

비틀대모자반, *Sargassum sagamianum*을 이용한 Pb 및 Cr 생체흡착 및 회수

서근학 · 안갑환* · 이학성** · 이희근 · 조진구 · 홍용기***
부경대학교 화학공학과, *지산대학 환경공학과, **울산대학교 화학공학과, ***부경대학교 생물공학과

Biosorption of Pb and Cr by using *Sargassum sagamianum*

Kuen-Hack SUH, Kab-Hwan AHN*, Hack-Sung LEE**, Hwae-Geon LEE, Jin-Koo CHO and Yong-Ki HONG***

Dept. of Chemical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

*Dept. of Environmental Engineering, Jisan College, Pusan 607-323, Korea

**Dept. of Chemical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

***Dept. of Biotechnology, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

Biosorption of Pb and Cr to *Sargassum sagamianum* was evaluated in the various conditions. An adsorption equilibrium was reached in about 15 min. for Pb and Cr. The uptake capacity was 224.5 mg Pb/g biomass and 77.5 mg Cr/g biomass, respectively. The adsorption parameters for Pb and Cr were determined according to Langmuir and Freundlich model. Biosorption of Pb and Cr was increased with an increase in pH value. Pb and Cr adsorbed by *S. sagamianum* could be recovered by desorption process with 0.1M HCl, 0.1M HNO₃ and 0.1M EDTA and the efficiency of Pb desorption was above 90%, whereas the efficiency of Cr desorption was below 51%.

Key words: biosorption, *Sargassum sagamianum*, heavy metal, selectivity

서 론

최근 산업기술의 발달에 따른 중금속의 사용량이 해마다 증가하고 있는데, 광산업, 염색공업 및 도금산업 등에서 다량 발생하는 중금속들이 폐수를 통해 수계로 배출되면 먹이 연쇄를 통해 생태계를 파괴하고 인체에 치명적인 영향을 미치는 등 이로 인한 환경오염이 날로 심각해지고 있다. 특히 도금산업이나 광산업, 염색공업 등 여러 분야에서 배출되는 중금속은 생태계를 파괴시키고 인체에 치명적인 영향을 미치므로 사회적인 문제가 되고 있다.

독성 중금속의 하나인 Pb는 고대로부터 인간과 매우 친숙한 금속이며 동시에 가공하기 쉽고 부식되지 않는 특성이 있어 오늘날에도 널리 이용되고 있다. 전 세계적으로 Pb 사용량의 과반수 이상이 자동차용 납축전지에 이용되고 있으며, 이중 절반정도는 회수되고 있으나 나머지는 회수되지 않고 있다(이와 정, 1993).

이렇게 배출된 Pb가 먹이 연쇄를 거쳐 체내에 흡입되면 90% 이상이 뼈에 축적되어 잘 유리되지 않으며, 발암물질의 작용을 촉진할 뿐 아니라 인체의 모든 부분에서 치명적인 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(이와 정, 1993).

또한 축매공업에 사용되고 있는 Cr은 화학적 안정성과 내열성, 내부식성, 전기저항성이 강하기 때문에 각종 금속의 도금 및 합금에 널리 사용되고 있는 금속이다. Cr에 중독되면 구토와 복통 등이 생기고 심하면 무뇨증과 요독증으로 수일 내에 사망하게 된다(이와 정, 1993).

따라서 중금속을 제거 또는 회수하는 공정들이 많이 연구, 개발되고 있는데, 최근에는 해조류나 미생물 등 생체물질의 표면이나 내부로 물리적, 화학적 및 생물학적 상호 작용에 의해 중금속을 흡착시켜 제거해 내는 생체흡착법이 많은 관심을 모으고 있다(Volesky, 1990; Suh et al, 1998).

