

Ca-alginate에 고정된 *Spirulina platensis*의 납과 구리 흡착 특성

신태수 · 우병성 · 임병서 · 김광열[†]

충북대학교 환경공학과

(2008년 1월 14일 접수, 2008년 3월 31일 채택)

Biosorption Characteristics of Pb and Cu by Ca-alginate Immobilized Algae *Spirulina platensis*

Taek-Soo Shin · Byoung-Sung Woo · Byung-Seo Lim · Kwang-Yul Kim[†]

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

ABSTRACT : This study was conducted to research the biosorption characteristics using algae, *Spirulina platensis*, for the removal of Pb and Cu ions in wastewater. Both of free algal cell and immobilized algae by Ca-alginate were used as bioadsorbent, and experiment was proceed in batch reactor for Pb and Cu ions removal, respectively. In the biosorption of Pb and Cu ions by free *Spirulina platensis* cell, the adsorption equilibrium reached within 20 minute. The higher adsorbed amount of Pb and Cu was shown as increasing of initial concentration of Pb and Cu, and pH of solution, respectively, and the optimum pH was 4.5~5.0. Under the conditions of initial concentration of Pb or Cu are 200 mg/L, the maximum amounts of Pb and Cu adsorbed to the unit weight of *Spirulina platensis* were 86.43 and 57.02 mg/g, respectively, and these values were 1.94 and 1.48 times higher than those of activated carbon under same conditions, respectively. The biosorption kinetics of Pb and Cu ions by free *Spirulina platensis* cell fitted very well to the Freundlich and Langmuir isotherm. The maximum amount of Pb or Cu adsorbed to the unit mass of adsorbent by the Langmuir isotherm(q_{max}) represented as 95.24 and 62.50 mg/g, respectively. The FT-IR results of free *Spirulina platensis* biomass showed that biomass has different functional groups and these functional groups are able to react with metal ions in aqueous solution. In the biosorption of Pb and Cu ions by Ca-alginate immobilized algae *Spirulina platensis*, the adsorption equilibrium reached within 40 min. and observed a little diffusion limitation differed from the free algal cell adsorption.

Key Words : Biosorption, Pb, Cu, Immobilization, *Spirulina platensis*

요약 : 중금속 제거를 위한 조류 *Spirulina platensis*의 생물흡착 특성에 관해 연구하기 위하여, 조류 균체와 Ca-alginate를 이용하여 조류를 고정화한 고정체에 대하여 각각 회분식반응기에서 Pb와 Cu의 제거 실험을 하였다. *Spirulina platensis* 균체에 의한 Pb와 Cu의 생물흡착은 20분 이내에 흡착평형에 도달하였다. Pb와 Cu의 흡착량은 초기 농도가 증가하거나 용액의 pH가 높아짐에 따라 증가하여, pH 4.5~5.0에서 최적 조건을 나타내었다. Pb 혹은 Cu의 농도가 200 mg/L일 때, *Spirulina platensis*의 단위 무게당 흡착된 Pb와 Cu의 최대 흡착량은 각각 86.43과 57.02 mg/g이었으며, 이는 같은 조건에서 활성탄보다 1.94와 1.48배 높은 값이다. *Spirulina platensis* 균체에 의한 Pb와 Cu의 흡착특성은 Freundlich와 Langmuir 흡착등온식에 의해 잘 해석되었으며, Langmuir 흡착등온식에 의해 구한 흡착제 단위 무게당 흡착되는 Pb 혹은 Cu의 최대 흡착량(q_{max})은 각각 95.24와 62.50 mg/g이었다. *Sp. platensis* 균체에 대한 FT-IR 분석결과 여러 가지의 기능기들을 확인하였고, 이러한 기능기들이 수용액상에서 금속 이온과 반응할 수 있다. 조류 *Spirulina platensis*를 Ca-alginate를 이용하여 고정화한 고정체에 의한 Pb와 Cu의 생물흡착의 경우, 40분 정도에 흡착평형에 도달하여 균체에 의한 경우에 비하여 약간의 확산제한이 관찰되었다.

