J. Korean Fish. Soc. 33(1), 60~65, 2000 한수지, 33(1), 60~65, 2000

# 해조류, *Sargassum thunbergii*를 이용한 중금속의 바이오 흡착제의 개발

서근학 · 이학성* · 서정호**
부경대학교 화학공학과, *울산대학교 화학공학과, **울산과학대학 공업화학과

# Biosorption and Development of Biosorbent by using Seaweed, *Sargassum thunbergii*

**Kuen-Hack SUH, Hak-Sung LEE* and Jung-Ho SUH****
*Dept. of Chemical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea*
**Department of Chemical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea*
***Department of Industrial Chemistry, Ulsan College, Ulsan 680-749, Korea*

**Biosorptions of Cr and Pb were evaluated for 23 species of marine algae collected from a Korean coast. Among a variety of species for biosorbent potential, *Sargassum* species showed higher uptake capacity for Cr and Pb. An adsorption equilibrium was reached in about 1 hr for Cr and 30 min for Pb. The maximum uptake capacity was 136.0 mg Cr/g biomass and 232.5 mg Pb/g biomass, respectively. In Pb biosorption in the column packed with *Sargassum thunbergii*, 300 and 200 bed volumes at the concentration of 50 mg/L in feed solution were processed at the column residence time of 5 and 10 min before the column breakthrough point occurred. The elutions with 0.1 M HCl solution were more than 95%. The high efficiency of continous biosorption and elution (3 cycles) indicated that *Sargassum thunbergii* was an effective biosorbent for Pb recovery.**

**Key words:** biosorption, Sargassum species, heavy metal, biosorbent

## 서 론

도금산업이나 광산업, 염색공업, 금속 광산 및 금속 제련소에서 대량 발생하는 중금속은 대기오염 및 수질오염의 원인이 되고 있다. 이런 유해 중금속들이 적절히 처리되지 못하고 수계에 배출될 경우 일차적으로 수중 플랑크톤 또는 조류 등에 의해 흡착되어 축적되고 이차적으로는 이들을 먹고사는 물고기에 축적되며, 마지막으로 동물이나 사람의 체내에 축적되는 먹이 연쇄에 의해 생태계를 파괴시킨다. 따라서 폐수 내 중금속을 제거 또는 회수하기 위한 합리적이고 효과적인 기술이 환경오염 방지와 부존 자원을 재활용한다는 견지에서 절실히 요구되고 있다.

폐수 내에 존재하는 독성 중금속의 제거 기술들이 개발되어 현재 사용되고 있으나 (Thomas and Drew, 1987), 최근에는 해조류나 미생물 등의 생물체에 중금속을 흡착 또는 축적시켜 제거해 내는 생물학적 흡착 (biosorption)기술에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다 (Volesky, 1990). 생물학적 흡착법은 바이오흡착제 (biosorbent) 표면의 음전하로 인하여 중금속에 대한 높은 흡착 능력을 보유하고 있고, 중금속의 선택적인 제거가 가능하며, pH에 대한 사용범위가 넓고 상온에서 조작되므로 비용이 절감된다. 또한 2차 오염을 발생시키지 않고, 기존의 다른 공정보다 중금속 제거 속도가 빠르며, 바이오 흡착제의 활성에 관계없이 다양한 형태의 흡착 공정에 적용 가능한 장점이 있다 (Volesky, 1990; Suh, 1997).

생물학적 흡착에 사용하는 바이오 흡착제는 중금속 흡착 성능이 우수해야 하고 독성 중금속에 대한 선택성이 있어야 하며, 다른 유기물에 방해를 받지 않아야 한다. 또한 양이 풍부하여 구하기가 쉽고 가격이 저렴해야 하며, 흡착 후에 탈착을 통한 재생이 가능하여 연속적으로 사용 가능하여야 하는데, 해조류는 이런 조건들을 모두 구비하고 있어 해조류를 이용한 중금속 생물학적 흡착의 연구가 많이 이루어지고 있다 (Kuyucak and Volesky, 1989; Suh et al., 1998).

생물학적 흡착법을 이용한 중금속 제거 기술을 실제 산업현장에 적용하기 위해서는 연속적인 중금속 제거 및 회수 공정 개발이 반드시 이루어져야 한다. 충전층 반응기는 흡착제가 충전된 반응기를 이용한 중금속 제거 공정으로 유출액에서 흡착제를 분리시키기 위한 별도의 공정이 필요 없으며 운전이 쉬운 장점이 있어 이를 이용한 연구가 많이 이루어지고 있다 (Kratochvi et al., 1995; Zhao and Duncan, 1997).

본 연구에서는 우리 나라 전역에 폭넓게 자생하고 있는 해조류중에서 Cr 및 Pb에 대한 우수한 흡착능을 나타낸 해조류인 *Sargassum*속 (모자반종) 4종을 선별하여 독성 중금속인 Cr 및 Pb의 생물학적 흡착실험을 수행하였다. 흡착 시간 및 중금속 농도에 따른 흡착 평형을 조사하였고, 중금속 흡착시 pH 영향을 검토하였다.

