

## 음이온교환수지와 활성탄을 이용한 산업 폐수 중 셀레늄의 흡착

한상욱·박진도\*·이학성

울산대학교 생명화학공학과, \*울산과학대학 환경생활화학과  
(2009년 8월 28일 접수; 2009년 10월 8일 수정; 2009년 10월 19일 채택)

### Adsorption of Selenium in Industrial Wastewater Using Anion Exchange Resin and Activated Carbon

Sang Uk Han, Jin Do Park\* and Hak Sung Lee

School of Chemical Engineering and BioEngineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

\*Department of Environmental & life Chemistry, Ulsan College, Ulsan 680-749, Korea

(Manuscript received 28 August, 2009; revised 8 October, 2009; accepted 19 October, 2009)

#### Abstract

Several adsorbents were tried to remove the selenium ions from industrial wastewater and the following ascending order of the adsorption performance for the selenium at pH 9 was observed: cation exchange resin < chelate resin < zeolite < brown marine algae < granular activated carbon < anion exchange resin. Initial concentration of selenium(146 mg/L) in industrial wastewater was reduced to 63 mg/L of selenium at pH 9 by neutralization process. The maximum uptake of Se calculated from the Langmuir isotherm with anion exchange resin was 0.091 mmol/g at pH 10 and that with granular activated carbon was 0.083 mmol/g at pH 6. The affinity coefficients of Se ion towards anion exchange resin and granular activated carbon were 3.263 L/mmol at pH 10 and 0.873 L/mmol at pH 6, respectively. The sorption performance of anion exchange resin at the low concentration of Se, namely, was much better than that of granular activated carbon. The Se ions from industrial wastewater throughout neutralization process and two steps of adsorption using anion exchange resin was removed to 97.7%.

**Key Words** : Selenium, Adsorption, Anion exchange resin, Granular activated carbon

#### 1. 서 론

1817년 Jons Jakob Berzelius에 의해 처음 발견된 셀레늄은 1차 세계대전 중 망간 대체용 유리착색제로 처음 상업적 용도로 사용된 이후, 오늘날 유리착

색제 외 전자공학, 안료, 사진, X-Ray 정류기, 광전지, 합금 등 광범위한 분야에 소량으로 사용된다<sup>1)</sup>. 특히 최근에는 인체의 세포를 지키는 항산화효소의 중요한 성분으로 알려져 있으며 폐암, 대장암, 전립선암 등으로 인한 사망률을 낮추는데 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 셀레늄은 비소, 바륨, 카드뮴, 크롬, 수은, 니켈 등과 같이 인체 내부기관에 유해한 영향을 주는 유해금속으로 분류되어 있다<sup>2)</sup>. 혈중 셀레늄이 너무 많으면(100 µg/dL 이상) 셀

Corresponding Author : Hak Sung Lee, School of Chemical Engineering and BioEngineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea  
Phone: +82-52-259-2252  
E-mail: hslee@mail.ulsan.ac.kr

레노시스 라고 부르는 상태가 되는데<sup>3)</sup>, 증상으로는 위장관 장애, 탈모, 손톱의 흰 반점, 그리고 가벼운 신경손상이 나타난다. 또한 토양의 셀레늄 함량이 높은 지역에서 재배한 식품이나 보충제를 과잉 섭취할 경우 탈모현상, 현기증, 피로, 손톱과 발톱의 변화, 복부의 통증, 설사 등을 야기할 수 있다. 또한 발진이나 간경변도 일으킬 수 있으며, 장기 과잉복용은 콜레스테롤 증가 및 암 발생도 일으킬 수 있다<sup>4)</sup>. 미국에서는 산업재해에 의한 셀레늄 중독은 드물지만 영양제를 만들 때 셀레늄이 너무 많이 들어가서 생기는 제조상의 잘못과 관련된 소수의 경우가 보고되어 있다<sup>5)</sup>. 미국의학회에서는 셀레노시스가 생길 위험을 막기 위해 성인의 하루 섭취 상한을 400  $\mu\text{g}$  이하로 정하고 있다. 또한 미국은<sup>6)</sup> 물론 우리나라의 경우, 먹는 물의 수질기준으로 0.01 mg/L 이하로 설정되어 있고<sup>7)</sup>, 폐수 처리 시, 방류수 기준도 미국이나 일본의 수질환경기준을 예로 하여 향후 0.1 mg/L 이하로 강화될 전망이다. 셀레늄의 제거는 흡착기술에 의해서 가능하며, 특히 최근 다기능, 고효율성 및 선택성을 갖춘 흡착소재의 개발이나<sup>8)</sup>, 기존의 처리시설과 연계한 응용기술의 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>9,10)</sup>. 따라서 본 연구에서는 유가금속 회수 공정 중 발생하는 미량농도의 셀레늄 함유 폐액 중 셀레늄을 효과적으로 흡착할 수 있는 흡착제의 종류 및 조건을 파악하여 효과적인 제거 방안 수립을 위한 기초자료를 획득하고, 향후 강화되는 수질환경기준에 대응하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험 장치 및 방법