생체흡착은 생체흡착제 표면에 존재하는 carboxyl, amino, phosphate, sulfate 및 hydroxyl 등의 작용기에 중금속이 흡착되는 현상(Kiefer et al., 1997)을 말하며, 생체물질 자체가 가지고 있는 Ca, Mg, K 및 Na 등의 금속들과 중금속간의 이온교환에 의해서도 중금속은 제거된다(Kuyucak and Volesky, 1989). 생체흡착법은 100 mg/L 이하의 저농도로 존재하는 중금속의 제거시에 매우 효과적이며, Na, Ca, Mg 및 K 등의 경금속 존재시에도 중금속만을 선택적으로 제거할 수 있고 넓은 범위의 pH에서도 사용할 수 있다. 생체흡착에 사용할 수 있는 생체흡착제로는 해조류, 박테리아 및 효모 등 여러 가지가 있다. 생체물질 중에서 특히 해조류는 종류가 다양하고 양이 풍부하여 구하기가 쉽고 가격이 저렴하며, 각종(species)들은 중금속의 흡착성능이나 선택성이 모두 달라 특정 중금속의 제거 또는 회수가 가능하여 생체흡착제로의 연구가 많이 이루어지고 있다(Volesky, 1990; 박광하등, 1996). 해조류는 Na, K, NH₄⁺, NH₄⁺-Ca 및 Na-Ca염 형태로 이루어져 있는 다당류인 alginate가 많은 부분을 차지하고 있는데(Bullock, 1965), alginate의 구성 성분인 uronic acid의 carboxyl group 사이에 금속 이온이 결합하여 3차원적인 망상구조의 gel을 형성하여 중금속을 흡착하기 때문에(King, 1982) 일반적으로 타 생체흡착제에 비해 중금속 흡착 성능이 우수한 특징이 있다. 또한 Na, Ca, Mg 및 K 등이 다량 존재하는 해수에서 자생하므로 중금속 흡착시 경금속들이 존재하여도 타 생체흡착제보다 훨씬 영향을 적게 받는다.

본 연구에서는 우리 나라 전역에 폭넓게 자생하고 있는 해조류인 *Sargassum sagamianum* (비틀대 모자반)을 이용하여 독성 중금속인 Pb 및 Cr의 생체 흡착 실험을 수행하였다. 흡착 시간 및 중금속 농도에 따른 흡착 평형을 조사하였고, 흡착에 미치는 pH의 영향 및 Pb, Cu, Cr, Cd 혼합 용액에서의 중금속 선택성을 검토하였다. 또한 Pb 및 Cr의 회수 가능성을 알아보기 위해 0.1M HCl,

HNO₃, EDTA를 탈착 용액으로 하여 Pb 및 Cr의 탈착 실험을 수행하여 *S. sagamianum*의 재생성을 검토하였다.

재료 및 방법

1. 생체흡착제 및 금속 시약

본 연구에 사용한 생체흡착제는 해조류 중에서도 갈조류에 속하는 *Sargassum sagamianum* (비틀대모자반)로서 일본과 우리나라 전역에 폭넓게 자생하고 있는 종이다. *S. sagamianum*은 수개월이 반상근에서 직립하고 줄기는 원주상이고 짧으며, 중심가지는 가늘고 나선상으로 비틀어져 있고 높이는 약 30cm정도이다 (강제원, 1970). 실험에 사용할 때는 건조 후에 분쇄하여 표준체로 0.355 mm이하의 크기만을 사용하였다.

본 연구에 사용한 중금속 시약들은 모두 특급시약으로 Pb(NO₃)₂, Cr(NO₃)₃·9H₂O, Cu(NO₃)₂·3H₂O 및 Cd(NO₃)₂·4H₂O를 사용하였으며, 실험시 탈이온수에 녹여 필요한 농도로 제조하였다. 중금속의 농도 분석에는 원자흡수 분광광도계 (Shimadzu AA-670)를 사용하였고, 중금속 농도를 분석하기 위한 검량선 작성시에는 표준용액 (1000 mg/L)을 사용하였다.

2. 실험 방법

*S. sagamianum*를 이용한 Pb 및 Cr 흡착시 흡착에 필요한 시간을 결정하기 위해 초기 중금속 농도 1000 mg/L 인 Pb 및 Cr 용액 100 mL와 *S. sagamianum* 0.1 g을 300 mL 삼각 플라스크에 넣고 shaking incubator에서 30°C, 150 rpm으로 교반시키면서 일정 시간마다 1 mL의 시료를 채취하였다. 채취한 시료는 10000 rpm에서 10분간 원심분리하여 상등액을 적절히 희석한 후 원자흡수 분광계로 그 농도를 측정하였다. 중금속 농도 변화에 따른 흡착량, pH 영향 및 혼합 중금속 용액에서의 선택성 등의 실험은 상기 실험 방법과 동일하게 수행하였으며, pH 조절에는 0.1 M HCl과 0.1 M NaOH를 사용하였다. 중금속의 흡착량은

$$q = \frac{V(C_i - C_f)}{M}$$

를 이용하여 나타내었으며, 여기서 q는 중금속의 흡착량 (mg/g biomass), V는 용액의 부피 (L), C_i와 C_f는 각각 초기와 최종 중금속 농도 (mg/L), M은 해조류의 건조 무게 (g biomass)이다.

