J. Korean Fish. Soc. 34(1), 1~6 한수지, 34(1), 1~6, 2001

알송이 모자반, *Sargassum confusum*을 이용한 Pb 및 Cr의 생물학적 흡착 및 탈착

서근학 · 안갑환* · 조문철 · 조진구 · 진형주** · 홍용기**
부경대학교 화학공학과, *부산가톨릭대학교 산업환경시스템학부
**부경대학교 생물공학과

Sargassum confusum for Biosorption of Pb and Cr

Kuen-Hack SUH, Kab-Hwan AHN*, Moon-Chul CHO, Jin-Koo CHO, Hyung-Joo JIN and Yong-Ki HONG****
Dept. of Chem. Eng., Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea
**School of Industrial Hygine & Environmental System 609-757, Korea*
***Dept. of Biotechnology, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea*

Biosorption of Pb and Cr by *Sargassum confusum* was evaluatet at in the various conditions. The uptake capacities for Pb and Cr were 197.5 mg Pb/g biomass and 133.1 mg Cr/g biomass, respectively. The adsorption parameters for Pb and Cr were determined according to the Langmuir and Freundlich model. Biosorption of Pb and Cr was increased with the increase of pH value. Pb and Cr adsorbed by *S. confusum* could be recovered by desorption process with 0.1 M HCl, 0.1 M HNO_3 and 0.1 M EDTA. The ratio of Pb desorption was above 93%, whereas the ratio of Cr desorption was below 30%.

Key words: Biosorption, Desorption, *Sargassum confusum*

서 론

각종 산업 발달에 따라 중금속 물질이 다양해져 환경의 오염은 날로 심각해져 가고 있다. 특히 도금산업이나 광산업, 염색공업 및 금속 광산에서 대량 발생하는 광재의 비산 유실과 금속 제련소에서 발생하는 중금속 분진 등은 대기 오염 및 수질 오염의 원인이 되고 있다. 이런 유해 중금속들이 적절히 처리되지 않은 상태에서 수계에 배출될 경우 먹이 연쇄를 통해 생태계에 피해를 입히고 인간에게도 치명적인 영향을 미친다. 체내에 들어간 중금속들은 체내의 신경계와 순환계 및 골격 조직에 큰 피해를 주는 치명적인 물질이다.

폐수 내에 존재하는 독성 중금속의 제거에는 침전법, 이온 교환 처리법, 증발법 및 막분리법 등 여러 기술들이 개발되어 현재 사용되고 있으나, 이들 공정들은 전처리가 필요하고 2차적인 오염문제가 발생하며 (Thomas and Drew, 1989), Na, Ca 및 Mg 등의 경금속 존재시 선택적인 중금속 제거를 할 수 없을 뿐 아니라 중금속이 저농도로 존재할 경우 효율이 감소하는 등의 단점을 가지고 있다. 최근 이를 해결할 수 있고 다른 공정에 비해 경제적으로도 유리한 방법인 생물학적 흡착법 (biosorption)이 관심을 모으고 있다. 생물학적 흡착법은 생물학적 흡착제 표면의 음전하로 인하여 중금속에 대한 높은 흡착 능력을 보유하고 있고, 중금속의 선택적인 제거가 가능하며, 저농도의 중금속 존재시 높은 효율을 나타낸다. 또한 pH에 대한 사용범위가 넓고, 2차 오염을 발생시키지 않으며 생물학적 흡착제의 활성에 관계없이 다양한 형태의 흡착 공정에 적용 가능한 장점이 있다 (Ehrlich and Brierley, 1990).

생물학적 흡착에 사용할 수 있는 생물학적 흡착제로는 해조류, yeast 및 bacteria 등이 있다 (Volesky, 1990). 이 중에서도 해조류는 Na, K, Ca 및 Mg 등의 경금속이 다량 존재하는 해수 속에서 자생하므로 폐수 속에 이들 경금속들의 존재시 중금속만을 선택적으로 제거 가능하고 (King, 1982), 별도의 배양 과정이 필요 없고 크기가 대형이므로 취급이 용이하다 (Volesky, 1990). 또한 종류가 다양하고 양이 풍부하여 구하기가 쉽고 가격이 저렴한 특징이 있어 최근에 이를 이용한 중금속 제거에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Aksu et al., 1998; Yang and Volesky, 1999; Lee, 1999).

본 연구에서는 우리 나라 전역에 폭넓게 자생하고 있는 해조류인 *Sargassum confusum* (알송이 모자반)을 이용하여 독성 중금속인 Pb 및 Cr의 생물학적 흡착 실험을 수행하였다. 흡착 시간 및 중금속 농도에 따른 흡착 평형을 조사하였고, *S. confusum*의 중금속 흡착시 pH의 영향과 혼합 용액에서의 중금속 선택성 및 Pb 흡착시 Ca 및 Mg 경금속 영향을 검토하였다. 또한 흡착된 Pb의 회수 가능성과 *S. confusum*의 재생성을 알아보기 위해 HCl, HNO_3, EDTA 및 NaOH를 탈착 용액을 이용한 Pb 탈착 실험 및 흡착과 탈착의 반복 실험을 수행하여 *S. confusum*의 흡착과 탈착에 대한 재생성을 검토하였다.