흡착제는 강염기성 음이온교환수지(S사, SCR20), 활성탄(입상, 8×10 mesh, 신기화학)을 사용하여 흡착성능실험을 실시하였다. 동일한 조건에 대한 흡착성능을 확인하기 위하여 Fig. 1과 같은 실험 장치에 흡착제 및 폐수의 양, shaking 속도, 접촉시간을 일정하게 하여 회분식 실험을 실시하였다.

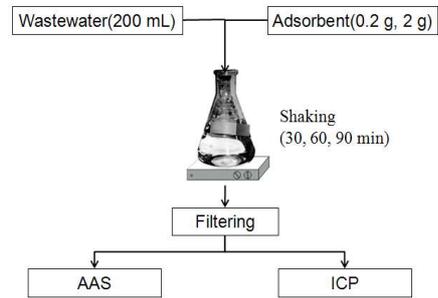


Fig. 1. Schematic of the experimental procedure.

각 흡착제의 실험 조건은 Table 1과 같이 pH를 제외한 모든 조건을 동일하게 하였고, 평형에 도달하는 시간을 확인하기 위하여 각각 30분, 60분, 120분씩 접촉 시켰다. 분말상태의 흡착제가 들어간 용액은 평형상태에 도달한 후 5A filter paper(ADVANTEC)로 여과하여 셀레늄의 농도를 분석하였다.

### 2.2. 분석방법 및 흡착량 계산

중금속 및 셀레늄의 농도 분석은 원자흡광분석기(AAS) 및 유도결합플라즈마 광발광분석기(ICP)를 사용하였다. ICP의 경우 낮은 농도 분석에서 정확성을 나타내지만, 용액에 알칼리 성분이 많은 경우, 방해이온의 영향이 발생하는 등 matrix의 영향을 많이 받는다. 따라서 ICP와 AAS를 병행하여 분석하였으며, 필요시 적정한 비율로 희석하여 분석하였다. AAS와 ICP의 분석조건은 Table 2와 같다. 흡착 실험 시 filter paper는 ADVANTEC의 5A Filter paper를 사용하였으며, 각 흡착제에 흡착된 셀레늄의 양은 식 (1)과 같이 계산되었다.

$$q = \frac{V(C_i - C_e)}{M} \quad (1)$$

여기서,  $q$  : 흡착량[mmol/g]

$C_i$  : 초기 흡착용액의 농도

$C_e$  : 최종 흡착용액의 평형농도

$V$  : 흡착용액의 부피[L]

$M$  : 흡착실험에 사용된 흡착제의 최초무게[g]

Table 1. Experimental conditions of performance test

| Adsorbent                 | Adsorbent amount(g) | Wastewater amount(mL) | Contact time (min) | Shaking speed (rpm) | pH      |
|---------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|---------|
| Anion exchange resin      | 0.2, 2              | 200                   | 120                | 200                 | 4.5~12  |
| Granular activated carbon | 0.2, 2              | 200                   | 120                | 200                 | 4.5~9.0 |

**Table 2.** Wavelength of measuring concentrations of heavy metals

|              | AAS           | ICP                  |
|--------------|---------------|----------------------|
| Maker(model) | Varian(280FS) | Perkin Elmer(5300DV) |
| Selenium     | 196.0 nm      | 196.027 nm           |
| Copper       | 324.8 nm      | 324.756 nm           |
| Iron         | 197.2 nm      | 188.981 nm           |

### 2.3. 폐액의 중화 및 중금속 방해이온 제거

흡착 실험에 사용한 폐액시료는 L사의 유기금속 회수 공정 폐액 중 셀레늄을 함유한 산성 폐액을 채취했으며, 폐액의 pH 및 화학조성을 AAS로 분석하였다.