*S. sagamianum*에 흡착된 Pb 및 Cr의 탈착을 통한 회수 가능성과 *S. sagamianum*의 재생성을 알아보기 위해 0.1 M HCl, 0.1 M HNO₃ 및 0.1 M EDTA를 이용한 탈착 실험을 수행하였다. 1000 mg/L Pb 용액에 *S. sagamianum*를 1 g/L가 되도록 하여 50 mL 원심분리관에 넣고 30°C에서 1시간 동안 흡착시킨 후 10000 rpm에서 10분간 원심분리하여 흡착제와 Pb 및 Cr 용액을 완전히 분리하였다. 상등액 농도를 분석하여 중금속 흡착량을 결정하였고, 중금속 용액으로부터 분리된 흡착제는 여러 종류의 탈착 용액으로 30분간 shaking incubator에서 30°C, 150 rpm에서 탈착시켜 각 용액에 따른 탈착율을 비교하여 *S. sagamianum*의 재생성을 확인하고 가장 효과적인 탈착 용액도 선별하였다.

결과 및 고찰

1. Pb 및 Cr 흡착 평형

*S. sagamianum*가 Pb 및 Cr을 흡착함에 있어 평형에 도달하기 까지 걸리는 시간을 알아보기 위해 초기 중금속 농도 1000 mg/L에서 흡착을 시키고 시간에 따른 농도 변화를 측정하여 결과를 Fig. 1에 도시하였다. Pb 및 Cr의 경우 15분 안에 흡착 평형에 도달하였으며, 이 때의 중금속 흡착량을 보면 Pb가 221.8 mg/g biomass이고 Cr은 65.1 mg/g biomass로서 Pb가 Cr보다는 약 3.4배 정도 많이 흡착됨을 알 수 있었다. 상기 결과를 통해 이후의 실험에서는 흡착 시간을 1시간으로 하여 중금속 흡착실험을 수행하였다.

중금속 농도 변화에 따른 *S. sagamianum*의 흡착량을 알아보기 위해 초기 중금속 농도를 200~2000 mg/L까지 변화시키면서 흡착 실험을 수행하였는데, Fig. 2에서 보듯이 Pb는 평형농도가 1500 mg/L 이상의 고농도에서 흡착 평형에 도달하여 224.5 mg/g biomass을 흡착하였고, Cr은 평형농도가 약 500 mg/L 이상에서 77.5 mg/g biomass을 흡착하는 것으로 나타났다. *S. sagamianum*의 Pb흡착능력은 미생물 생체흡착제로 많이 사용되고 있는 *S. cerevisiae*보다는 4배, *Zoogloea sp.*보다 약 1.5배 더 우수한 것으로 조사되었다 (Ahn and Suh, 1998).

본연구에서는 여러 가지 흡착모델중에서 Langmuir 및 Freundlich 모델을 흡착실험 자료에 적용하였다. 흡착제 표면이 균일한 경우에 적합하고 단분자층으로 흡착이 이루어진다는 이론인 Langmuir 모델은

$$q = \frac{q_{\max} b C_{eq}}{1 + b C_{eq}}$$

으로 표현되며, 여기서 q는 중금속 흡착량 (mg/g biomass), q_{max}는 최대 중금속 흡착량 (mg/g biomass), b는 흡착 에너지에 관계되는 상수, C_{eq}는 중금속 용액의 평형 농도 (mg/L)이다. Freundlich 모델은 흡착제 표면이 불균일하고 흡착이 다분자층으로 이루어

