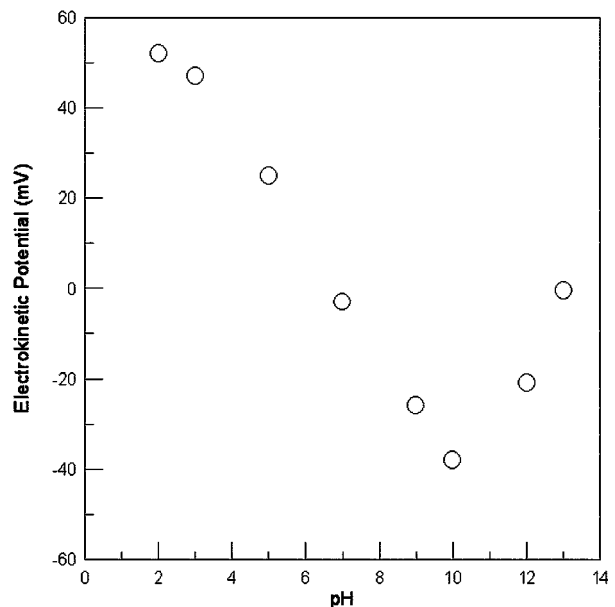


Fig. 1. Variation of the electrokinetic potential of waste tire particles with pH at 25°C.

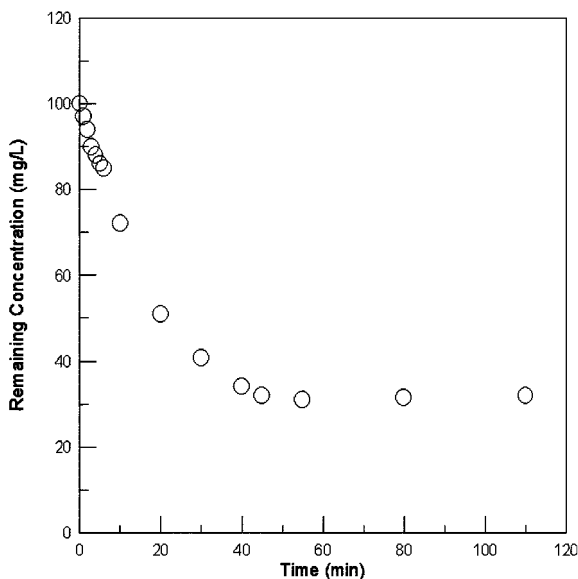
다시 감소하고 이러한 강염기성 조건에서 Electrokinetic Potential이 0으로 접근하는 것으로 관찰되었는데, 이는 페타이어 표면의 Electric Double Layer의 Compression에 기인하는 것으로 사료된다. 즉, Electric Double Layer의 두께는 다음의 식으로 표현되는데 온도가 일정할 때 이온의 농도 (c)가 증가함에 따라 Double Layer Thickness가 줄어들어 Stern Potential이 감소하게 된다. 따라서, 용액의 조건이 강염기성으로 전환되면 OH<sup>-</sup> 이온의 농도가 상승하게 되고 이에 기인하여 Electrokinetic Potential이 0에 접근하는 것으로 해석할 수 있다.

$$1/k = [\epsilon kT / 2e^2 N_A c z^2]^{1/2} \tag{2}$$

- 1/k : Double Layer Thickness
- ε : Dielectric Constant
- k : Boltzmann Constant
- N<sub>A</sub> : Avogadro's number
- c : Concentration of the Symmetric Electrolyte
- z : Valence of Ionic Species

**3.2. 흡착 Kinetics 및 Isotherm**

Fig. 2는 시간에 따른 Cd<sup>2+</sup>의 흡착량의 변화를 알아보기 위하여 흡착질의 초기농도를 100 mg/L, 그리고 흡착제의 양을 1 g/L로 하여 흡착시간에 따른 폐수 중 잔존 Cd<sup>2+</sup> 농도의 변화양상을 관찰한 것이다. 이 결과로부터 페타이어 표면에 대한 Cd<sup>2+</sup>의 흡착은 반응시작 후 신속히 진행되어 45 분 후에는 평형에 도달하는 것을 알 수 있었다. 따라서 이 결과를 토대로 다른 조건에서의 평형흡착실험은 60 분의 흡착시간에 대해 수행하였다. 본 연구에서 흡착조건으로 설정한 pH 4에서 흡착제의 표면이 양으로 하전되어 있음



**Fig. 2.** Change of the remaining concentration of Cd<sup>2+</sup> in solution according to the adsorption time (initial conc. of Cd<sup>2+</sup>: 100 mg/L, amount of adsorbate: 1 g/L (-100/+200 Mesh), pH 4, 25°C).