폐수 중에 포함된 미량의 중금속이 함유된 폐액의 경우, 흡착 실험 시 방해 이온으로 작용할 수 있으며, 대부분의 흡착제는 pH가 낮을 경우, 흡착능이 저하되는 경향이 있다. 따라서 본 실험에서는  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  분말을 수용액으로 만들어 폐액의 pH를 9.0으로 상승시켜 중금속을 제거하고 흡착실험이 용이한 조건을 만들었다.

중화 처리 시, pH의 편차를 줄이기 위하여  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  분말을 각각 50%, 30%, 10% 수용액으로 만들어 소량씩 투입하면서 폐액을 교반하고, pH meter로 pH의 변화추이를 관찰하였다. 30분간 pH가 9.0에서 변화가 없음을 확인한 후, 5A filter paper로 여과하였다. 여액은 셀레늄 흡착실험용으로 사용하였으며, 그 중 일부는 중화 후의 셀레늄 및 중금속 농도를 확인하기 위해 AAS로 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 폐액 중화 후 중금속 농도변화

흡착 실험에 사용될 시료(pH 2)는 셀레늄이온 이외의 중금속을 제거하기 위해  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  용액으로 여러 가지 pH로 중화시켜 여과하고 여액을 AAS로 각각 Se, Cu, Fe에 대한 농도를 측정하였다. Table 3에 나타낸 바와 같이, 폐액을 중화, 여과하여 분석한 결과, 각각의 pH에서 Cu와 Fe는 1.0 mg/L 미만으로 남아 있었으며, 셀레늄은 pH 9에서 약 43%의 제거율로 가장 높게 제거되었다. 이는  $\text{HSeFe}$ ,  $\text{FeSePb}$ ,  $\text{CuAgSe}$  등과 같은 금속간의 화합물 또는 물리적인 결합상태에서 중금속들이 수산화물로 침전하는 과

**Table 3.** Chemical property of before and after neutralization

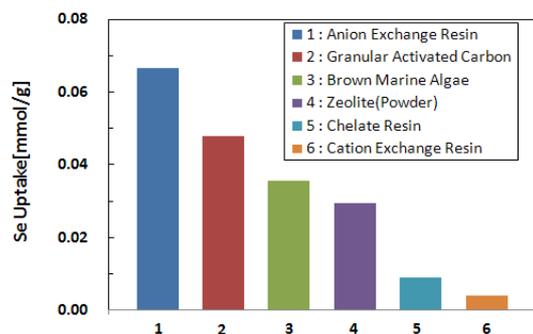
|                       | pH   | Se, mg/L | Cu, mg/L | Fe, mg/L |
|-----------------------|------|----------|----------|----------|
| Before Neutralization | 2.0  | 146.0    | 13.0     | 3.0      |
|                       | 7.0  | 92.3     | < 1.0    | < 1.0    |
| After Neutralization  | 8.0  | 87.2     | < 1.0    | < 1.0    |
|                       | 9.0  | 83.0     | < 1.0    | < 1.0    |
|                       | 10.0 | 84.6     | < 1.0    | < 1.0    |

정에서 공침(co-precipitation)된 것으로 사료된다.