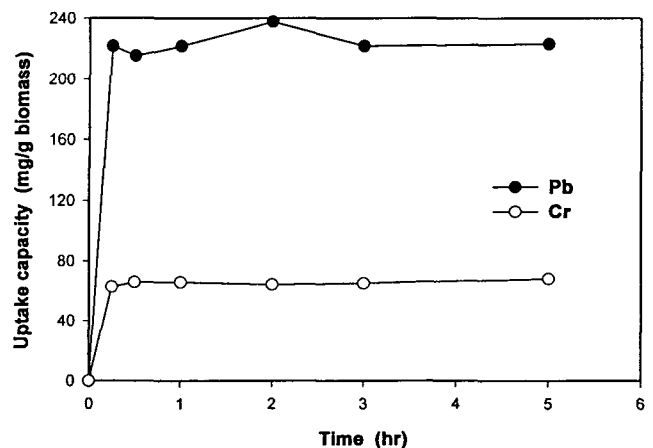


Fig. 1. Time course of uptake capacity of Pb and Cr by *S. sagamianum* (initial metal conc. : 1000 mg/L).

지는 경우 잘 적용되는 것으로

$$q = kC_{eq}^{\frac{1}{n}}$$

으로 표현되며, 여기서 q 는 중금속 흡착량 (mg/g biomass), k 는 흡착 능력의 정도를 나타내는 상수, $\frac{1}{n}$ 은 흡착의 세기를 나타내는 상수, C_{eq} 는 중금속 용액의 평형 농도 (mg/L)이다. Table 1에 Langmuir 모델을 실험자료에 적용하여 이론적 최대흡착량 q_{max} ,와 상수 b 를 계산하여 나타내고, Table 2에 Freundlich 모델을 실험자료에 적용하여 흡착용량 k 와 흡착세기 $\frac{1}{n}$ 을 계산하여 나타내었다. Table 1에서 Pb의 이론적 최대흡착량 q_{max} 는 270.3 mg/g biomass로 Cr의 이론적 최대흡착량 98.0 mg/g biomass보다 약 2.8 배 높게 나타났으며, 실제 실험치보다는 약간 높게 나타났다. Table 2에서 흡착용량 k 를 보면 Pb가 Cr에 비하여 약간 낮으나 흡착세기 $\frac{1}{n}$ 은 약 1.6배 정도 높게 나타났다.

Table 1과 Table 2에서 보듯이 Pb의 경우 두 흡착 모델에 대해 상관계수, r^2 의 값이 0.99 및 0.97로 매우 높아 적용이 잘 되었으나, Cr의 경우 두 흡착 모델에 대해 상관계수, r^2 의 값은 0.83 및 0.64로서 Langmuir 모델이나 Freundlich 모델로 흡착 특성을 설명하기에는 곤란하였다.

Table 1과 Table 2의 상수를 사용하여 계산한 계산치와 실험치로부터 구한 실험치를 비교하여 Fig.2에 도시하였다. Fig. 2와 Table 1과 2의 상관계수에서 *S. sagamianum*에 대한 중금속흡착은 Freundlich 모델보다 Langmuir 모델이 실험치에 대하여 더 잘

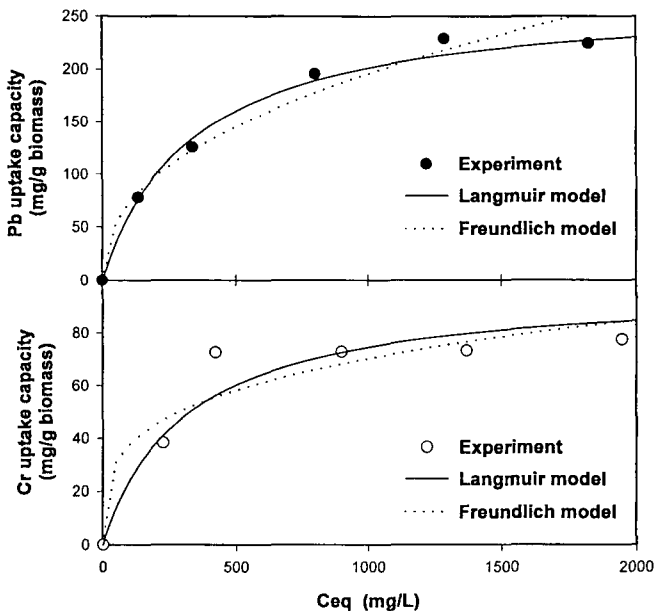


Fig. 2. Langmuir and Freundlich model fitting of Pb and Cr uptake capacity by *S. sagamianum*.