실험 재료 및 방법

생체흡착제 및 금속 시약

본 연구에 사용한 생체흡착제는 해조류 중에서도 갈조류에 속하는 *Sargassum confusum* (길이: 60 cm~2 m, 잎: 타원형 또는 주걱 모양)이며, 중국 연안 및 우리 나라 전역에 폭넓게 분포하는 종이다 (강, 1970). 실험에 사용할 때는 해조류를 증류수로 세척후 건조 후에 분쇄하여 표준체로 0.355 mm 이하의 크기만을 사용하였다.

본 연구에 사용한 중금속 시약들은 모두 특급시약으로 $Pb(NO_3)_2$,

$Cr(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$, $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, $CaCl_2$ 및 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$를 사용하였으며, 실험시 탈이온수에 녹여 필요한 농도로 제조하였다. 중금속의 농도 분석에는 원자흡수 분광계 (Shimadzu AA-670)를 사용하였고, 중금속 농도를 분석하기 위한 검량선 작성시에는 표준용액 (1,000 mg/L)을 사용하였다.

실험 방법

*S. confusum*을 이용한 Pb 및 Cr 흡착시 흡착에 필요한 시간을 결정하기 위해 초기 중금속 농도, 1,000 mg/L 인 Pb 및 Cr 용액 100 mL와 *S. confusum* 0.1 g을 300 mL 삼각 플라스크에 넣고 30℃, 150 rpm으로 교반시키면서 일정 시간마다 1 mL의 시료를 채취하였다. 채취한 시료는 10,000 rpm에서 10분간 원심분리하여 상등액을 적절히 희석한 후 원자흡수 분광계로 그 농도를 측정하였다. 중금속 농도 변화에 따른 흡착량, pH 영향, 흡착제 크기 영향 및 혼합 중금속 용액에서의 선택성 등의 실험은 상기 실험 방법과 동일하게 수행하였으며, pH 조절에는 0.1 M HCl과 0.1 M NaOH를 사용하였다.

*S. confusum*에 흡착된 Pb의 탈착을 통한 회수 가능성과 *S. confusum*의 재생성을 알아보기 위해 0.1 M HCl, 0.1 M HNO_3, 0.1 M EDTA 및 0.1 M NaOH를 이용한 탈착 실험을 수행하였다. 1,000 mg/L Pb 용액에 *S. confusum*을 1 g/L가 되도록 하여 50 mL 원심분리관에 넣고 30℃에서 1시간 동안 흡착시킨 후 10,000 rpm에서 10분간 원심분리하여 흡착제와 Pb 용액을 완전히 분리하였다. 상등액 농도를 분석하여 중금속 흡착량을 결정하였고, 중금속 용액으로부터 분리된 흡착제는 여러 종류의 탈착 용액으로 30℃, 150 rpm에서 30분간 탈착시켜 각 용액에 따른 탈착율을 비교하였다. 상기 과정을 6회 반복 수행하여 *S. confusum*의 재생성 및 전체 흡착량을 확인하고 가장 효과적인 탈착 용액도 선별하였다.

중금속의 흡착량은 $q=\frac{V(C_i-C_f)}{M}$를 이용하여 나타내었다. 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.

결과 및 고찰

Pb 및 Cr 흡착 평형

*S. confusum*을 이용하여 초기 중금속 농도 1,000 mg/L에서 흡착시간에 따른 중금속 흡착량의 변화를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 보듯이 Pb 및 Cr 모두 흡착 평형에는 15분내에 도달하였으며, 이후의 흡착 실험에서는 실험의 재현성을 위해 흡착 시간을 1시간으로 하여 실험을 수행하였다. 중금속 농도 변화에 따른 *S. confusum*의 흡착량을 알아보기 위해 초기 중금속 농도를 200~2,000 mg/L까지 변화시키면서 흡착실험을 수행하였는데, Fig. 2에서 보듯이 Pb 및 Cr의 평형농도가 1,300 mg/L 이상의 고농도에서 흡착 평형에 도달하여 Pb의 평형 흡착량은 197.5 mg Pb/g biomass 및 Cr의 평형 흡착량은 136.0 mg Cr/g biomass를 흡착하여, Pb의 흡착량이 Cr보다는 약 1.5배 정도 높았으나, *S. confusum*의