에도 불구하고 페타이어에 대한 Cd<sup>2+</sup>의 흡착이 빠르게 진행되는 것은 페타이어 표면과 Cd<sup>2+</sup>와의 정전기적 반발력보다 Cd<sup>2+</sup>가 페타이어 표면에 흡착되는 과정에서 흡착질과 흡착제간의 화학적 결합이 더욱 우세하게 작용하기 때문인 것으로 사료된다.

반응시간에 따른 흡착량의 변화를 반응속도론적으로 검토하기 위하여 Fig. 2의 0~6 분 사이의 결과를 다음 1 차 및 2 차 반응속도식에 적용하여 해석하였다.

$$\ln [(C_t - C_e) / (C_0 - C_e)] = -kt \tag{3}$$

$$[1/C_0] [(C_0 - C_t) / (C_t - C_e)] = -kt \tag{4}$$

여기서, C<sub>e</sub>, C<sub>0</sub>, 그리고 C<sub>t</sub>는 각각 흡착질의 평형농도, 초기농도, 그리고 임의의 시간에서의 농도를 의미하며 k와 t는 각각 반응속도상수와 반응시간을 의미한다. 위의 반응속도식에 적용하여 도출한 직선식으로부터 구한 1 차와 2 차 반응속도상수는 각각 0.0436 min<sup>-1</sup> (r<sup>2</sup> = 0.994)와 0.00156 M<sup>-1</sup>min<sup>-1</sup> (r<sup>2</sup> = 0.996)인 것으로 파악되었다. 이 결과로부터 흡착제로 사용된 페타이어에 대한 Cd<sup>2+</sup>의 흡착은 본 실험 조건에서 반응 초기에 2 차 반응형태의 반응속도 특성을 가지는 것으로 파악되었다.

일반적으로 흡착반응의 메커니즘을 규명하는 방법 가운데 하나로 평형 흡착에 대한 Adsorption Isotherm을 검토하는 방안을 생각할 수 있다. Cd<sup>2+</sup>의 초기농도에 따른 평형흡착량의 변화에 근거해 이를 Freundlich 등온흡착식에 적용하여 검토하였다. Freundlich 흡착식은 다음 식 (5)로 표현되며,

$$x/m = kC_e^{1/n} \tag{5}$$

여기서, x와 m은 각각 평형상태에서 흡착된 흡착질의 양 및 투입된 흡착제의 양, C<sub>e</sub>는 평형상태에서의 흡착질의 농도, 그리고 k와 n은 실험상수들이며 물리적으로는 각각 Adsorption Capacity와 Adsorption Intensity를 의미한다. 위의 식의 양변에 로그를 취하여 log x/m와 log C<sub>e</sub>의 관계를 직선 회귀식으로 나타낸 것이 Fig. 3이며 직선의 기울기와 절편은 각각 1/n 및 log k가 된다. 이에 의거하여 도출한 1/n과 k는 각각 0.88 및 3.59 정도인 것으로 조사되었으며, Cd<sup>2+</sup>의 페타이어에 대한 흡착이 Freundlich 등온흡착식을 비교적 잘 따르는 것으로 파악되었다. 일반적으로 Freundlich 등온흡착식에서 1/n의 값이 0.3~0.7 정도일 때 흡착이 오래 지속되어 흡착반응의 안정성이 큰 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 조사된 1/n 값은 이에 근접한 수치로서 본 연구에서 흡착제로 검토한 페타이어는 흡착제로 활용될 수 있는 가능성이 큰 것으로 사료된다.