충전탑에 *Sargassum*종중 Pb 흡착량이 우수한 *S. thunbergii*를 충전하여 수력학적 체류시간 (HRT)이 10분 및 5분에서 Pb 제거 실험을 수행한 후에 0.1M HCl을 이용한 중금속 회수를 3회 반복 수행하여, 충전층 반응기를 Pb 제거 및 회수 공정으로 적용 가능한지와 *S. thunbergii*의 바이오 흡착제로의 가능성을 검토하였다.

## 재료 및 방법

### 바이오 흡착제 및 금속 시약

생물학적 흡착 실험에 사용된 23종의 해조류들은 우리나라 인근해안에서 용이하게 채취할 수 있는 해조류이다. 채취한 해조류는 증류수로 2번 세척후 건조 후에 분쇄하여 사용하였다. 해조류 중에서도 갈조류에 속하는 *Sargassum*종 (*Sargassum confusum, S. horneri, S. sagamianum* 및 *S. thunbergii*)은 우리나라와 일본 전연안에 가장 흔한 종의 하나이다 (강제원, 1970). 실험에 사용할 때는 건조 후에 분쇄하여 흡착 실험에는 표준체로 0.355 mm

이하의 크기만을 사용하고, 충전층반응기의 연속적 흡착, 탈착실험에는 0.355 mm이상의 크기만을 사용하였다.

본 연구에 사용한 중금속 시약들은 모두 특급시약으로 Cr $(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ 및 Pb $(NO_3)_2$를 사용하였으며, 실험시 탈이온수에 녹여 필요한 농도로 제조하였다. 중금속의 농도 분석에는 원자흡수 분광계 (Shimadzu AA-670)를 사용하였고, 중금속 농도를 분석하기 위한 검량선 작성시에는 원자흡수 분광계용 표준용액 (1000 mg/L)을 사용하였다.

### 실험 방법

Cr 및 Pb의 중금속 농도가 500 mg/L인 중금속 용액에 각종 해조류가 1 g/L 되도록 넣고 shaking incubator에서 30℃, 150 rpm으로 18시간 동안 교반시켰다. 그 후에 3 mL의 시료를 취하여 10,000 rpm에서 10분간 원심분리한 후 상등액을 일정비율로 희석하여 원자흡수 분광계로 중금속 농도를 측정하였다.

Cr 및 Pb에 대한 흡착능이 우수하고 양이 풍부하여 구하기가 용이한 *Sargassum*종 4종류를 이용하여 Cr 및 Pb 흡착시 흡착에 필요한 시간을 결정하기 위한 실험, 중금속 농도 변화에 따른 흡착량, pH 변화에 따른 흡착량 영향등의 실험은 상기 실험 방법과 동일하게 수행하였으며, pH 조절에는 0.1 M HCl과 0.1 M NaOH를 사용하였다.

*Sargassum* 종에 흡착된 Cr 및 Pb의 탈착을 통한 회수 가능성과 *Sargassum* 종의 재생성을 알아보기 위해 0.1 M HCl용액을 이용한 탈착 실험을 수행하였다. 1000 mg/L Cr 및 Pb 용액에 *Sargassum* 종을 1 g/L가 되도록 하여 50 mL 원심분리관에 넣고 30℃에서 1시간 동안 흡착시킨 후 10000 rpm에서 10분간 원심분리하여 흡착제와 Cr 및 Pb 용액을 완전히 분리하였다. 상등액 농도를 분석하여 중금속 흡착량을 결정하였고, 중금속 용액으로부터 분리된 흡착제는 0.1 M HCl용액으로 30분간 30℃, 150 rpm에서 탈착시켜 각 용액에 따른 탈착율을 비교하였다. 상기 과정을 6회 반복 수행하여 *S. thunbergii*의 바이오 흡착제로의 재생성을 확인하였다.

본 연구에 사용한 충전층 반응기는 내경 12 mm, 높이 125 mm의 아크릴 관을 사용하였으며, 1시간 동안 팽윤시킨 흡착제인 *S. thunbergii* 2 g (건조기준)을 반응기에 자유 낙하로 충전하고 50 mg/L의 Pb 용액을 각각 공급하여 연속적인 제거 및 회수 실험을 수행하였다 (Fig. 1). 충전된 흡착제의 유출을 막기 위해 반응기의 양쪽 끝을 유리섬유와 고무마개로 막았으며, 중금속 용액은 정량펌프를 이용하여 반응기의 하부로부터 일정하게 공급하였다. 반응기에서 나오는 유출액은 시료 수집기 (GILSON FC204)를 이용하여 일정 시간 간격으로 취하여 중금속 농도를 측정하였다. 파과점을 지나 더 이상 중금속이 흡착되지 않으면, 흡착된 중금속의 회수를 위해 0.1M HCl을 흘려보냈고, 유출액에 Pb가 검출되지 않으면 회수 과정이 끝났다고 생각하고 탈이온수로 1시간 동안 세척한 후 다시 중금속 용액으로 재흡착시켰다. 유입액은 Pb 용액에서 수력학적 체류시간 (HRT)을 10분 및 5분 유지하였고, 각 조건에서 흡착과 탈착 과정을 3회 반복 수행하여 연속적인 중금속 제거 및 회수 공정의 가능성을 판단하였다.