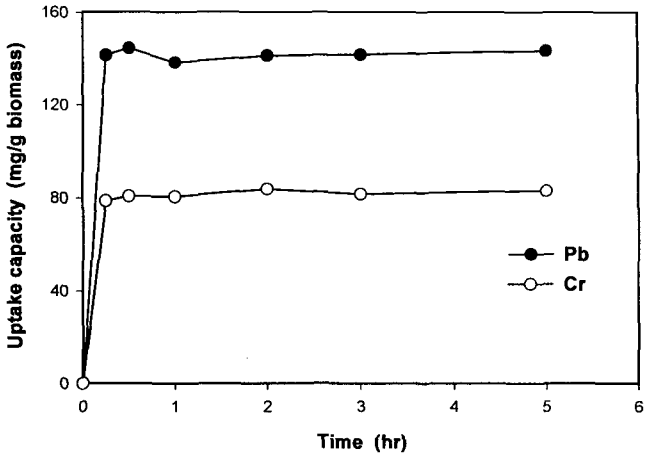

Fig. 1. Time course of uptake capacity of Pb and Cr by *S. confusum* (initial metal conc.: 1,000 mg/L).

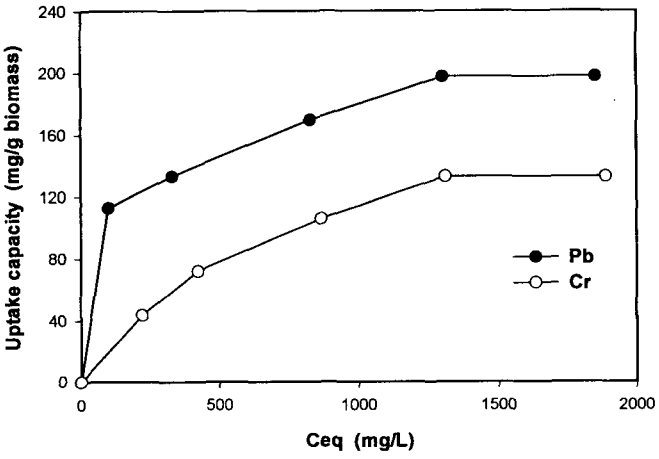

Fig. 2. Biosorption isotherm of Pb and Cr by *S. confusum*.

경우 Cr의 평형 흡착량은 다른 *Sargassum*종인 *S. sagamianum* 및 *S. honeri*에 비하여 1.8~1.3배 정도 높아, *Sargassum*종에서 가장 Cr의 평형 흡착량이 높았다 (Suh et al., 1999a).

*S. confusum*에 Pb 및 Cr을 흡착시켜 흡착 평형에 도달하면 흡착제 단위 무게당 흡착량은 잔류 중금속이온의 평형농도 함수로서 Freundlich 또는 Langmuir 흡착등온식을 따르는 것이 보통이다 (Volesky, 1990).

Langmuir 흡착등온식은 단분자 흡착을 전제하여 얻어진 식으로 $q=\frac{bQ_{max}C_{eq}}{1+bC_{eq}}$로 나타낸다. 여기서 q는 흡착용량 (mg/g biomass), b는 흡착으로 인한 자유도 감소와 에너지 상태의 차이를 반영하는 평형상수, Q_{max}는 최대 흡착량 (mg/g biomass), C_{eq}는 용액의 평형농도 (mg/L)이다. 이 식을 Hanes-Woolf 도표로 선형화시켜 보면 아래식과 같다.

$$\frac{C_{eq}}{q}=\frac{1}{Q_{max}}C_{eq}+\frac{1}{bQ_{max}} \quad (1)$$

Freundlich 흡착등온식은 실험식으로 다음과 같이 표현된다.

$$q = K \cdot C_{eq}^{1/n} \quad (2)$$

여기서 q는 흡착제 무게당 흡착된 중금속 이온의 질량 (mg/g biomass), C_{eq}는 잔류 중금속 이온의 평형농도 (mg/L), K와 1/n은 Freundlich 상수로서 흡착제의 특성에 따라 결정되는 매개 변수이다. 매개 변수를 구하기 위하여 상기식을 선형화시키면 아래와 같이 선형화 할 수 있다.

$$ln\ q = (1/n) ln\ C_{eq} + ln\ K \quad (3)$$

상기 연구의 결과를 Langmuir 및 Freundlich 모델에 적용하여 Fig. 3과 4에 나타내었다. Fig. 3과 4에서와 같이 Langmuir 흡착등온식과 Freundlich 흡착등온식은 둘다 비슷한 직선관계가 얻어졌다. 상기 실험 결과를 Langmuir 모델과 Freundlich 모델에 적용시켜 구한 상수값을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다.