### 3.2. 여러 가지 흡착제의 흡착성능

음이온교환수지, 입상활성탄, 갈조류, 제올라이트, 킬레이트수지 및 양이온교환수지 각각 0.2 g을 사용하여 셀레늄 용액(초기 농도 83 mg/L) 200 mL 및 pH 9에서 셀레늄의 흡착성능을 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 셀레늄의 흡착성능은 음이온교환수지 > 입상활성탄 > 갈조류 > 제올라이트 > 킬레이트수지 > 양이온교환수지 순서로 높았으므로 본 연구에서는 음이온교환수지(Anion Exchange Resin; AER) 및 입상활성탄(Granular activated carbon; GAC)을 사용하여 흡착실험을 수행하였다. 갈조류에 의한 셀레늄 흡착량은 동일한 평형농도에서 납, 크롬, 카드뮴, 구리 및 아연의 흡착량의 4~16% 수준으로 낮았다<sup>11)</sup>. 또한, 평형상태에 도달하는 시간을 확인하기 위해서 각각 30분, 60분, 120분씩 접촉시켜 실험한 결과 30분 이내에 평형에 도달하였으나, 초기 pH가 변하므로 15분 간격으로 0.1N 질산 용액이나 0.1N 가성소다용액을 사용하여 초기 pH

**Fig. 2.** Selenium uptake for various adsorbents.

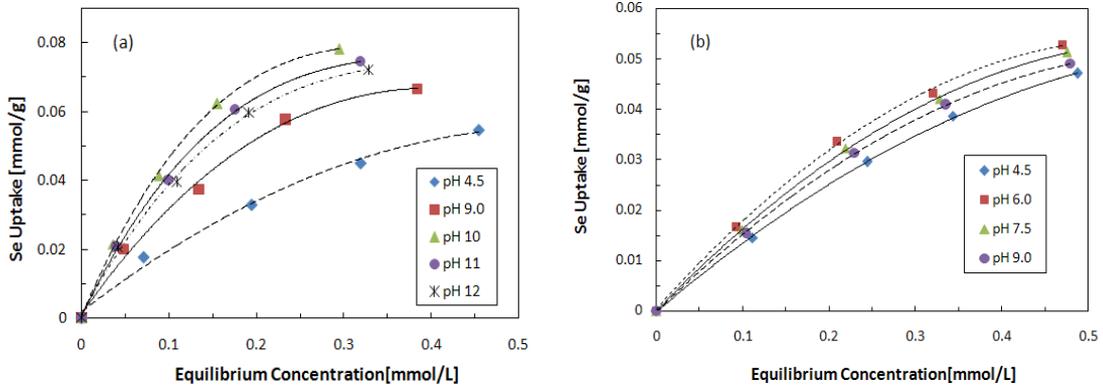


Fig. 3. Selenium uptake on various pH with anion exchange resin(a) and granular activated carbon(b).

로 조정하면서 120분씩 흡착실험을 수행하였다. 최적의 흡착 pH를 구하기 위하여 각각 다른 pH에서 중화된 셀레늄 용액(초기 농도: 20~83 mg/L)의 흡착실험을 수행하여 pH 영향을 조사한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3의 결과로부터 Langmuir 흡착등온식에 적용하여 각각의 일정한 pH에서의 흡착 상수를 구하였다. Langmuir 흡착등온식은 흡착표면의 에너지 분포가 비교적 균일한 비기능성 고분자 흡착체에 의한 흡착에 가장 적절하다고 알려져 있다<sup>9)</sup>. 단일성분 흡착에 대한 거동은 Langmuir 흡착등온 형태와 매우 흡사하므로 Langmuir 흡착등온식을 변형한 식 (2)에 실험결과를 적용하여 최대 흡착량( $q_{max}$ )과 Langmuir 상수( $K$ )를 구할 수 있다.

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_{max} K C_e} + \frac{1}{q_{max}} \quad (2)$$

여기서,  $C_e$ 는 흡착평형농도이며,  $K$ 는 셀레늄 금속과 흡착제 사이의 친화력(affinity)을 나타내는 상수로서  $K_a/K_d$ 로 표시된다.