## 결과 및 고찰

### 중금속 흡착량과 흡착 평형 도달 시간

Cr 및 Pb의 흡착능력이 우수한 해조류를 선정하기 위해 초기 중금속 농도 500 mg/L, 해조류 농도, 1 g/L로 회분식 흡착실험을 수행하여 해조류의 중금속 흡착성능을 Table 1에 나타내었다.

중금속의 흡착량은 $q=\frac{V(C_i-C_f)}{M}$ 를 이용하여 나타내었으며, 여기서 q는 중금속의 흡착량 (mg/g biomass), V는 용액의 부피 (L), $C_i$와 $C_f$는 각각 초기와 최종 중금속 농도 (mg/L), M은 해조류의 건조 무게 (g biomass)이다.

Table 1에서 일반적으로 해조류들이 Cr 및 Pb를 비교적 많이 흡착한다는 것을 알 수 있었다. 해조류 중 Cr의 흡착성능이 가장 뛰어나고 Pb의 흡착성능이 양호한 *Sargassum* 종 4종류를 이용하여 Pb 및 Cr의 초기 중금속 농도 1000 mg/L에서 흡착시간에 따른 중금속 흡착량의 변화를 Fig. 2 및 3에 도시하였다. Fig. 2 및 3에서 보듯이 Cr의 경우에는 *Sargassum* 종에 따라 약 30~60분 정도에 흡착 평형에 도달하였으며, Pb는 약 30분정도의 비교적 빠른 시간내에 흡착 평형에 도달하였다. 따라서 이후의 흡착 실험에서는 실험의 재현성을 위해 흡착 실험을 1시간 동안 수행하였다.

중금속 농도 변화에 따른 *Sargassum* 종 4종류의 흡착량을 알아보기 위해 초기 중금속 농도를 변화시키면서 흡착실험을 수행하였는데, Fig. 4 및 5에서 보듯이 두 중금속 모두 1000 mg/L 이상에서 흡착 평형에 도달하여 각각 초기농도 변화에 따른 Cr 흡착량은 *S. confusum* (136.0 mg/g biomass)>*S. horneri* (102.6 mg/g

**Table 1. Uptake capacity of marine algae for Cr and Pb**
(Initial metal concentration: 500 mg/L)
(unit: mg/g biomass)

| Marine algae | $q_{Cr}$ | $q_{Pb}$ |
|---|---|---|
| *Chondrus ocellatus* | 36.4 | 190.7 |
| *Codium fragile* | 5.1 | 192.1 |
| *Colpomenia bullosa* | 36.8 | 149.1 |
| *Colpomenia sinuosa* | 31.6 | 131.5 |
| *Ecklonia cava* | 37.3 | 49.1 |
| *Enteromorpha linza* | 35.7 | – |
| *Gigartina intermedia* | 23.9 | 197.5 |
| *Grateloupia prolongata* | 26.8 | 187.9 |
| *Grateloupia yezoensis* | 36.6 | 37.8 |
| *Hypnea charoides* | 17.9 | 234.2 |
| *Ishige foliacea* | 37 | 80.3 |
| *Kjellmaniella crassifolia* | 21.9 | 232.5 |
| *Monostroma nitidum* | 36.8 | 87.1 |
| *Pachymeniopsis elliptica* | 33.4 | 16.5 |
| *Porphyra yezoensis* | 21 | 185.1 |
| *Sargassum confusum* | 58.2 | 75.5 |
| *Sargassum horneri* | 36.6 | 196.9 |
| *Sargassum sagamianum* | 52.2 | 107.5 |
| *Sargassum thunbergii* | 41 | 115.7 |
| *Scytosiphon lomentaria* | 30.7 | 123.3 |
| *Symphyocladia latiuscula* | 34.0 | 166.5 |
| *Ulva pertusa* | 32.3 | 53.5 |
| *Undaria pinnatifide* | 36.4 | 136.9 |

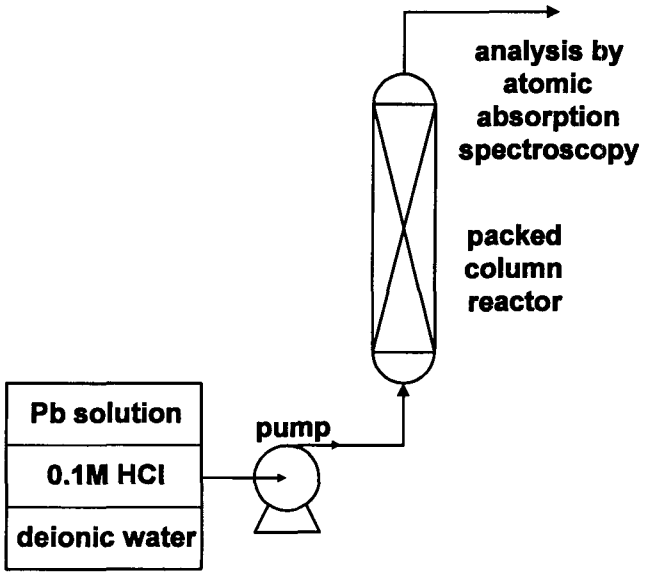


Fig. 1. Schematic diagram of apparatus for continuous removal of metal ion removal and recovery process.