Table 1. Langmuir model parameters on uptake capacity of Pb and Cr by *S. sagamianum*

| Heavy metals | Q_{max} | b | r^2 |
|--------------|-----------|---------|-------|
| Pb | 270.3 | 0.00297 | 0.99 |
| Cr | 98.0 | 0.00318 | 0.83 |

부합됨을 일수 있었다.

2. pH 영향

중금속 용액의 pH가 변하면 중금속 생체 흡착시 용존되어 있는 수소 이온과 수산화 이온의 영향으로 흡착량에 변화가 생긴다. 따라서 본 연구에서도 *S. sagamianum*의 중금속 흡착시 pH에 따른 흡착량 변화를 알아보기 위해 1000 mg/L의 Pb 및 Cr 용액을 0.1 M HCl과 0.1M NaOH로 pH를 2~5까지 변화시켜 흡착실험을 수행하여 Fig. 3에 도시하였다. 본 실험에서 pH 5 이상에서는 Pb가 흰색의 수산화물 침전이 형성되어 그 이상의 pH에서는 침전에 의한 중금속 제거와 생체 흡착에 의한 중금속 제거를 구별할 수 없기 때문에 실험을 수행하지 않았다. Fig. 3에서 Pb의 경우 pH가 증가할수록 흡착량이 증대하여 pH가 4~5에서 최대흡착량을 나타내었고, pH가 2.2에서는 흡착량이 최대흡착량의 20%로 감소하였으나, Cr의 경우 pH 2~5구간에서 pH의 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 두 중금속 모두 pH가 낮아질수록 흡착량이 감소하였고 pH 4이상에서 최대 흡착량을 나타내었으나, Pb가 pH의 영향을 훨씬 많이 받는 것으로 나타났다. pH가 낮을 때는 과량으로 존재하는 수소이온들과 중금속 이온들이 경쟁 흡착관계에 있고, 또한 강산의 조건에서 *S. sagamianum*에 있는 수산화기나 카르복시기 등의 중금속이 흡착할 수 있는 작용기들이 많이 파괴가 되기 때문에 흡착량이 감소하게 된다 (Fourest and Roux, 1992). Cr의 경우에는 *S. sagamianum*와의 결합력이 매우 강하기 때문에 강산의 조건에서도 Pb보다 영향을 작게 받아 흡착이 계속 이루어지는 것으로 사료되었다.

3. 선택적 중금속 흡착

실제 산업 현장에서 배출되는 폐수 속에는 여러 가지 중금속

Table 2. Freundlich model parameters on uptake capacity of Pb and Cr by *S. sagamianum*

| Heavy metals | k | $1/n$ | r^2 |
|--------------|-------|--------|-------|
| Pb | 9.98 | 0.4306 | 0.97 |
| Cr | 10.74 | 0.2719 | 0.64 |

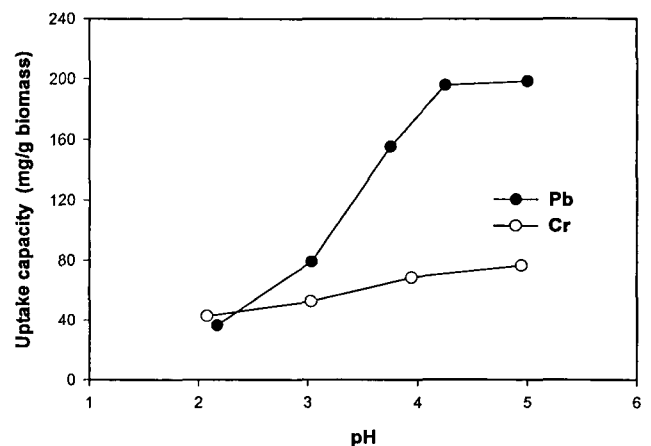


Fig. 3. Effect of pH on uptake capacity of Pb and Cr by *S. sagamianum*.