주제어 : 생물흡착, 납, 구리, 고정화, *Spirulina platensis*

1. 서론

현재 산업폐수중 중금속 처리를 위한 공정으로는 이온 교환, 화학적 산화 및 환원, 응집침전, 고형화, 전기적 회수, 용매 추출, 활성탄 흡착, 증발에 의한 회수 등 여러 가지 물리화학적 방법이 사용되고 있으나, 이들 처리법은 저농도 폐수에서 처리효율이 낮고 부산물이 다량 발생하

나 고가의 처리비가 요구되는 등의 문제점이 있다.¹⁾

물리화학적 처리방법에 대한 대안으로 선진국을 중심으로 조류나 균류, 박테리아를 이용하는 생물흡착법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 그 중 조류에 의한 방법이 경제적이고 효율적인 것으로 알려져 있다.²⁾ 그러나 생물흡착법을 실용화하기 위해서는 적합한 미생물의 탐색과 대량생산, 고정화와 재생문제가 선결되어야 한다.³⁾

미생물을 적당한 담체에 고정하여 사용하면 취급 및 재사용이 가능하여 산업화가 가능하며, 고정화 물질 자체가 중금속을 흡착할 수 있을 뿐만 아니라 pH 등 외부조건

[†] Corresponding author

E-mail: kykim@chungbuk.ac.kr

Tel: 043-261-2466

Fax: 043-267-2466

변화에 덜 민감하므로 안정성을 높일 수 있는 이점이 있다.⁴⁾ 이러한 고정화 방법에는 물리적인 흡착 방법, 포획에 의한 방법, 공유결합에 의한 방법 등이 있다.³⁾ 그 중 포획에 의한 방법은 미생물을 겔 안에 포획시켜 고정화하는 것으로, 포획된 생물흡착제가 잘 유실되지 않는다는 장점이 있으나 확산 제한(diffusion limitation)이 생기는 것으로 알려져 있다.

본 논문에서는 조류중 대량생산되고 있는 *Spirulina platensis*를 대상으로 중금속 Pb와 Cu에 대한 흡착특성을 조사하였고, 포획에 의한 고정화 방법중 하나로 Ca-alginate에 고정화하여 흡착특성의 변화를 관찰하였다. 실험재료로 사용한 *Spirulina platensis*는 현재 건강식품과 어류의 단백질 공급원으로 개발된 상업적인 제품으로 이를 중금속 흡착제로 이용하려는 새로운 시도는 생물흡착법이 가지고 있는 대량생산 문제를 자연스럽게 해결해 줄 것이며, 본 연구를 통해 처리가 가능한 중금속의 탐색과 효과적인 고정화 방법을 제시함으로써 향후 효과적인 생물흡착제 개발에 중요한 기본정보를 제공할 것이다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 시료

흡착제로 사용한 조류 *Spirulina platensis*는 일본 DIC주식회사에서 양식 어류의 사료용(feed grade)으로 대량 생산하여 SPIRULINA™라는 상품명으로 판매되고 있는 제품을 그대로 사용하였으며, 평균입경 8~10 μm 정도의 짙은 초록색 분말로 되어 있었다. 중금속 흡착능 비교 실험을 위해 사용한 활성탄은 유효입경이 0.3 mm인 palm tree activated carbon을 사용하였다. 중금속의 흡착실험을 위한 Pb와 Cu용액은 Pb(NO₃)₂와 Cu(NO₃)₂ · 3H₂O 1급시약을 사용하여 Pb와 Cu 이온 농도가 각각 5,000 mg/L인 용액을 만들고, 이를 모액으로 희석하여 사용하였다. pH 조절을 위하여 0.1 N과 1 N의 HCl과 NaOH 용액을 만들어 사용하였다.