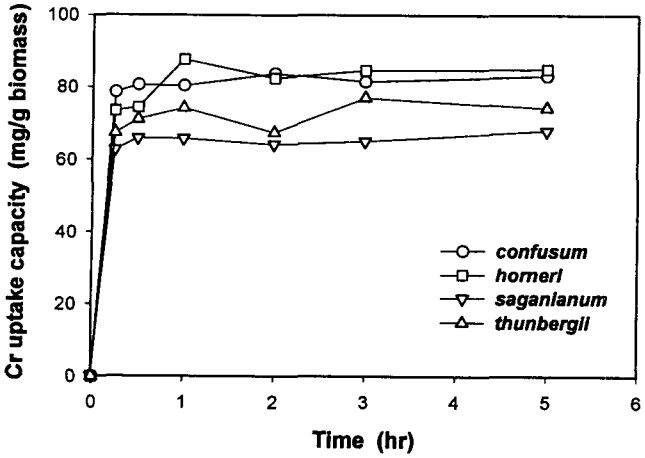


Fig. 2. Time courses of Cr uptake capacity by *Sargassum* species.

biomass)>*S. thunbergii* (91.6 mg/g biomass)>*S. sagamianum* (77.5 mg/g biomass) 순으로 나타났으며, Pb의 평형흡착량은 *S. thunbergii* (232.5 mg/g biomass)>*S. sagamianum* (224.5 mg/g biomass)>*S. confusum* (197.5 mg/g biomass)>*S. horneri* (185.5 mg/g biomass) 순으로 Cr보다는 Pb의 흡착량이 무게 기준으로는 약 2배정도 높은 것으로 나타났다. 상기 흡착량을 몰수기준의 흡착량으로는 Cr은 1.5~2.6 m mole/L이고 Pb는 0.9~1.12 m mole/L로서 Pb보다 Cr의 흡착량이 2배정도 높아 중금속의 종류에 따라 흡착특성이 다양하게 나타났다. *Sargassum* 종을 이용한 생체흡착 실험시 *S. confusum*는 Cr 흡착능이 우수하고, *S. thunbergii*는 Pb의 흡착능이 우수한 것으로 판단되었다.

pH 영향

*Sargassum* 종의 Cr 및 Pb 흡착시 pH의 변화에 따른 흡착량의

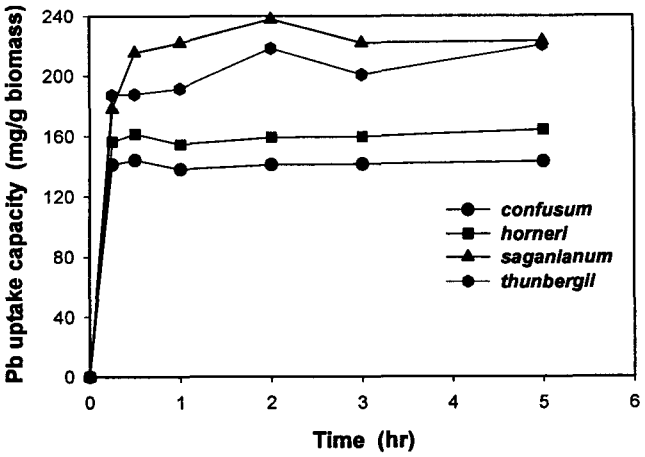


Fig. 3. Time courses of Pb uptake capacity by *Sargassum* species.

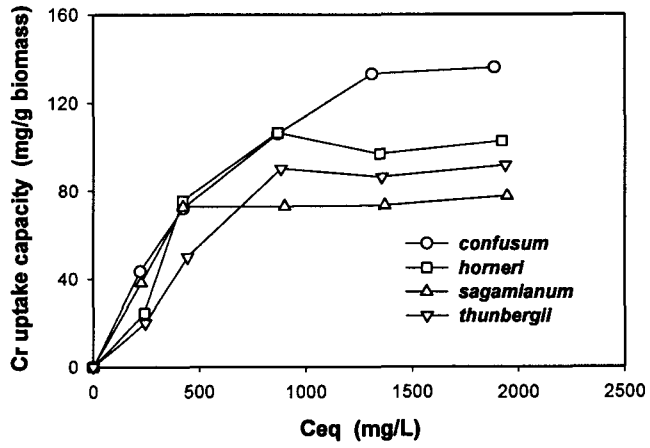


Fig. 4. Biosorption isotherm of Cr by *Sargassum* species.

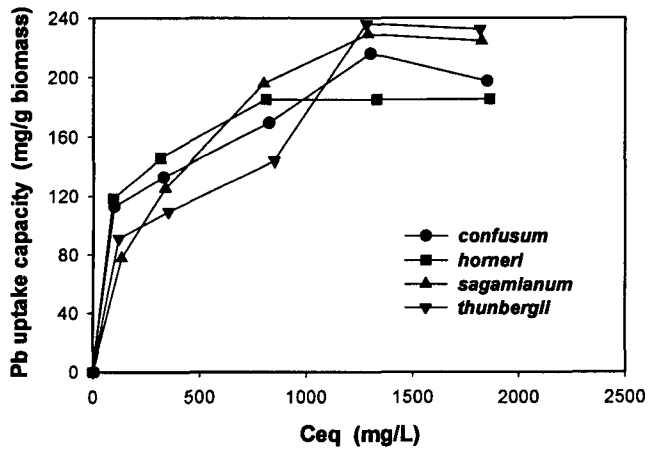


Fig. 5. Biosorption isotherm of Pb by *Sargassum* species.