들이 공존하기 때문에 단일 중금속 용액이 아닌 혼합 중금속 용액에서 흡착 실험을 수행하여 *S. sagamianum*의 중금속 선택성을 조사할 필요가 있다. Fig. 4는 Pb, Cr, Cu 및 Cd가 500 mg/L 씩 들어있는 혼합 용액에서 *S. sagamianum*의 흡착 실험을 수행한 결과이다. 그림에서 보듯이 *S. sagamianum*는 Pb>Cu>Cr>Cd 순으로 흡착되어, 혼합용액에서 Pb에 대한 선택성이 매우 높은 것으로 나타났으나 그 흡착량이 단일 용액으로 존재할때보다 많이 감소하였으며, Cd는 전혀 흡착되지 않는 것으로 나타났다. 혼합용액에서 Pb의 흡착량은 111.3 mg/g biomass이고 Cr의 흡착량은 25.9 mg/g biomass 로서 단일 용액으로 존재할때보다 많이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 이들 중금속들의 전체 흡착량을 합해보면 195.5 mg/g biomass로 단일용액에서의 Pb 흡착량과 비슷하다는 것을 알 수 있었다

Fig. 5는 Pb 및 Cr 혼합 용액에서 *S. sagamianum*의 선택성을 명확하게 판단하기 위해 Pb 및 Cr 이온 (mol) 수를 일정하게 하여 실험한 결과인데, Pb의 초기 농도를 2.4 mM로 일정하게 하고 Cr의 농도를 변화시킨 경우 (a)와 Cr의 초기 농도를 2.2 mM로 일정하게 하고 Pb의 농도를 변화시킨 경우 (b)를 도시하였다. 초기 중금속 부하량이 다른 상기 혼합 용액에서의 실험 결과와는 다르게 Pb와 Cr 혼합 용액에서 두 금속의 몰농도가 비슷할 때는 두 중금속의 흡착량 또한 비슷하여 *S. sagamianum*에 흡착되는 Pb와 Cr의 수가 거의 같은 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 5 (a)에서와 같이 Pb가 2.4 mM의 고농도로 존재할 때 Cr의 농도를 증가시켰을 경우 Cr의 흡착량이 서서히 증가하여 Cr이 저농도로 존재할때 Pb의 흡착량이 훨씬 많았고, Fig. 6 (b)에서 Cr이 2.2 mM로 존재할 때 Pb의 농도를 증가시키면 저농도의 Pb만 존재하여도 Pb의 흡착량은 전체 흡착량의 반 정도까지 흡착되어, Cr보다는 Pb에 대한 선택성이 높은 것으로 사료되었다.

4. Pb 및 Cr 회수

생체 흡착에 사용하는 생체흡착제는 환경적 측면에서 2차적

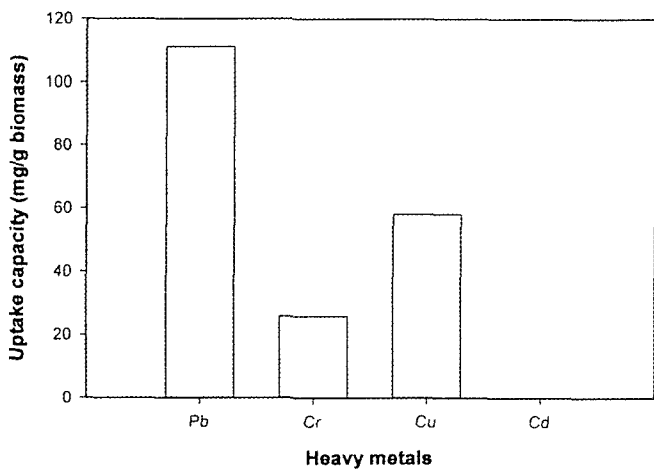


Fig. 4. Selective uptake capacity of heavy metals by *S. sagamianum*.

오염을 유발시키지 않기 위해 흡착 후 탈착을 통한 중금속 회수가 이루어져야 하고, 경제적 측면에서 재흡착이 이루어져 흡착제 재생이 가능하여야 한다. 이를 검토하기 위해 본 연구에서는 Pb 및 Cr가 흡착된 *S. sagamianum*를 3종류의 탈착 용액으로 Pb 회수 실험을 수행하여 *S. sagamianum*의 재생 정도를 확인하였다. 먼저 Pb 및 Cr이 흡착된 *S. sagamianum*의 회수율을 알아보기 위하여 1000 mg/L Pb 및 Cr용액으로 흡착시킨 *S. sagamianum*에 0.1 M HCl, 0.1 M HNO₃ 및 0.1 M EDTA를 이용하여 탈착 실험을 수행한 결과를 Fig.6에 도시하였다.