$1/q$ 를 Y축으로 하고,  $1/C_e$ 를 X축으로 하면, 기울기와 Y절편을 구하여  $q_{max}$ 와  $K$  값을 구할 수 있으며, 식 (2)에 의해 계산된 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4에 나타낸 바와 같이, 음이온교환수지의 경우, 셀레늄의 최대 흡착량( $q_{max}$ )은 pH 10에서 0.091 mmol/g이고 pH 11에서 0.087 mmol/g이었으며, 전반적으로 pH 10~12 사이에서 높은 흡착성능을 나타내었다. 입상활성탄의 경우, 셀레늄의 최대 흡착량( $q_{max}$ )은 pH 6에서 0.083 mmol/g이고 pH 7에서 0.080

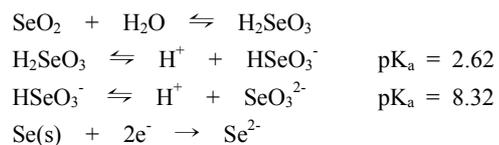
Table 4. Langmuir constants for different sorption systems

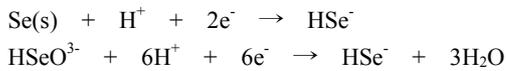
| Adsorbent                 | pH   | $q_{max}$ [mmol/g] | $K$ [mmol/L] <sup>-1</sup> |
|---------------------------|------|--------------------|----------------------------|
| Anion exchange resin      | 4.5  | 0.066              | 2.245                      |
|                           | 9.0  | 0.079              | 2.781                      |
|                           | 10.0 | 0.091              | 3.263                      |
|                           | 11.0 | 0.087              | 3.119                      |
|                           | 12.0 | 0.085              | 3.048                      |
| Granular activated carbon | 4.5  | 0.074              | 0.754                      |
|                           | 6.0  | 0.083              | 0.873                      |
|                           | 7.0  | 0.080              | 0.828                      |
|                           | 9.0  | 0.076              | 0.796                      |

mmol/g으로 pH의 영향이 거의 없었으며, 음이온교환수지의 경우보다 10% 정도 낮았다. 반면에 셀레늄이온과 흡착제와의 친화력 정도를 나타내는 상수 값은 음이온교환수지가 입상활성탄보다 3.0~3.7배 정도 컸는데, 이것은 저농도에서도 음이온교환수지의 흡착성능이 높다는 것을 의미한다.

셀레늄의 용액론적 특성을 살펴보면 pH 2 이하에서의 주된 종은  $H_2SeO_3$ 이고, pH가 증가함에 따라 pH 6 이하의 영역에서는  $HSeO_3^-$ 가 존재하며, pH 6~10 영역에서는  $HSeO_3^-$ 와  $SeO_3^{2-}$ 가 공존하며 pH 10 이상에서는  $SeO_3^{2-}$ 만 존재하고 있다<sup>12)</sup>.

이것은 아래의 반응식과 같이 실험에 사용된 시료중의  $SeO_2$  성분이 수용액 상태에서 해리되어 (-) Charge를 띠는 것으로 보인다.





강<sup>12)</sup>은 Fe(III)로 표면처리한 흡착제(Sea sand, Zeolite, Anthracite)에 의한 음이온 중금속인 As와 Se의 흡착특성을 규명하였다. 표면 처리 전 흡착제의 표면 전위는 음전하를 띠고 있으나, Fe(III)를 사용하여 표면 처리시킨 흡착제는 pH 7.5 이하의 영역에서 양전하로 표면전위가 증가하게 된다. 처리하지 않은 흡착제는 수용액상에서 pH 3 부근에서부터 음전하를 띠는  $\text{SeO}_3^{2-}$ 와의 정전기적 반발력으로 인해 흡착이 거의 일어나지 않지만, 표면처리한<sup>13)</sup> 흡착제는 양전하로 표면전위가 증가하게 되어  $\text{SeO}_3^{2-}$ 의 높은 흡착율로 인해 음이온을 띤 중금속화합물의 흡착제로 가능성이 있다고 밝히고 있다. 입상활성탄의 셀레늄 흡착과정에서는 음이온 상태의 셀레늄을 제외한 금속간의 화합물 또는 미세한 입자상 물질들이 물리흡착에 의해 제거된 것으로 보인다. 입상활성탄의 표면전위<sup>14)</sup>는 기본적으로 음전하를 띠고 있기 때문에 수용액상에서 음이온 상태로 존재하는 셀레늄과 정전기적 반발력으로 인해 흡착이 거의 일어나지 않는 것으로 보이지만, 음이온 상태로 존재하는 셀레늄 이외의 금속간 화합물이나 물리적인 결합상태의 미세입자들이 흡착된 것으로 보인다.