**3.3. 흡착반응의 열역학적 해석**

페타이어에 대한 Cd<sup>2+</sup>의 흡착에 미치는 온도의 영향을 조사하기 위해 반응온도를 25°C, 35°C, 45°C, 그리고 55°C

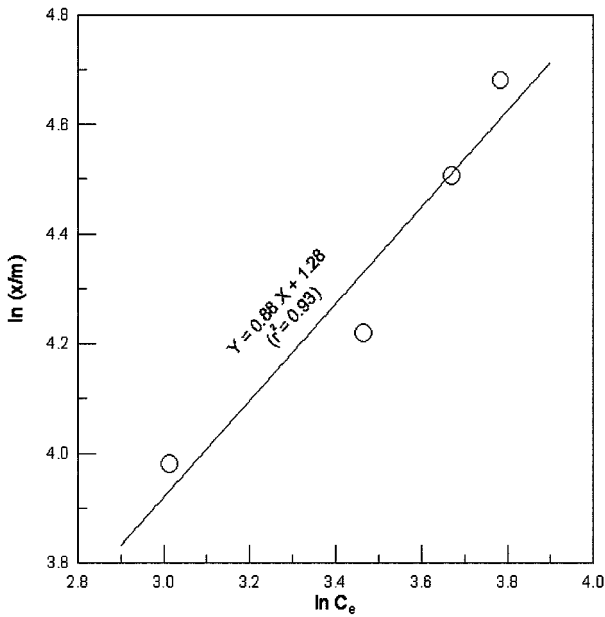


Fig. 3. Freundlich isotherm for the adsorption of Cd<sup>2+</sup> on waste tire.

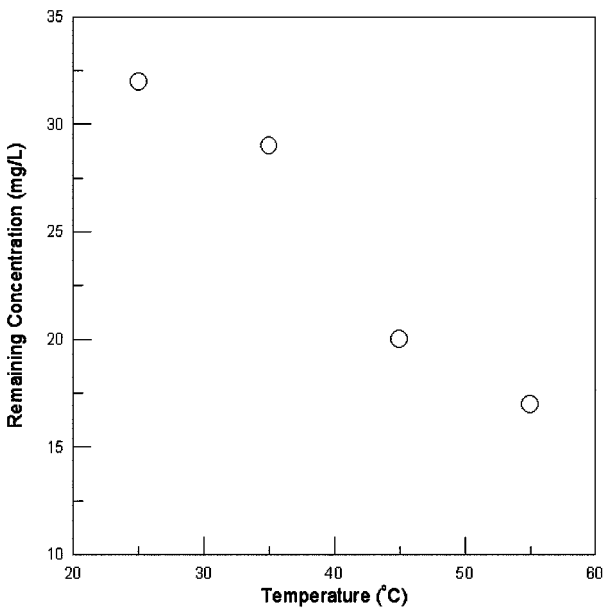


Fig. 4. Variation of the remaining concentration of Cd<sup>2+</sup> in solution at equilibrium with temperature (initial conc. of Cd<sup>2+</sup>: 100 mg/L, amount of adsorbate: 1 g/L (-100/+200 Mesh), pH 4).

로 변화시키면서 흡착량의 변화를 관찰하였다. Fig. 4의 결과로부터 알 수 있듯이 반응온도가 증가함에 따라 흡착제에 대한 Cd<sup>2+</sup>의 흡착량이 점차 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 온도가 증가할수록 페타이어에 대한 Cd<sup>2+</sup>의 흡착량이 증가하는 것은 흡착제 표면에 대한 흡착질의 흡착이 Chemical Adsorption의 특성을 지니고 있음에 기인하는 것으로 사료된다. 이 실험결과를 바탕으로 Cd<sup>2+</sup>의 흡착에 미치는 반응온도의 영향을 열역학적으로 고찰하기 위하여 온도와 평형상수의 관계를 나타내는 다음의 van't Hoff

식을 이용하여 검토하였다.

$$d \ln K / d(1/T) = -\Delta H^\circ / R \quad (6)$$

K : Equilibrium Constant

T : Absolute Temperature

R : Universal Gas Constant

$\Delta H^\circ$  : The Change of Enthalpy at Standard State

각 온도에서의 흡착반응의 평형상수 K는 Cads/Ce로 생각할 수 있는 바, Cads와 Ce는 각각 평형상태에서 흡착제에 흡착된 Cd<sup>2+</sup>의 농도와 용액 중에 잔존하는 Cd<sup>2+</sup>의 농도를 의미하며, Cads는 흡착질의 초기농도 C<sub>0</sub>에서 평형농도 C<sub>e</sub>를 뺀 값으로 표현되어질 수 있다. 각 온도에서 산정한 K를 식 (6)에 대입하여 1/T의 변화에 따른 lnK의 변화율로부터 표준상태에서의 흡착반응의 엔탈피 변화인  $\Delta H^\circ$ 를 산정한 결과 그 값이 24.2 kJ/mol로 파악되었다. 즉, 페타이어에 대한 Cd<sup>2+</sup>의 흡착반응은 흡열반응으로 온도가 상승할수록 흡착율이 증가함을 의미하므로 효과적인 흡착처리를 위해서는 폐수의 온도를 증가시키는 조치가 필요할 것으로 사료된다.