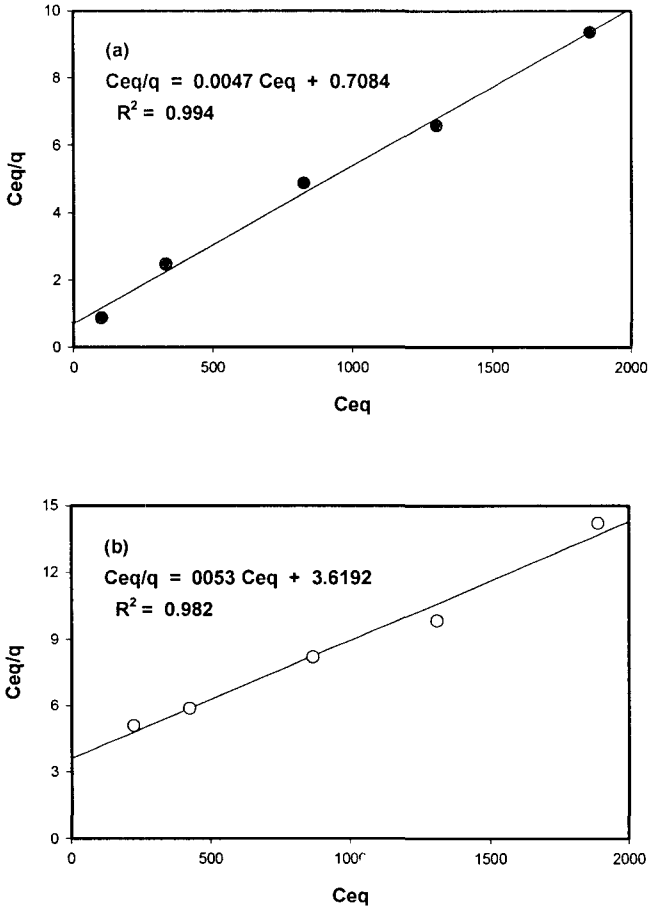

Fig. 3. Langmuir model fittings of Pb(a) and Cr(b) by *S. confusum*.

Table 1과 Table 2에서와 같이 Pb 및 Cr 흡착시 Langmuir 모델에 의한 상관계수, r^2의 값이 0.99 및 0.98로서, Freundlich 모델에 대한 상관 계수, r^2의 값인 0.97 및 0.96보다 약간 높아, 생물학적 흡착은 Langmuir 모델에 적용이 잘 되는 것을 알 수 있었다. Langmuir 모델에서 Q_{max}를 보면 Pb는 213.5 mg/g biomass로서 실험치 197.5 mg/g biomass와 큰 차이를 나타나지 않았으나, Cr은 187.7 mg/g biomass으로 실험치 133.1 mg/g biomass 보다 높게 나타났다. Table 2에서 흡착용량 K를 보면 Pb가 Cr에 비해 약 16.6배 높았으나 흡착강도 1/n은 2.6배 정도 낮게 나타났다. Table 1과 Table 2의 상관계수의 결과에서 Langmuir 모델에 실험치가 더 잘 부합됨을 알 수 있었다. 이는 *S. confusum*의 표면에 흡착되는 중금속이 단분자층으로

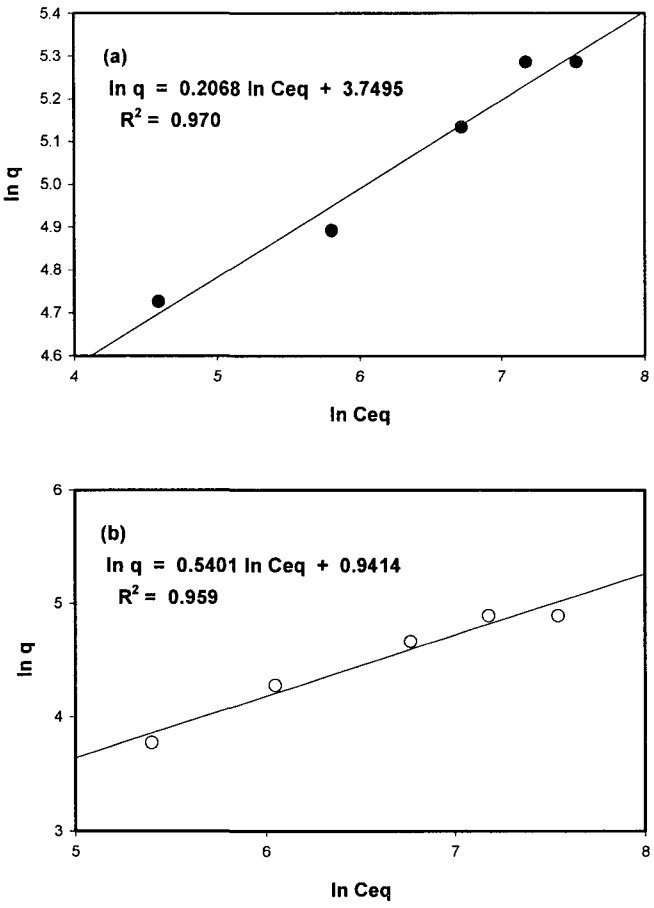

Fig. 4. Freundlich model fittings of Pb(a) and Cr(b) by *S. confusum*.