2.2. 흡착 실험방법

흡착 실험은 1,000 mL 비커에 pH meter와 온도계를 장치하여 pH와 온도를 측정하면서, 200 rpm의 일정한 속도로 교반하면서 진행시켰다. 중금속 용액은 최초 1.0 L로 하고 일정한 시간 간격으로 흡착제를 포함하여 15 mL씩 시료를 채취하여 분석하였다. 채취한 용액은 MFC 여과기로 여과하여 ICP-MS로 중금속 농도를 분석하여 흡착된 중금속 양을 식 (1)에 의해 계산하였다.

중금속 흡착특성은 식 (2)의 Freundlich 흡착등온식⁵⁾과 식 (3)의 Langmuir 흡착등온식⁶⁾을 이용하여 분석하였으며, BET를 이용하여 조류와 활성탄의 비표면적과 기공의 부피를 조사하였고, FT-IR을 사용하여 조류가 가지고 있는 작용기와 중금속 흡착 후 작용기 변화를 관찰하였다.

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

$$q = KC_e^n \quad (2)$$

$$q = \frac{aq_{\max}C_e}{1 + aC_e} \quad (3)$$

위 식에서 q는 흡착제 단위무게(g)당 흡착된 중금속의 양(mg), V는 중금속 용액의 부피(L), M은 흡착제 양(g), C_i는 초기 중금속 농도(mg/L), C_e는 잔류중금속 농도(mg/L)를 나타내며, q_{max}는 흡착제 단위질량당 피흡착질의 최대 흡착량(mg/g)을, K와 n, a는 흡착 특성을 나타내는 각각의 상수이다.⁷⁾

2.3. 조류의 고정화 방법

본 연구에서 사용한 고정화 방법은 Ca-alginate에 의한 고정화 방법으로, 1% alginate 용액 100 mL에 *Spirulina platensis* 3 g을 넣고 혼합한 다음, 이것을 1.47% CaCl₂ 용액 속에 방울방울 떨어뜨려서 bead를 만들었으며, 증류수로 10여회 세척하여 사용하였다. 고정된 *Spirulina platensis*는 평균입경이 4 mm 정도, 평균무게는 13.4 mg 정도의 초록색 구형입자 형태로 균체와 마찬가지로 중금속 흡착을 위한 흡착제로 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. *Sp. platensis* 균체에 의한 중금속 흡착 특성

3.1.1. 중금속 농도와 흡착 시간에 따른 흡착 특성

시간 경과에 따른 중금속 용액의 농도 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 이때 반응용액의 초기 pH는 5.0, 온도는 20℃로 하였으며, 중금속 용액 1 L 당 조류 *Spirulina platensis* 1 g씩 흡착제로 투여하였다. 결과에서 보는 바와 같이, Pb와 Cu의 흡착은 대부분 10~20분 이내에 평행에 도달하는 것으로 나타났으며, 이와 같은 빠른 흡착속도는 조류를 흡착제로 실용화하는데 장점으로 작용할 것으로 판단된다.

Pb와 Cu의 초기 농도에 따른 조류 *Spirulina platensis* 단위 무게(g)당 흡착되는 중금속의 양(mg)을 Fig. 2에 제시하였으며, 이때 동일한 온도와 pH 조건에서 60분간 흡착 반응 시킬때의 분말 활성탄에 의한 흡착능과 비교하였다. Pb와 Cu의 경우 모두 중금속 농도가 증가함에 따라 조류 *Spirulina platensis*의 단위무게(g)당 흡착된 중금속의 양(mg)도 점차 증가하여, 중금속 농도가 200 mg/L일 때 조류 단위 무게당 흡착된 중금속 양은 Pb의 경우 86.43 mg/L, Cu는 57.02 mg/L으로 나타났으며, 그 이후 고농도로 갈수록 최대흡착량에 가까워짐에 따라 중금속 흡착량은 증가하나 증가폭은 작아짐을 알 수 있었다. 또한, Pb와 Cu의 농도가 각각 200 mg/L인 조건에서 동일조건인 분말활성탄에 비해 흡착능이 각각 1.94배, 1.48배 우수한 것으로 나타났다.