임의의 물리화학적 반응의 평형상수와 표준상태에서의 Gibbs Free Energy의 변화의 관계는 식 (7)로 나타낼 수 있으며  $\Delta G^\circ$ 와  $\Delta H^\circ$  및  $\Delta S^\circ$ 와의 관계는 식 (8)로 표현되어진다. 이로부터 Cd<sup>2+</sup>의 흡착반응에 대해 표준상태에서의 자유에너지와 엔트로피의 변화를 산정한 결과  $\Delta H^\circ$ 가 실험조건 온도 범위 내에서 변하지 않는다고 가정할 때  $\Delta G^\circ$ 와  $\Delta S^\circ$ 는 25°C, 35°C, 45°C, 그리고 55°C에서 각각 -1.87, -2.29, -3.67, -4.32 kJ/mol과 0.0875, 0.0861, 0.0877, 0.0870 kJ/K · mol인 것으로 파악되었다. Cd<sup>2+</sup>의 흡착반응에 따른  $\Delta S^\circ$ 가 양의 값을 가지는 것으로 나타난 바, 이는 용액 중에서 Cd<sup>2+</sup>의 주변에 정전기적으로 고정되어 있던 물분자들이 Cd<sup>2+</sup>의 흡착이 진행됨에 따라 용액 중으로 방출됨으로 인해 시스템 전체의 자유도가 증가함에 따른 결과로 생각할 수 있다.

$$\Delta G^\circ = - RT \ln K \quad (7)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (8)$$

### 3.4. 흡착제의 양 및 pH의 영향

흡착제인 페타이어의 양에 따른 Cd<sup>2+</sup>의 흡착량의 변화에 대해 검토하고자 흡착제의 양을 변화시키면서 흡착 후 수중에 잔존하는 Cd<sup>2+</sup> 평형농도의 변화를 관찰하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 흡착제의 양이 1에서 5 g/L로 증가함에 따라 Cd<sup>2+</sup>의 잔존 농도가 32에서 12.8 mg/L로 점차 감소함이 관찰되었다. 이러한 실험결과에 의거하여 실제 공정에서 페타이어를 흡착제로 사용할 경우 Cd<sup>2+</sup>의 처리 목표량에 따른 흡착제의 투입량을 결정하여 공정을 운영할 수 있을 것으로 사료된다.

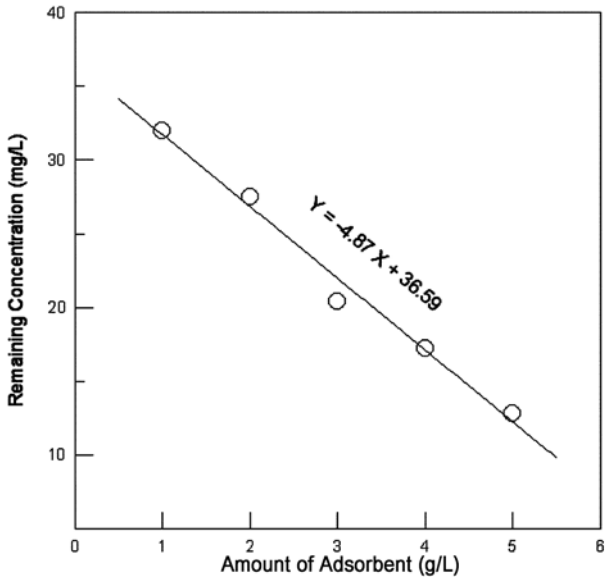


Fig. 5. Change of the remaining concentration of Cd<sup>2+</sup> at equilibrium according to the amount of adsorbent (initial conc. of Cd<sup>2+</sup>: 100 mg/L, pH 4, 25°C).