변화를 알아보기 위해서 Cr 및 Pb의 초기농도 1000 mg/L의 중금속 용액을 0.1 M HCl과 0.1 M NaOH로 pH를 2.2에서 5로 변화시켜 흡착실험을 수행한 결과를 Fig. 6 및 7에 도시하였다. 본 실험에서 pH 5 이상에서는 Pb가 흰색의 수산화물 침전이 형성

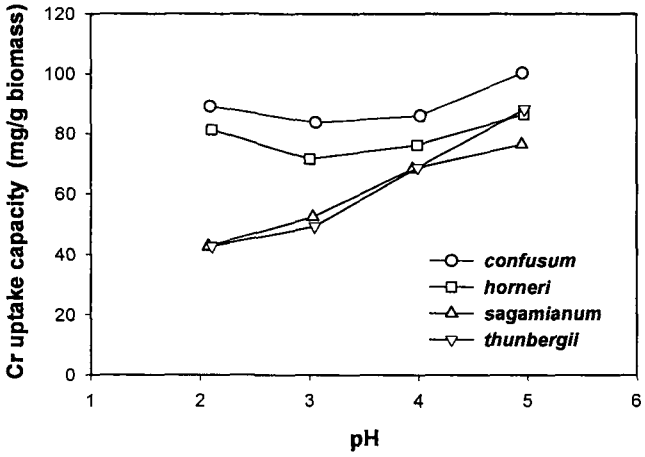


Fig. 6. Effects of pH on Cr uptake capacity by *Sargassum* species.

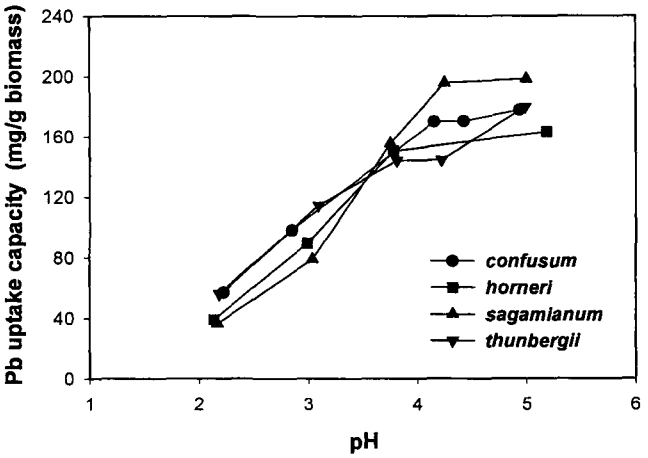


Fig. 7. Effects of pH on Pb uptake capacity by *Sargassum* species.

되어 그 이상의 pH에서는 침전과 흡착의 구별이 어려워 실험이 불가능하였다. Pb의 경우 pH가 증가할수록 흡착량이 증대하여 pH가 4-5에서 최대흡착량을 나타내었고, pH가 2.2에서는 흡착량이 최대흡착량의 20%로 감소하였으나, Cr의 경우 pH 2.2-5구간에서 Pb에 비하여 pH의 영향을 적게 받는 것으로 나타났으며 특히 *S. confusum* 및 *S. honeri* 는 pH의 영향을 거의 받지 않았다. 두 중금속 모두 pH가 낮아질수록 흡착량이 감소하였고 pH 4이상에서 최대 흡착량을 나타내었으나, Pb가 pH의 영향을 훨씬 많이 받는 것으로 나타났다. 두 중금속 모두 pH가 낮을 때 흡착량이 감소하였고 pH가 증가할수록 흡착량도 증가함을 알 수 있었다. 이렇게 pH가 낮을 때 흡착량이 감소하는 것은 등전점 (isoelectric) 이상의 pH에서는 해조류의 표면에 존재하는 여러 종류의 ligand들이 음전하를 띄게되어 중금속의 흡착반응이 촉진되며, 낮은 pH에서는 세포벽의 전체 표면전하가 양으로 하전되어 양이온인 중금속 이온의 접근을 저해하기 때문이며, 또한 낮은 pH에서 많은 수소 이온들이 중금속 이온들과 경쟁흡착 관계에 있기 때문이다 (Guibal et al., 1992 ; Fourest and Roux, 1992).