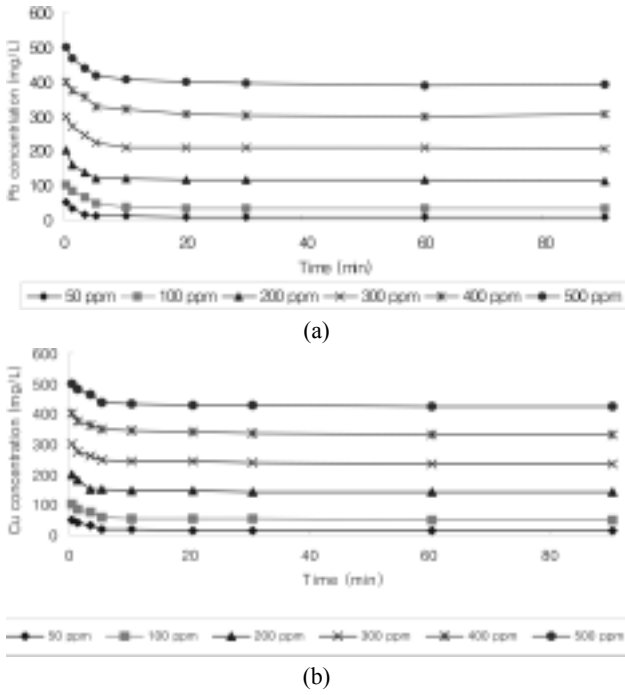


Fig. 1. The concentration profiles of (a) Pb and (b) Cu for biosorption by *Spirulina platensis* according to the reaction time in the different concentration solutions of Pb and Cu, respectively.

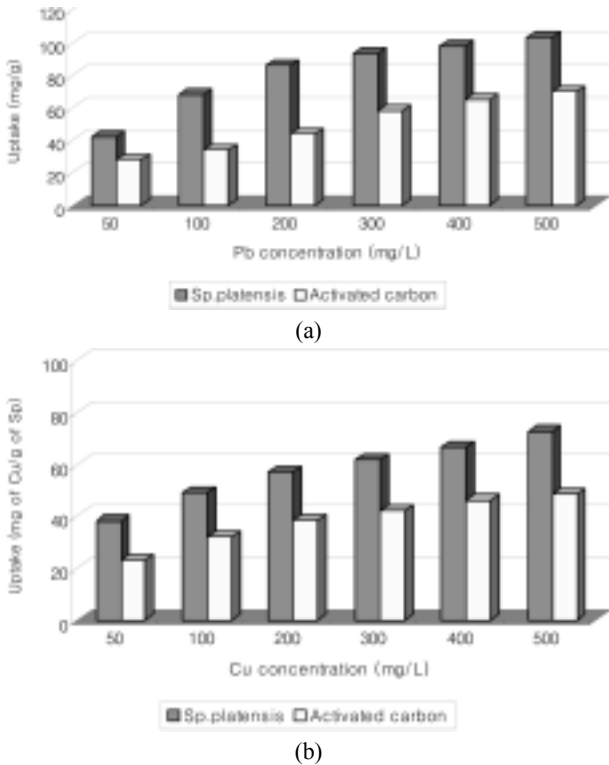


Fig. 2. The uptake capacity of (a) Pb and (b) Cu by *Spirulina platensis* or activated carbon in the different concentration solutions of Pb and Cu, respectively.