Fig. 6에서 흡착된 Pb는 160 ± 20 mg/g biomass 정도였다. *S. sagamianum*의 Pb 탈착율은 EDTA를 이용하였을 때 100%였고, HCl 및 HNO₃의 산으로 탈착시켰을 때는 97% 및 95%로 높은 탈착율을 나타내었다. EDTA를 이용한 탈착에서는 EDTA가 강한 착물을 형성하기 때문에 흡착되어 있는 Pb와 착물을 형성하여 *S. sagamianum*으로부터 탈착시키는 것으로 사료되었으며 (Guibal et al., 1992), HCl 및 HNO₃ 등의 산으로 탈착을 시켰을 때 탈착율이 높은 것은 수소 양이온의 농도가 높아져 cell 표면의 수산화기, 카르복시기 및 인산기 등의 작용기에 흡착되어 있는 Pb 이온을 떼어내기 때문인 것으로 사료되었다.

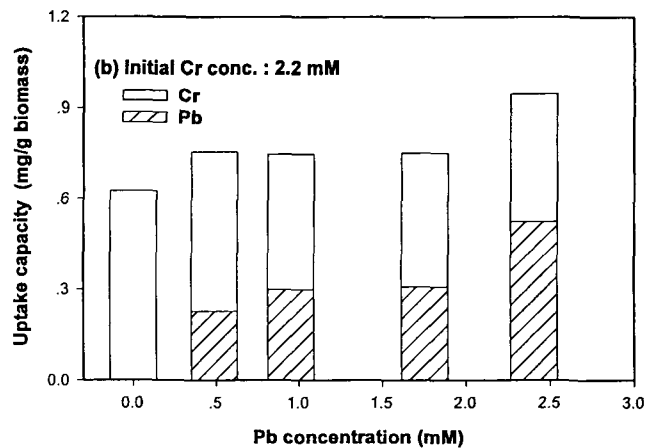
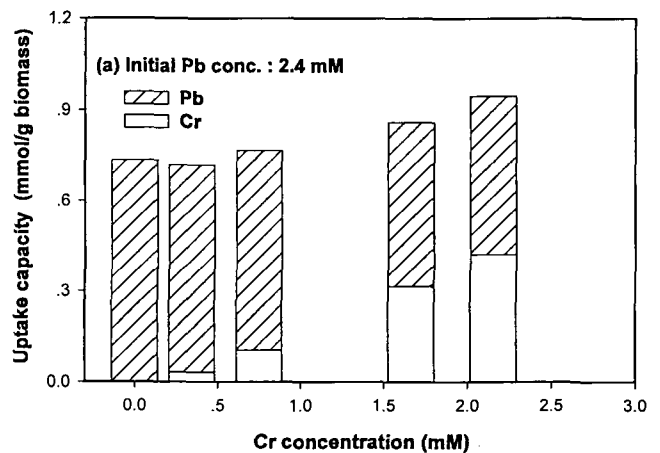


Fig. 5. (a) and (b). Selective uptake capacity of Pb and Cr by *S. sagamianum*.

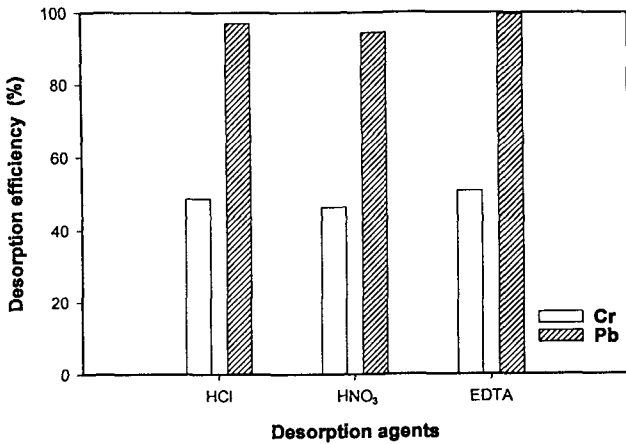


Fig. 6. Desorption efficiency of Pb and Cr by *S. sagamianum*.