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

Heavy metal	Q_{max}	b	r^2
Pb	213.5	0.00661	0.994
Cr	187.7	0.00147	0.982

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

Heavy metal	K	1/n	r^2
Pb	42.50	0.2068	0.970
Cr	2.56	0.5400	0.959

균일하게 흡착이 되고 있음을 알수가 이었다.

pH 영향

중금속 용액내의 pH가 변하면 중금속 흡착시 용존되어있는 수소이온의 영향으로 평형작용에 의해 용액내의 중금속 이온의 흡착량이 변화한다. *S. confusum*의 pH 변화에 따른 Pb 및 Cr 흡착량을 알아보기 위해서 초기농도 1,000 mg/L의 중금속 용액을 0.1 M HCl과 0.1 M NaOH로 pH를 2에서 5까지 단계적으로 변화시켜 흡착 실험을 수행한 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 본 실험에서 pH 5 이상에서는 Pb가 흰색의 수산화물 침전이 형성되어 그 이상의 pH에서는 침전과 흡착의 구별을 할 수 없어 실험이 불가능하였다. Fig. 5에서 Pb의 경우 pH가 증가할수록 흡착량이 증대하여 pH가 4~5에서 최대 흡착량을 나타내었고, pH가 2.2에서는 흡착량이 최대 흡착량의 30%로 감소하였으나, Cr의 경우 pH 2~5 구간에서 pH의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다. Pb의 경우 낮은 pH에서 흡착량이 크게 감소하는 것을 알 수 있었다. 이렇게 pH가 낮을 때 흡착량이 감소하는 것은 등전점 (isoelectric) 이상의 pH에서는 해조류의 표면에 존재하는 여러 종류의 ligand들이 음전하를 띠게 되어 중금속의 흡착반응이 촉진되며, 낮은 pH에서는 세포벽의 전체 표면 전하가 양으로 하전되어 양이온인 중금속 이온의 접근을 저해하기 때문이며 (Suh, 1997), 또한 낮은 pH에서 많은 수소 이온들이 중금속 이온들과 경쟁흡착 관계에 있기 때문이다 (Guibal et al., 1992). 그러나 Cr의 경우에는 pH의 변화에 대해 흡착량의 변화가 없었는데, 이는 Cr이 *S. confusum*과의 결합력이 매우 강해 강산의 조건에서도 수소 이온의 영향을 받지 않는 것으로 사료되었다.

선택적 중금속 흡착

중금속 포함된 폐수에는 Ca나 Mg 등의 경금속들이 존재하는데, 중금속 제거 공정에서 중금속만을 선택적으로 제거하지 못하고 경금속들이 함께 제거가 된다면 효율이 급격히 감소하게 되는 등의 문제가 발생할 수 있다.

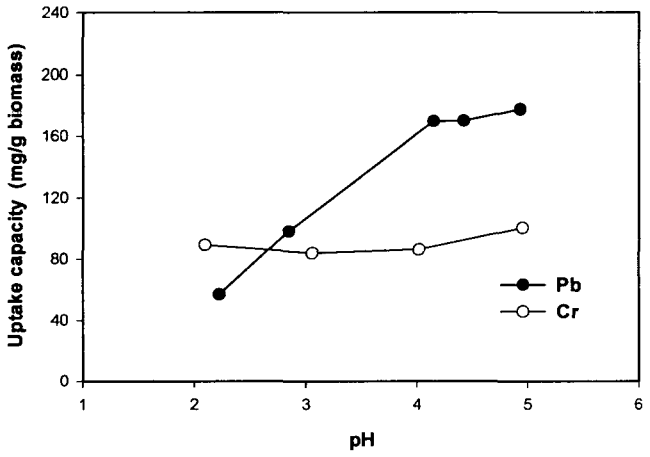

Fig. 5. Effect of pH on uptake capacities of Pb and Cr by *S. confusum*.

따라서 경금속 존재시에 중금속만을 선택적으로 제거할 수 있는지를 확인할 필요가 있는데, 이를 위해 Ca 및 Mg가 각각 0~500 mg/L 공존하는 500 mg/L Pb용액에서 *S. confusum*의 흡착 실험을 수행하였는데, 그 결과를 Fig. 6(a) 및 (b)에 도시하였다. *S. confusum*은 Pb 용액 중에 Ca가 500 mg/L 이상 존재할 때 Pb 흡착량은 약 20% 정도 감소하였으나, Mg는 500 mg/L 이상 존재하여도 Pb 흡착에는 아무런 영향도 미치지 않는 것으로 나타났다. 이때 Ca와 Mg는 전혀 흡착되지 않는 결과를 나타내었는데, 이로서 폐수 중에 상존하는 경금속인 Ca나 Mg 등이 500 mg/L 이상 존재하여도 독성 중금속인 Pb만을 선택적으로 흡착하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있었다. Ca 존재시에 Pb의 흡착량이 20% 정도 감소하는 것은 고농도로 존재하는 경금속 이온들이 Pb 흡착에 대하여 inhibitor 역할을 하기 때문으로 사료되었다. 상기 실험결과는 Ca가 10 mM 존재시 호주산 해조류의 흡착능력이 10~18% 감소하는 현상과 잘 일치하였다 (Matheickal and Yu, 1999).