3.1.2. 조류의 양에 따른 중금속 흡착량

Fig. 3은 반응온도 20℃, pH 5.0인 조건에서 농도가 200

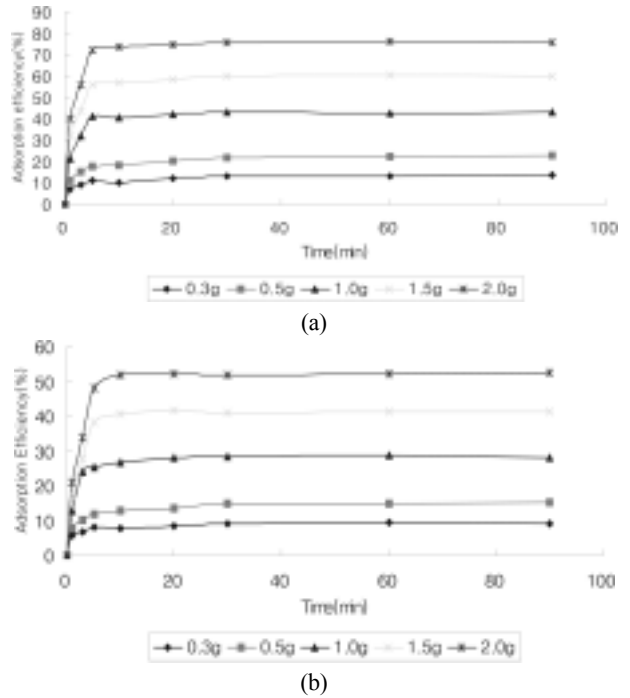


Fig. 3. The removal efficiency of (a) Pb and (b) Cu ions by biosorption depend on biosorbent dosage and reaction time in 200 mg/L of Pb and Cu ions, respectively.

mg/L인 1 L의 중금속 용액에 흡착제인 *Spirulina platensis*의 양을 0.3 g에서 2.0 g까지 변화시키면서 투입할 때, 반응시간에 따른 중금속 제거율(%)을 나타낸 그래프이다. Pb와 Cu의 경우 모두 흡착제 투입 양과 관계없이 약 10~20분 이내에 평형에 도달하였으며, 흡착제 양을 증가시킬수록 중금속 용액의 흡착효율이 좋아져 *Spirulina platensis*를 2.0 g 정도 투입할 때, Pb는 약 76%, Cu는 약 52%의 처리효율을 나타내었다.

Fig. 4는 앞의 경우와 동일한 조건에서 30분간 흡착시킬 때 *Spirulina platensis* 단위 질량(g)당 흡착된 중금속의 양(mg)을 나타낸 것으로, Pb와 Cu의 경우 모두 *Spirulina platensis* 투입량이 증가함에 따라 단위 질량(g)당 흡착되는 중금속의 양(mg)은 감소함을 알 수 있었다. 이러한 결과는

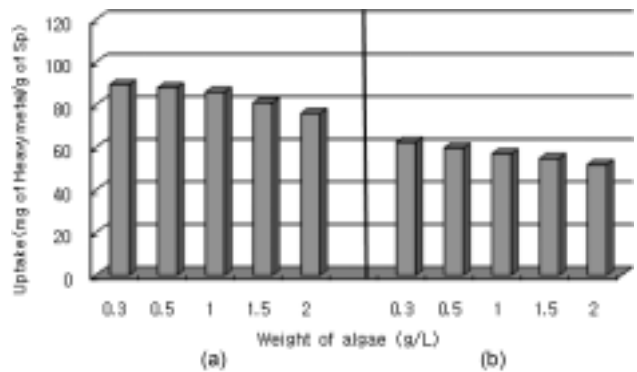


Fig. 4. The biosorption capacity of (a) Pb and (b) Cu by *Spirulina platensis* depend on biosorbent dosage in the Pb and Cu ions solution, respectively.

Horikoshi 등⁸⁾이 특정 미생물을 이용하여 균체량에 따른 우라늄 축적량을 조사한 결과와 유사함을 알 수 있다.