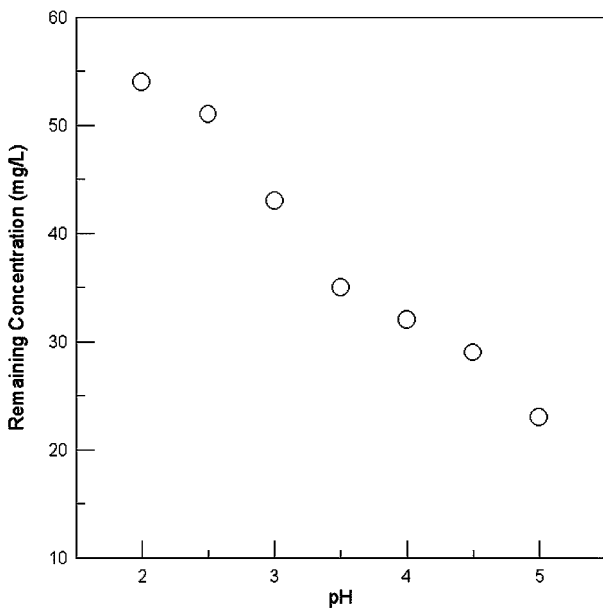


Fig. 6. Change of the remaining concentration of Cd<sup>2+</sup> at equilibrium according to the solution pH (initial conc. of Cd<sup>2+</sup>: 100 mg/L, amount of adsorbate: 1 g/L (-100/+200 Mesh), 25°C).

수중에서 일어나는 흡착반응에 있어 pH는 흡착제의 표면 상태와 흡착질의 이온화 정도 등에 영향을 주어 흡착 특성을 결정하는 중요한 요인이 될 수 있다. 본 연구에서는 페타이어를 흡착제로 사용하여 Cd<sup>2+</sup>를 흡착 시 pH의 영향을 살펴보기 위하여 pH를 2~5로 변화시킴에 따른 Cd<sup>2+</sup>의 흡착량의 변화를 관찰하였다(Fig. 6). 이 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 실험조건에서 pH가 2에서 5로 증가할수록 페타이어 표면에 대한 Cd<sup>2+</sup> 흡착의 평형흡착량은 46 mg/g에서 77 mg/g로 지속적으로 향상되는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 앞서 제시한 pH에 따른 페타이어 표면전위의

변화와 연관하여 설명되어질 수 있다. 즉, pH 7 이하의 조건에서 pH가 증가함에 따라 페타이어의 표면전하는 점차 감소하게 되므로 그 결과로 양의 전하를 띠고 있는 Cd<sup>2+</sup>와 정전기적 반발력이 상대적으로 감소하게 되어 pH가 상승함에 따른 흡착질의 흡착량은 증가하게 되는 것으로 해석할 수 있다.

### 3.5. 전처리 및 이온강도

Fig. 7은 NaOH에 의해 전처리한 페타이어에 대한 Cd<sup>2+</sup>의 흡착성의 변화양상을 검토한 결과를 나타낸 것이다. 전처리를 하지 않은 경우에 비해 Cd<sup>2+</sup>의 흡착량이 증가하는 경향을 보였는데 이는 NaOH에 의한 전처리 과정에서 페타이어의 표면에 대한 OH의 Surface Excess (ΓOH)가 상승하여 이로 인한 Cd<sup>2+</sup> 흡착성의 조장에 의한 결과로 사료된다. 전처리시 사용된 NaOH의 농도가 증가함에 따라 Cd<sup>2+</sup>의 흡착량은 점차 상승하다 1.0 M 이상의 조건에서는 그 값이 더 이상 증가하지 않는 것으로 관찰되었는데 이는 한정된 흡착제의 표면에 부착될 수 있는 OH의 양은 이의 수중에서의 농도 증가에 따라 상승되기는 하나 어느 한도를 지나게 되면 포화되기 때문인 것으로 사료된다.

폐수내에는 흡착제 표면에 흡착하지는 않으나 폐수의 이온강도에 영향을 미치는 이온종들이 존재할 수 있으며 이들 이온에 의해 흡착질의 흡착양상은 변화될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 이온종으로 수화도가 높은 K<sup>+</sup> 및 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>를 선정하여 이들 이온의 농도에 따른 폐수의 이온강도의 변화가 Cd<sup>2+</sup>의 흡착에 미치는 영향을 검토하였다. Fig. 8은 Cd<sup>2+</sup>가 함유된 폐수의 KNO<sub>3</sub> 농도를 0.5에서 2.5 M로 변화시키면서 흡착 후 잔존하는 Cd<sup>2+</sup>의 평형농도의 변