Pb 및 Cr 탈착 및 흡착제 재사용

생물학적 흡착에 사용하는 생물학적 흡착제는 환경적 측면에서

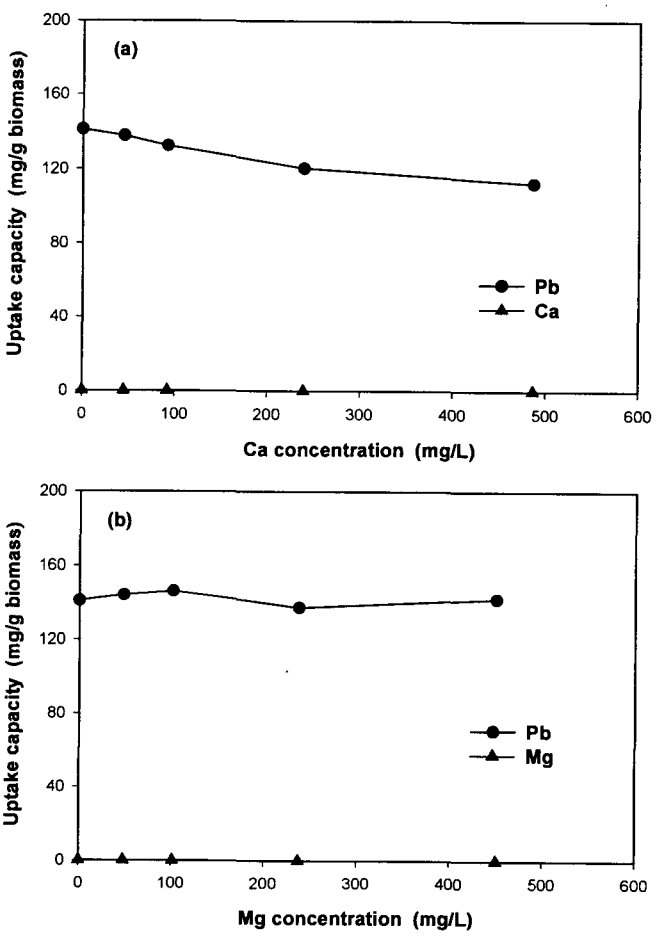

Fig. 6. Effect of light metals on uptake capacity of Pb by *S. confusum*.

2차적 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. confusum*을 3종류의 탈착 용액으로 회수 실험을 수행하여 *S. confusum*의 재생 정도를 확인하였다. 먼저 Pb 및 Cr이 흡착된 *S. confusum*의 회수율을 알아보기 위하여 1,000 mg/L Pb 및 Cr 용액으로 흡착시킨 *S. confusum*에 0.1 M HCl, 0.1 M HNO_3 및 0.1 M EDTA를 이용하여 탈착 실험을 수행한 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 흡착된 Pb는 170±20 mg/g biomass였다. *S. confusum*의 Pb 탈착율은 EDTA를 이용하였을 때 93.1%였고, HCl 및 HNO_3의 산으로 탈착시켰을 때 98.7% 및 96.5%로 매우 높은 탈착율을 나타내었다. EDTA를 이용한 탈착에서는 EDTA가 강한 착물을 형성하기 때문에 흡착되어 있는 Pb와 착물을 형성하여 *S. confusum*으로부터 탈착시키는 것으로 사료되었으며, HCl 및 HNO_3 등의 산으로 탈착시켰을 때 탈착율이 높은 것은 수소 양이온의 농도가 높아져 생물학적 흡착제 표면의 수산화기, 카르복시기 및 인산기 등의 작용기에 흡착되어 있는 Pb 이온을 떼어내기 때문인 것으로 사료되었다.

Fig. 7에서 흡착된 Cr는 106±5 mg/g biomass였다. *S. confusum*의 Cr 탈착율은 EDTA를 이용하였을 때 29.4%였고, HCl 및 HNO_3의 산으로 탈착시켰을 때 23.9% 및 27.06%로 Pb에 비하여 매우 낮은 탈착율을 나타내었다. 이러한 현상은 pH 영향 실험에서 Cr의 경우 *S. confusum*과의 결합력이 강하여 흡착량에 대한 pH 영향을 Pb에 비하여 적게 받는 것과 일치하였다.

*S. confusum*을 이용하여 상대적으로 흡착과 탈착이 용이한 Pb에 대하여 흡착과 탈착 과정을 반복하였을 때 생물학적 흡착제의 재생 정도를 알아보기 위하여 흡착과 4종류의 탈착 용액을 이용한 탈착 과정을 6회 반복 실험한 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 HCl과 HNO_3 등의 산으로 탈착시킨 경우에는 6회까지 흡착과 탈착과정이 반복되는 동안 Pb 흡착량은 약간 감소하였지만 계속해서 흡착이 이루어졌고, 탈착 또한 이루어져 *S. confusum*의 재생성이 매우 좋은 것으로 나타났다. EDTA의 경우 탈착율은 높게 유지되었으나 흡착량이 크게 감소하였으며, NaOH를 이용한 탈착에서는 3회 정도 흡착이 이루어졌으나 그 후에는 흡착량이 현저하게 감소하였고, 탈착 또한 완전히 이루어지지 않는 것으로 나타났다.