### 3.3. 두 흡착제를 사용한 셀레늄 제거

실험에 사용된 폐액의 성분은 대부분 셀레늄 산화물이며, HSePb, PbSeAg, HSeFe, CuAgSe 등과 같은 금속간의 화합물 또는 물리적인 결합상태의 입자상들이 불규칙한 조성으로 혼합·해리되어 이온상태로 존재하고 있다. 산화물로 존재하는 셀레늄 화합물은 비교적 높은 pH 영역에서 해리되어 음전하를 띠고 있으므로 음이온 교환수지로 제거되었고, 금속간의 화합물 또는 물리적인 결합상태의 미세한 입상 물질들은 활성탄을 이용한 물리적 흡착으로 제거할 수 있다.

본 실험에서는 셀레늄과 흡착제사이의 친화력상수가 납, 카드뮴, 구리 등의 중금속보다 낮은 값<sup>11)</sup>을 나타내므로 1단계의 처리과정으로는 방류수 수질기준을 맞추기 어려우며, 흡착제의 흡착량이 운전농도에서 약 0.078 mmol/g(0.06%) 정도로 낮으므로

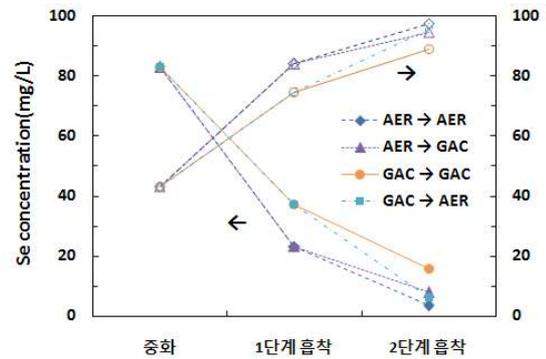


Fig. 4. Removal rate of Se throughout neutralization process and two steps of adsorption.

Ca(OH)<sub>2</sub> 용액으로 중화시킨 후, 2종류의 흡착제 사용량을 각각 10배로 증가시켜 다음과 같은 과정으로 조합하여 연속적인 2단계 흡착실험(200 mL 폐액에 2 g 흡착제 사용)을 수행하였으며, 최종 평형(방류)농도 및 제거효율을 계산하여 Fig. 4에 나타내었다.

- ① 음이온교환수지 → 음이온교환수지
- ② 음이온교환수지 → 입상활성탄
- ③ 입상활성탄 → 음이온교환수지
- ④ 입상활성탄 → 입상활성탄

Fig. 4에 나타낸 바와 같이, ①의 경우와 같이 음이온교환수지를 사용하여 연속적으로 2단계 흡착실험을 수행하면, 셀레늄 제거율은 97.7% 이고 최종 평형농도는 3.37 mg/L 이지만, 여전히 규제 예정농도 이상으로 방류하게 되므로 3단계 이상으로 연속적 흡착실험을 수행해야 할 것으로 사료된다. 음이온교환수지 및 입상활성탄을 각 단계별로 동등한 흡착제 양을 사용하는 경우, ②의 순서로 처리할 경우에는 94.6%의 셀레늄 제거율을 얻을 수 있지만, ③의 순서로 처리할 경우에는 95.8%의 셀레늄 제거율을 얻을 수 있었다. 한편, 입상활성탄만을 사용한 ④의 경우에는 셀레늄 제거율은 89.2% 이고 최종 평형농도는 15.79 mg/L 정도로 높았는데, 이것은 셀레늄 이온과 흡착제간의 친화력 상수의 세기가 중요한 역할을 하였기 때문이다. 이상의 결과와 같이, 폐수 중에 미량으로 존재하는 셀레늄을 효율적으로 제거하고, 방류수 규제 농도를 맞출 수 있기 위해서는 기존에 사용되고 있는 흡착제 이외에 새로운 흡착제의 탐색이나 개발이 필요한 실정이다.