### Cr 및 Pb 탈착 및 재사용

바이오 흡착제인 *Sargassum* 종 4종류에 흡착된 Cr 및 Pb의 회수율을 알아보기 위하여 1000 mg/L Pb 용액으로 흡착시킨 *Sargassum* 종 4종류를 탈착용액인 0.1 M HCl를 이용하여 탈착 실험을 수행한 후 얻어진 탈착율을 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8에서 *Sargassum* 종 4종류의 Cr탈착율은 23.9~48.6%로서 Pb탈착율 85.0~96.4%에 비하여 매우 낮은 탈착율을 나타내었으며, 특히 흡착량이 pH의 영향을 거의 받지않는 *S. confusum* 및 *S. honeri*은 탈착율이 낮았다. 이러한 현상은 Cr의 경우에는 *Sargassum* 종과의 결합력이 매우 강하기 때문에 강산의 조건에서도 Pb보다 영향을 작게 받아 흡착이 계속되어 탈착율이 적은 것으로 생각되며, 이러한 현상은 pH 영향 실험에서 Cr의 경우 *Sargassum* 종과의 결합력이 강하여 흡착량에 대한 pH 영향을 Pb에 비하여 적게 받는 실험내용과 일치하였다.

상기실험 결과로부터 *Sargassum*종중 Pb의 흡착능 및 탈착율이 가장 우수한 *S. thunbergii*를 이용하여 흡착과 탈착 과정을 반복하였을 때 흡착량과 탈착량 및 흡착제의 재생 정도를 알아보기 위하여 흡착과 탈착 과정을 6회 반복 실험하여 Fig. 9에 도시하였다.

Fig. 9에서 HCl으로 탈착시킨 경우에는 6회까지 흡착과 탈착과정이 반복되는 동안 Pb 흡착량은 약간 감소하였지만 4회부터는 거의 일정하게 유지되었고 탈착 또한 완전히 이루어져 *S. thunbergii*의 재생성이 매우 좋은 것으로 나타내었다. 6회 흡착 및 탈착 과정에서 누적된 흡착량은 853.06 mg Pb/g biomass이고 누적된 탈착율은 97.0%이였다. 이러한 결과는 가시우무를 5회 흡착 및 탈착하여 얻은 Pb의 누적흡착량 481.2 mg Pb/g biomass (Cho, 1999)보다 본실험의 누적 흡착량이 크고, 6회 재사용시 탈착율이 거의 유사하였다. *S. thunbergii*는 바이오 흡착제로 Pb 흡착과 탈착과정을 반복 수행하였을 때, 흡착과 탈착 과정의 반복을 통한 흡착제의 재생성이 우수한 것으로 나타났다.

### 층전층 반응기에서 Pb 제거 및 회수

1시간 동안 팽윤시킨 *S. thunbergii*를 충전한 반응기에 50 mg/L

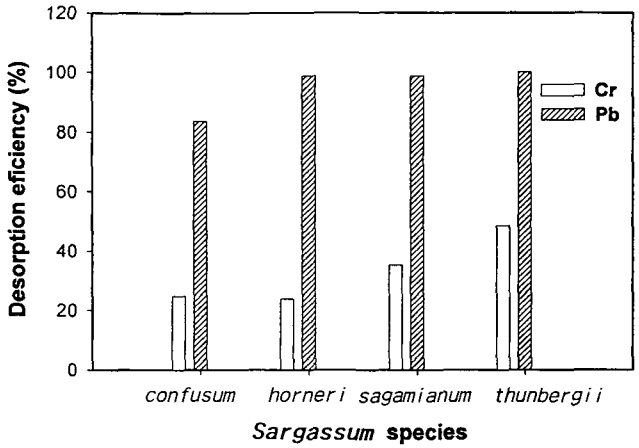


Fig. 8. Desorption effciency of Cr and Pb by *Sargassum* species.

Pb 용액을 하부로부터 HRT를 10분 및 5분으로 각각 유지하면서 연속적으로 공급하여 생체흡착 실험을 수행하고, 유입 Pb 농도와 유출 Pb 농도가 같아져 흡착이 완결되면 0.1 M HCl 용액으로 흡착된 Pb를 회수한 후 탈이온수로 세척하고 다시 50 mg/L Pb 용액으로 재흡착 시키는 과정을 반복 수행하여 그 결과를 Fig. 10에 도시하였다. Fig. 10에서 보듯이 HRT가 10분일 경우에는 유입되는 50 mg/L의 Pb가 완전히 제거되는 구간이 1회 흡착에서 약 300 bed volume 정도이나, HRT 5분에서는 약 200 bed volume 정도로 10분 일때가 1.5배 높은 것을 알 수 있었고, 두 경우 모두 제거 및 회수 과정이 반복됨에 따라 bed volume은 서서히 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Sargassum fulvellum을 충전한 반응기에 2.5 mg/L의 Cu 수용액을 공급하여 Cu가 완전히 제거되는 구간이 1회흡착시 250 bed volume (Park et al., 1997)에 비하여 bed volume은 비슷하나 본 실험의 경우가 Pb의 흡착농도가 50 mg/L인 점을 고려하면 *S. thunbergii* 을 충전한 반응기는 효과적인 Pb 제거장치로 사료되었다.