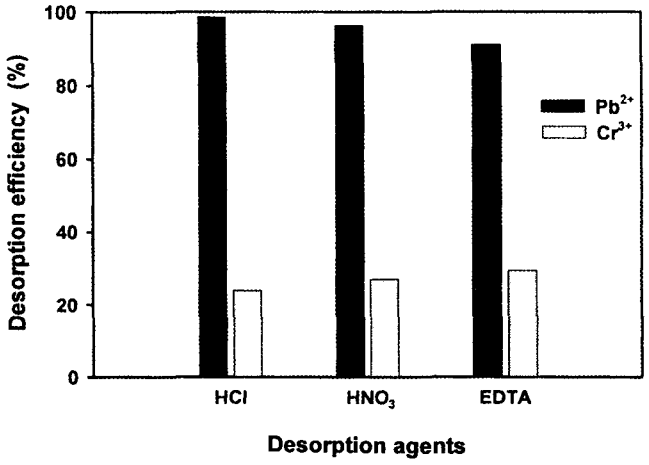

Fig. 7. Desorption efficiencies of Pb and Cr by *S. confusum*.

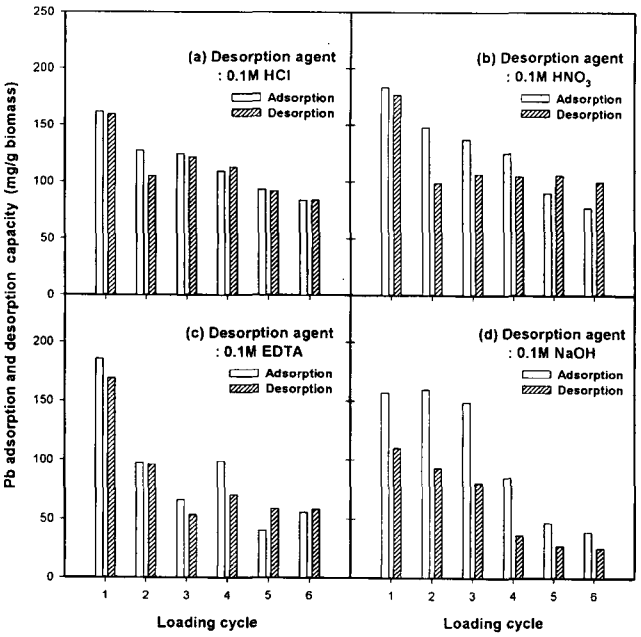

Fig. 8. Adsorption and desorption capacities of Pb by *S. confusum*.

흡착과 탈착의 반복에 따라 Pb의 흡착량을 명확하게 확인하기 위해, Fig. 9에는 Pb의 흡착에 *S. confusum*을 재사용할 때 0.1 M HCl, 0.1 M HNO_3, 0.1 M EDTA 및 0.1 M NaOH로 탈착시킨 경우의 누적 흡착량을 나타내었다. Fig. 9에서 도시된 대로 HCl 및 HNO_3를 이용하였을 때 탈착을 통한 재흡착시 누적 흡착량이 거의 선형적으로 증가하였고, 특히 HNO_3를 이용하였을 때 Pb의 누적 흡착량이 761.4 mg/g biomass로서 가장 높은 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 *S. honeri*를 6회 재사용하여 구한 Pb의 누적 흡착량 636.6 mg/g biomass (Suh et al., 1999b)보다 매우 높고, 6회 재사용시 흡착량 및 탈착량이 거의 일정하여 *S. confusum*은 매우 우수한 생체흡착제로 연속공정에 사용이 가능할 것으로 사료된다. EDTA와 NaOH를 이용한 탈착시에는 흡착량이 많이 증가하지 않아 재흡착을 위해서는 두 용액이 효과적이지 않음을 알 수 있었다. 흡착과 탈착의 6회 반복에 따른 전체 탈착율은 NaOH를 이용하였을 때 탈착율이 58.7% 정도로 낮았지만 HCl, HNO_3 및 EDTA 사용시에는 탈착율이 93% 이상 유지되었다. 특히 HCl의 경우 96.4%로 계속 유지되어 흡착된 Pb의 회수에는 가장 효과적임을 알 수 있었다.

이로써 *S. confusum*을 이용하여 Pb 흡착과 탈착과정을 반복 수행하였을 때 Pb 흡착량 및 탈착율을 고려하였을 때 HCl 및 HNO_3가 우수하다는 것을 알 수 있었으며, 흡착과 탈착 과정의 반복을 통한 흡착제의 재생성 또한 우수한 것으로 나타났다.