#### 4. 결 론

여러 가지 흡착제를 사용하여 산업폐수로부터 셀레늄 제거실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 셀레늄 함유폐수를 pH 9에서 회분식 흡착실험을 한 결과, 셀레늄의 흡착성능은 음이온교환수지 > 입상활성탄 > 갈조류 > 제올라이트 > 킬레이트수지 > 양이온교환수지 순으로 나타났다.

2) Langmuir 흡착등온식으로부터 계산된 셀레늄의 최대 흡착량( $q_{max}$ )은 음이온교환수지를 사용하여 pH 10에서 0.091 mmol/g이었다. 음이온교환수지와 입상활성탄의 셀레늄 최대 흡착량은 pH 9에서 비슷하였지만, 셀레늄이온과 흡착제와의 친화력 정도를 나타내는 상수 값은 음이온교환수지가 입상활성탄보다 3.0~3.7배 정도 컸다. 이것은 저농도에서도 음이온교환수지의 셀레늄 흡착성능이 높으므로 다단계 흡착공정에 사용될 수 있다.

3) 셀레늄 함유폐수의  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  용액으로 중화한 후, 음이온교환수지를 사용하여 연속적으로 2단계 흡착실험을 수행하면, 셀레늄 제거율은 97.7% 이고 최종 평형농도는 3.37 mg/L 이지만, 여전히 규제 예정농도 이상으로 방류하게 되므로 3단계 이상으로 연속적인 흡착공정을 수행해야 할 것으로 사료되었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2009년도 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) <http://www.ktf-split.hr/periodni/en/se.html>.
- 2) Mark J. H., 2001, Water and Wastewater Technology,

4th ed., Prentice Hall, 160pp, 483pp.

- 3) Koller L. D. and J. H. Exon, 1986, The two faces of selenium-deficiency and toxicity are similar in animals and man, *Can. J. Vet. Res.*, 50(3), 297-306.
- 4) [http://www.me.go.kr/kor/info/info\\_08\\_02\\_01.jsp?gubun=02](http://www.me.go.kr/kor/info/info_08_02_01.jsp?gubun=02).
- 5) Raisbeck M. F., E. R. Dahl, D. A. Sanchez, E. L. Belden and D. O'Toole, 1993, Naturally occurring selenosis in Wyoming, *J. Vet. Diagn. Invest.*, 5(1), 84-87.
- 6) George T. and D. S. Edward, 2002, Water Quality, Prentice Hall, 684pp.
- 7) 환경부, 2008, 먹는 물의 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙, 별표 1호.
- 8) Ishihara K., Y. Iwasaki, S. Ebihara, Y. Shindo and N. Nakabayashi, 2000, Photoinduced graft polymerization of 2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine on polyethylene membrane surface for obtaining blood cell adhesion resistance, *Colloids and Surface B: Biointerface*, 18, 325-335.
- 9) Eromosele I. C. and S. S. Bayero, 2000, Adsorption of chromium and zinc ions from aqueous solutions by cellulosic graft copolymers, *Bioresource Technology*, 71, 279-281.
- 10) Hegazy E. A., H. A. Abd El-Rehim, A. M. I. Ali, H. G. Nowier and H. F. Aly, 1999, Characterization and application of radiation grafted membranes in treatment of intermediate active waste, *NIM B*, 151, 393-398.
- 11) Lee H. S., I. B. Kim, J. H. Suh and T. K. Yoon, 2004, Effect of aluminum in two-metal biosorption by an algal biosorbent, *Minerals Engineering*, 17, 487-493.
- 12) 강혜정, 1997, 유독 음이온 중금속 제거를 위한 흡착제 개발, 석사학위논문, 환경과학과, 계명대학교, 대구.
- 13) Kim J. B., 2003, Studies on Removal of As and Se by the Surface Modified Adsorption, *Kor. Soc. of Water Sci. & Technol.*, 11(4), 33-41.
- 14) 박경은, 1999, 고도정수처리에 사용한 활성탄의 흡착성능과 경제성에 관한 연구, 석사학위논문, 건설환경공학부, 울산대학교, 울산.