Fig.6에서 흡착된 Cr는 74 ± 45 mg/g biomass 정도 였다. *S.sagamianum*의 Cr 탈착율은 EDTA를 이용하였을 때 51%였고, HCl 및 HNO₃의 산으로 탈착시켜올때는 49% 및 47%로 Pb에 비하여 상대적으로 낮은 탈착율을 나타내었다. 이러한 현상은 Cr의 경우에는 *S. sagamianum*와의 결합력이 매우 강하기 때문에 강산의 조건에서도 Pb보다 영향을 적게 받아 탈착율이 적은 것으로 사료되었는데, 이러한 현상은 pH 영향실험에서 Cr의 경우 *S. sagamianum*와의 결합력이 강하여 흡착량에 대한 pH 영향을 Pb에 비하여 적게 받는 것과 일치하였다.

요 약

우리 나라 인근 해역에서 가장 쉽게 채취할 수 있는 해조류 중의 하나인 *S. sagamianum*을 이용한 Pb 및 Cr의 생체흡착 실험을 수행하였다. Pb 및 Cr은 15분 안에 흡착 평형에 도달하였으며, 평형흡착량은 각각 224.5 mg Pb/g biomass 및 77.5 mg Cr/g biomass로서 Pb의 흡착량이 Cr보다 약 3배정도 높았다. 또한 pH가 감소할수록 Pb 및 Cr의 흡착량은 감소하였으나 Pb가 상대적으로 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. Pb, Cr, Cu 및 Cd 혼합용액에서는 Pb>Cu>Cr>Cd 순으로 흡착하였으며, Pb 및 Cr 이온이 동량 존재하는 용액에서의 흡착은 거의 1:1로 흡착이 이루어졌다. Pb 및 Cr 흡착 후에 0.1 M HCl, 0.1 M HNO₃ 및 0.1 M EDTA으로 탈착 실험을 수행하니, Pb는 의 경우에는 95%이상 탈착되었으나 Cr의 경우 *S. sagamianum*와의 결합력이 상대적으로 강하여 탈착율이 51%이하로 낮았다.

감사의 글

이 논문은 1998년 학술진흥재단의 학술연구비 (수산과학연구 조성비)에 의하여 수행된 결과의 일부분임을 밝히며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Ahn, K.H and K.H. Suh. 1998. Removal of Lead by *Arthrobacter* sp., J. Korean Environ. Sci. Soc., 7, 57~61 (in Korean).
 Bullock, A., L. 1965. DEAE Cellulose, Methods in Carbohydrate Chemistry, R.H. Whistler ed., p.409~411. Academic Press, New York.
 Fourest, E. and J.C. Roux. 1992. Heavy metal biosorption by fungal mycelial by-products: mechanism and influence of pH, Appl. Microbiol. Biotechnol., 37, 399~403.
 Guibal, E., C. Roulph, and P.L. Cloirec. 1992. Uranium Biosorption by a Filamentous Fungus *Mucor Miehei* pH Effect on Mechanisms and Performances of Uptake, Wat. Res. 26, 1139~1145.
 Kiefer, E., L. Sigg and P. Schosseler. 1997. Chemical and Spectroscopic Characterization of Algae Surfaces, Environmental Science & Technology, 31, 3, 759~764.
 King, A.H. 1982. Brown seaweed extracts (alginate), Food Hydrocolloids, 2, M. Glichsman ed., CRC press, New York, 115~188.
 Kuyucak, N. and B. Volesky. 1989. The mechanism of Cobalt Biosorption, Biotechnology and Bioengineering, 33, 823~831.
 Suh, K.H., K.H. Ahn, M.C., Cho, B.J. Kim, H.J. Jin and Y.K. Hong. 1998. Biosorption of Pb and Cu by Marine Algae. Korean J. Biotechnol. Bioeng., 13, 444~448 (in Korean).
 You, B.J., Y.S. Im and I. H. Jeong. 1998. Effect of Extracting Conditions on the Viscosity and Binding Capacity of Metal Ion of Alginate from Sea Tangle, Laminaria spp., J. Korean Fish. Soc., 31, 2, 267~271 (in Korean).
 Volesky, B. 1990. Biosorption of Heavy metals, CRC Press.
 강제원. 1970. 한국 동식물 도감 제 7권-식물편 (해조류), 문교부, 삼화출판사, 서울.
 박광하, 전방욱, 김한수, 김영하. 1996. 해조류를 이용한 Cu 및 Zn이온의 흡착 및 회수, Analytical Science & Technology, 9 (4), 373~381.
 이영환, 정문호. 1993. 금속과 사람, 신광출판사 (한국 학술진흥재단 번역총서 167).

1999년 2월 22일 접수
 1999년 6월 19일 수리