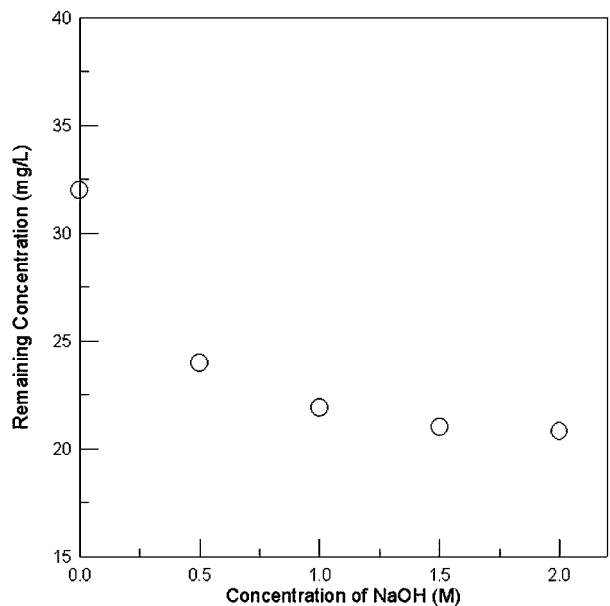
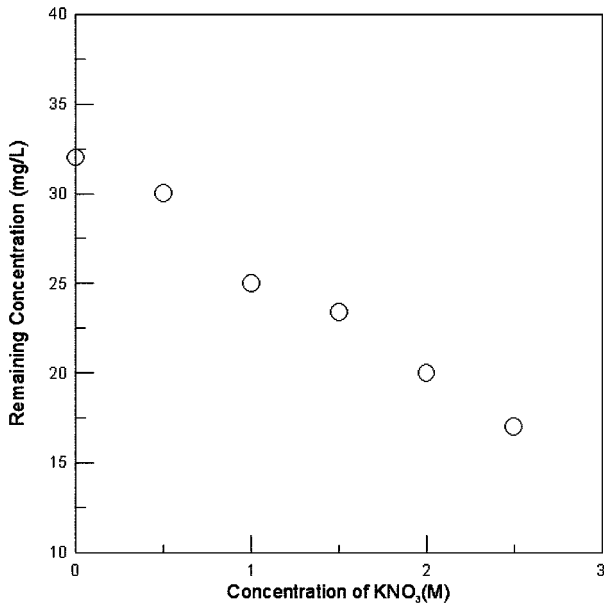


Fig. 7. Variation of the remaining concentration of Cd<sup>2+</sup> at equilibrium with the concentration of NaOH for the pre-treatment of adsorbent (initial conc. of Cd<sup>2+</sup>: 100 mg/L, amount of adsorbate: 1 g/L (-100/+200 Mesh), pH 4, 25°C).



**Fig. 8.** Variation of the remaining concentration of Cd<sup>2+</sup> at equilibrium with the concentration of KNO<sub>3</sub> for the control of the ionic strength of solution (initial conc. of Cd<sup>2+</sup>: 100 mg/L, amount of adsorbate: 1 g/L (-100/+200 Mesh), pH 4, 25°C).

화를 관찰한 결과이다. 이로부터 알 수 있는 바와 같이 KNO<sub>3</sub>의 농도가 증가함에 따라 페타이어에 대한 Cd<sup>2+</sup>의 흡착량은 점차 증가하는 것으로 파악되었다. 이러한 경향은 KNO<sub>3</sub>의 농도가 상승함에 따라 위의 식 (2)에서 제시한 흡착제 표면에서의 Double Layer Thickness가 감소되기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 수중에서 KNO<sub>3</sub>가 용해되어 형성된 K<sup>+</sup>와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 흡착제 표면의 Double Layer Thickness를 감소시키고 이의 결과로 Cd<sup>2+</sup>와 흡착제 표면간의 정전기적 반발력이 저하되어 흡착질의 흡착량이 상승하는 것으로 고려할 수 있다. 폐수 중에 흡착질인 Cd<sup>2+</sup>와 함께 K<sup>+</sup>와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>가 공존할 경우 한정된 흡착제의 표면에 대해 이들 이온이 경쟁적으로 흡착함으로써 Cd<sup>2+</sup>의 흡착량이 감소될 것으로 예상할 수도 있으나 본 실험의 결과와 같이 오히려 그 값이 상승한 것은 K<sup>+</sup> 및 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 수화도가 높을 뿐 아니라 이들에 의한 Double Layer Compression 효과가 상대적으로 우세하게 나타남으로 인한 결과로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 Cd<sup>2+</sup>를 함유한 폐수를 흡착 처리하는 과정에서 폐기물로 발생하는 페타이어를 흡착제로 활용하는 방안에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론들을 도출하였다.