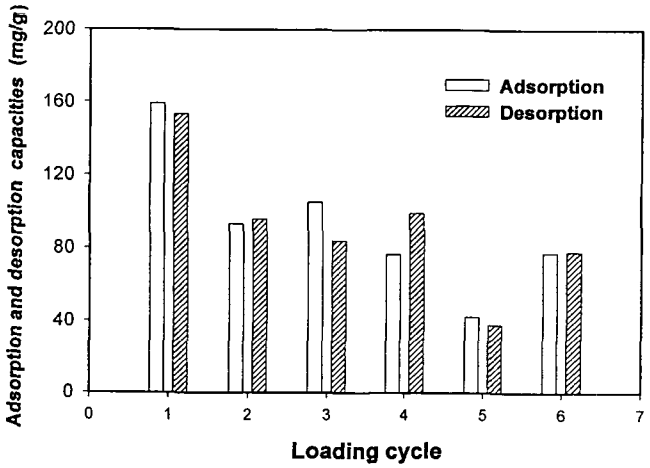


Fig. 9. Adsorption and desorption capacities of Pb by *Sargassum thunbergii*.

각 경우에 있어 Pb 흡착량을 비교해 보면 (Fig. 11), HRT 10분일 때 1회 흡착량은 165 mg/g biomass으로 112시간 동안 계속되었고, 2회에서는 96시간 동안 130 mg/g biomass을, 3회에서는 92시간 동안 120 mg/g biomass을 흡착하여 1회 흡착에서 흡착량은 가장 많았으나 시간이 많이 소요되었고, 2회와 3회는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

HRT 5분에서의 실험 결과를 보면, 매 회 Pb 흡착량이 112, 112 및 106 mg/g biomass으로 HRT가 10분일 때보다 흡착량은 약간 감소하였으며 재흡착시 흡착량의 큰 감소는 없는 것으로 나타났다. 그러나 흡착이 완결되는데 소요된 시간을 보면 매 회 52, 46 및 42시간으로 HRT가 10분일 때보다 크게 감소한 것으로 나타났는데, 이로써 HRT를 5분으로 유지하는 것이 HRT를 10분일 때보다 Pb 제거량은 약간 작더라도 더욱 효과적인 것을 알 수 있었다.

이러한 결과는 *S. fulvellum*을 충전한 반응기에 35 mg/L의 Cu 수용액을 공급하여 구한 흡착량 54.1~61.5 mg/L (Kratochvil et al., 1995)에 비하여 흡착량이 높아 *S. thunbergii*을 충전한 반응기는 효과적인 Pb 제거장치로 사료되었다.

HRT 10분 및 5분에서 Pb 제거 후에 0.1 M HCl을 이용하여 회수시 제거량과 회수량을 Fig. 12에 도시하였다. Fig. 12 (a)에서 HRT를 10분으로 할때의 Pb 제거량과 회수량을 비교하면 공정이 반복될수록 그 양은 다소 감소하였지만, 회수율 또한 매회 96, 100 및 100%로 높게 나타나 누적 탈착율은 99%로서 바이오흡착제의 재생성이 매우 우수한 것으로 나타났으며, 2시간 만에 회수 과정이 끝났다.

Fig. 12 (b)는 HRT 5분에서 Pb 제거량과 회수량을 비교하면 HRT 10분의 경우와 유사하게 공정이 반복될수록 그 양은 다소 감소하였지만, 회수율은 매회 78, 103 및 103% 로 회수가 이루어져, 1회 회수량은 1회 제거량에 비해 다소 낮은 것으로 나타나 누적탈착율은 95%로서 1시간만에 회수가 이루어 졌다.

HRT 10분과 5분에서 유출액의 최고 농도는 3500 mg/L로서

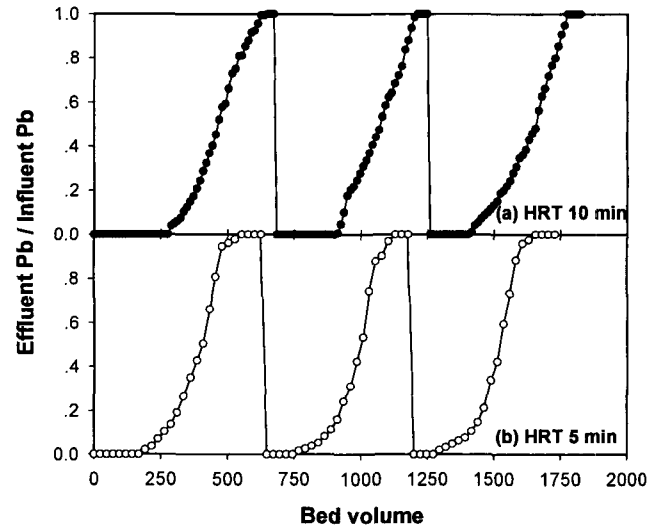


Fig. 10. Continuous process of Pb removal by *S. thunbergii* in a packed bed reactor