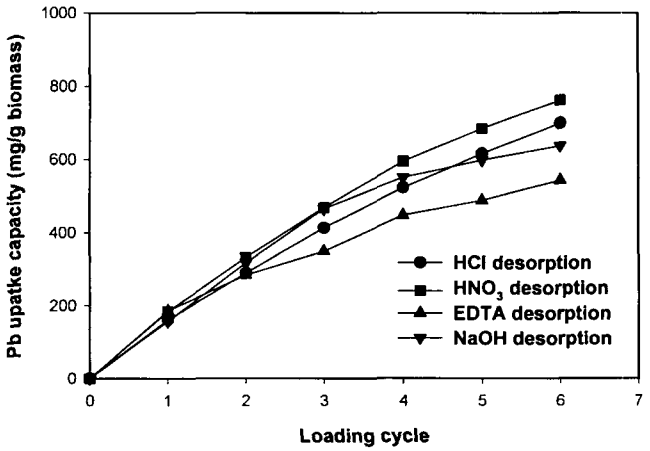

Fig. 9. Effect of desorption agents on uptake capacity of Pb in reused *S. confusum*.

요 약

우리나라 인근 해역에서 가장 쉽게 채취할 수 있는 해조류 중의 하나인 *S. confusum*을 이용한 Pb 및 Cr의 생체흡착 실험을 수행하였다. 두 중금속 모두 흡착 평형에는 15분 안에 도달하였으며, 평형 흡착량은 각각 197.5 mg Pb/g biomass 및 133.1 mg Cr/g biomass이었다. Pb 및 Cr의 생물학적 흡착은 Langmuir 모델에 더 잘 적용되었다. Pb 흡착시에 Ca가 500 mg/L 존재하여도 20% 정도 흡착량이 감소하였고, Mg는 Pb 흡착에 전혀 영향을 미치지 않았다. Pb 및 Cr 흡착 후에 0.1 M HCl, 0.1 M HNO_3 및 0.1 M EDTA를 이용하여 탈착시 Pb의 탈착율은 93% 이상이었으나, Cr의 탈착율은 30% 이하였다. Pb 흡착 후에 0.1 M HCl, 0.1 M HNO_3, 0.1 M EDTA 및 0.1 M NaOH를 이용하여 탈착실험을 수행하고 다시 재흡착을 시키는 과정을 6회 반복한 결과 최대 누적 흡착량은 761.4 mg/g biomass였고, HCl 및 HNO_3를 이용한 경우에 Pb의 탈착 및 *S. confusum*의 재생에 있어 매우 효과적이었다.

참 고 문 헌

Aksu, Z., D. Dzer and T. Kustal. 1998. Investigation of column performance of cadmium biosorption by *Cladophora crispata* flocs in a packed bed, Sep. Sci. and Tech., 35, 667~682.

Ehrlich, H.L. and C. Brierley. 1990. Microbial mineral recovery, McGraw-Hill Publishing Com.

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.

King, A.H. 1982. Brown seaweed extracts (alginate). In *Food Hydrocolloids*, 2, M. Glischsman ed., CRC press, New York, pp. 115~188.

Lee, H.S. 1999. Characteristics of cadmium biosorption and desorption by brown algae. J. Korean. Environ. Sci. Soc., 8(2), 249~254 (in Korean).

Matheickal, J.T. and Q. Yu. 1999. Biosorption of lead and copper from aqueous solution by pretreated biomass of Australian marine algae. Bioresource Technology, 69, 223~229.

Suh, J.H. 1997. Biosorption of lead to *Saccharomyces cerevisiae* and *Aureobasidium pullulans*. Ph. D. Thesis, Dept. of Chem. Eng., Pusan Nat. Univ., Pusan (in Korean).

Suh, K.H., K.H. Ahn, H.S. Lee, H.G. Lee, J.K. Cho and Y.K. Hong. 1999a. Biosorption of Pb and Cr by using *Sargassum sagamianum*. J. Korean. Fish. Soc., 32(4), 399~403 (in Korean).

Suh, K.H., K.H. Ahn, B.J. Kim, J.K. Cho, H.J. Jin and Y.K. Hong. 1999b. Biosorption and desorption of Pb by using *Sargassum honeri*. J. Korean. Fish. Soc., 32(3), 333~337 (in Korean).

Thomas, E.H. and P.O. Drew. 1989. Metal finishing and processing, WPCF, 61, 6~12.

Volesky, B. 1990. Biosorption of heavy metals, CRC Press.

Yang, J. and B. Volesky. 1999. Cadmium biosorption rate in protonated *Sargassum biomass*, Environ. Sci. Technol., 33, 751~757.

강제원. 1970. 한국 동식물 도감 제 7권－식물편 (해조류), 문교부, 삼화출판사, 서울.

2000년 6월 20일 접수
2000년 12월 27일 수리