- 1) 페타이어 표면의 pH에 따른 Electrokinetic Potential은 pH 7을 경계로 그 이하의 pH에서는 양의 값을, 그리고 그 이상의 pH에서는 음의 값을 보임으로써 흡착제의 Isoelectric Point는 pH 7 부근인 것으로 파악되었다.
- 2) 실험조건에서 시간에 따른 Cd<sup>2+</sup>의 흡착은 흡착제시 약

45 분 후에 평형에 도달하는 것으로 검토되었고, 페타이어에 대한 Cd<sup>2+</sup>의 흡착은 2 차 반응속도식을 따르며 평형상태에서 Freundlich Isotherm에 부합하는 것으로 관찰되었다.

- 3) 반응온도가 증가함에 따라 Cd<sup>2+</sup>의 흡착량은 상승함을 보였고, 표준상태에서 흡착에 따른 엔트로피의 변화는 양의 값으로 조사되었다.
- 4) 흡착제 양이 증가할수록 Cd<sup>2+</sup>의 평형흡착량은 증대되었고 pH 상승 시 페타이어에 대한 Cd<sup>2+</sup>의 흡착성이 향상된 바, 이는 pH에 따른 페타이어 표면의 전하의 변화와 밀접한 관련이 있는 것으로 파악되었다.
- 5) NaOH에 의한 페타이어의 전처리는 이의 흡착능을 향상시켰으나 그 농도가 어느 한도 이상 증가할 경우 흡착능의 변화에 미치는 영향이 일정해지는 것으로 관찰되었다. 또한, 폐수의 이온강도가 상승함에 따라 흡착제 표면에서의 Double Layer Thickness 감소 효과에 의해 흡착질의 흡착량이 증가하는 것으로 조사되었다.

#### 참고문헌

박주량, 이수구, 페타이어 재활용을 위한 GRT/PE 복합체에 대한 연구(IV): 페타이어의 분쇄방식에 따른 영향, *환경관리학회지*, **10**(3), pp. 193-202 (2004).

Babel, S. and Kurniawan, T. A., Low-Cost Adsorbents for Heavy Metals Uptake from Contaminated Water: A Review, *J. Hazardous Mater*, **B97**, pp. 219-243 (2003).

Hanzlik, J., Jehlicka, J., Sebek, O., Weishauptova, Z. and Machovic, V., Multi-Component Adsorption of Ag(I), Cd(II) and Cu(II) by Natural Carbonaceous Materials, *Water Research*, **38**, pp. 2178-2184 (2004).

Kumar, U. and Bandyopadhyay, M., Fixed Bed Column Study for Cd(II) Removal from Wastewater using Treated Rice Husk, *J. Hazardous Materials*, in press (2005).

Leyva-Ramos, R., Bernal-Jacome, L. A. and Aosta-Rodriguez, I., Adsorption of Cadmium(II) from Aqueous Solution on Natural and Oxidized Corncob, *Separation and Purification Technology*, **45**, pp. 41-49 (2005).

Li, Y. H., Wang, S., Luan, Z., Ding, J., Xu, C. and Wu, D., Adsorption of Cadmium(II) from Aqueous Solution by Surface Oxidized Carbon Nanotubes, *Carbon*, **41**, pp. 1057-1062 (2003).

Lodeiro, P., Cordero, B., Bariada, J. L., Herrero, R. and Sastre de Vicente, M. E., Biosorption of Cadmium by Biomass of Brown Marine Macroalgae, *Bioresource Technology*, **96**, pp. 1796-1803 (2005).

Singh, K. K., Rastogi, R. and Hasan, S. H., Removal of Cadmium from Wastewater using Agricultural Waste 'rice polish', *J. Hazardous Materials*, **A121**, pp. 51-58 (2005).

Srivastava, P., Singh, B. and Angove, M., Competitive Adsorption Behavior of Heavy Metals on Kaolinite, *J. Colloid and Interface Science*, **290**, pp. 28-38 (2005).

Tahir, S. S. and Rauf, N., Removal of Fe(II) from the Wastewater of a Galvanized Pipe Manufacturing Industry by Adsorption onto Bentonite Clay, *J. Environmental Management*, **73**, pp. 285-292 (2004).