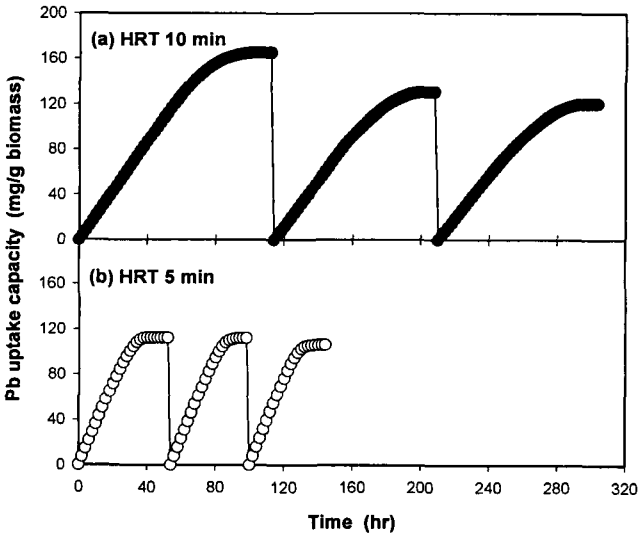


Fig. 11. Time course on total uptake capacity of Pb by *S. thunbergii* in a packed bed reactor

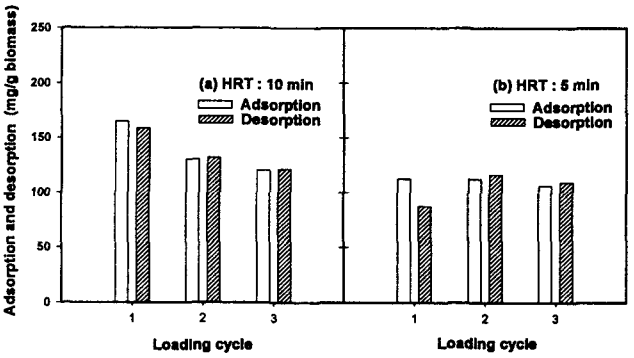


**Fig. 12. Effect of loading cycle on Pb adsorption and desorption in different HRT**

유입 Pb 농도가 50 mg/L인 것을 고려한다면 최대 70배까지 농축된 것으로서, Pb의 연속적인 제거와 회수 과정을 통해 저농도의 폐수를 고농도로 농축도 가능함을 알 수 있었다.

## 요 약

우리나라 인근해안에서 서식하고 있는 해조류 23종에 대하여 Cr 및 Pb의 흡착성능을 조사한 결과, *Sargassum* 종이 Cr에 대하여 흡착능이 가장 높았다. *Sargassum* 종 4종을 이용하여 Cr 및 Pb의 생체흡착 실험을 수행하여 흡착 평형에는 Cr은 30~60분, Pb는 30분 정도 소요 되었다. Cr 및 Pb 최대 흡착량은 136 mg Cr/g biomass 및 232.5 mg Pb/g biomass 였다. Pb 흡착 및 탈착과정을 6회 반복한 결과 *S. thunbergii*는 재생성이 매우 효과적인 바이오 흡착제 였다. *S. thunbergii*를 자유 충전시킨 충전층 반응기를 이용하여 50 mg/L Pb 용액의 연속적인 제거 실험을 수행한 결과 유입되는 Pb가 완전히 제거되는 구간은 HRT 10분에서 약 300 bed volume, HRT 5분에서 약 200 bed volume정도였다. 1회 흡착시 Pb 제거량은 HRT 10분에서 165 mg/g biomass, HRT 5분에서 112 mg/g biomass 였으나 흡착 완결까지의 소요 시간이 각각 112시간 및 52시간으로 HRT 5분일때가 더욱 효과적이라는 것을 알 수 있었다. 0.1 M HCl을 이용한 Pb 회수 실험에서 회수율은 95%이상이었다.

HRT 10분 및 5분에서 탈착 후 재흡착이 3회 반복되어도 흡착량은 다소 감소하였지만 계속적인 Pb의 제거가 가능하여 *S. thunbergii*는 바이오 흡착제로 사용이 가능함을 알 수 있었다.

## 감사의 글

이 논문은 1998년 학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 수행된 결과의 일부분임을 밝히며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

Cho, M.C. 1999. Removal and recovery of heavy metals using marine algae as biosorbent. Master thesis, Pukyong Natl. Univ. Pusan (in Korean).

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.

Kuyucak, N. and B. Volesky. 1989. Accumulation of cobalt by marine alga. Biotechnology and Bioengineering, 33, 809~814.

Kuyucak, N., and B. Volesky. 1989. Desorption of Cobalt-laden Algal Biosorbent. Biotechnology and Bioengineering, 33, 823~831.

Kratochvil, D., E. Fourest and B. Volesky. 1995. Biosorption of copper by *Sargassum fluitan* biomass in fixed-bed column. Biotechnol. Letters, 17, 777~782.

Park, J.Y., Y.S. Nam, S.S. Choi and Y.J. Yoo. 1997. Heavy metal adsorption characteristics of *Sargassum fulvellum*. Kor. J. Biotechnol. Bioeng., 12, 103~105.

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, 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).

Thomas, E.H. and P.O. Drew. 1989. Metal finishing and processing, WPCF, 61 (6) Volesky, B. 1990. Biosorption of heavy metals, CRC Press.

Zhao, M. and J.R. Duncan. 1997. Use of formaldehyde cross-linked *Saccharomyces cerevisiae* in column bioreactors for removal of metals from aqueus solution. Biotechnol. Letters, 19, 953~955.

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

1999년 10월 15일 접수
2000년 1월 7일 수리