3.1.3. 중금속 흡착시 pH의 영향

중금속 용액의 pH 변화에 따른 *Spirulina platensis*의 중금속 흡착량 변화에 대한 실험결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이때 반응조건은 Pb와 Cu의 농도가 각각 200 mg/L이고 반응온도는 20℃, 흡착제인 *Spirulina platensis*의 투입량은 1.0 g/L로 하였다. Pb와 Cu의 경우 모두 pH가 증가함에 따라 *Spirulina platensis* 단위 g당 흡착된 중금속의 양(mg)도 증가하여 pH 4.5~5.0에서 최대 흡착량을 나타내고, Pb 흡착의 경우가 Cu 보다 pH에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다. pH가 높아짐에 따라 흡착되는 양이 증가하는 이유는 Dolye 등⁹⁾과 Gong 등¹⁰⁾이 주장한 바와 같이 미생물의 주요한 중금속 흡착위치인 세포표면에 존재하는 기능기들이 pH 변화에 의해 양전하 전위가 변하기 때문이거나, 수소이온과 금속이온이 같은 결합 부위에 대한 경쟁적인 흡착 관계를 가지기 때문에 낮은 pH에서는 방해를 더 크게 받는 것으로 생각된다.

3.1.4. 중금속 흡착에 대한 수학적 해석

중금속 흡착실험 결과를 Freundlich와 Langmuir 흡착등온식으로 해석한 결과를 Fig. 6과 7에 각각 제시하였으며, 흡착실험결과는 Freundlich와 Langmuir 흡착등온식에 높은 상관계수를 나타내어, 이 두 흡착등온식에 의해 흡착결과

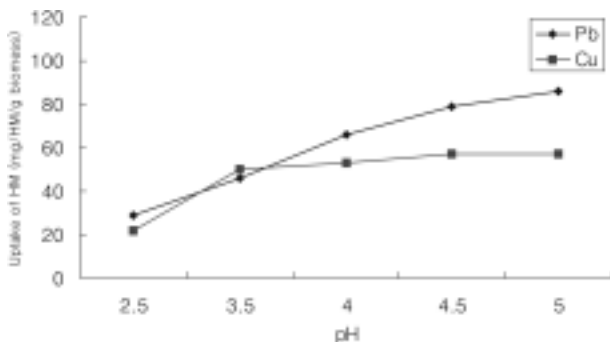


Fig. 5. The effects of pHs on the biosorption capacity of heavy metals by *Spirulina platensis* in 200 mg/L of Pb and Cu ions solution.

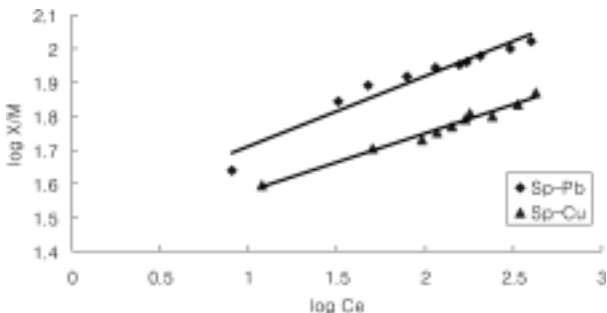


Fig. 6. Freundlich isotherms of Pb and Cu biosorption by *Spirulina platensis*.

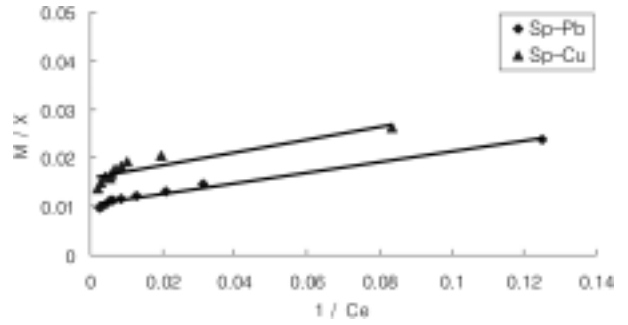


Fig. 7. Langmuir isotherms of Pb and Cu biosorption by *Spirulina platensis*.

Table 1. Isotherm parameters for Pb and Cu biosorption by *Spirulina platensis*

Type of metal	Freundlich			Langmuir		
	R Sq.	K	1/n	R Sq.	a	q _{max}
Pb	0.9399	0.1764	0.2083	0.9816	0.1047	95.24
Cu	0.9804	0.1486	0.1701	0.8431	0.1213	62.50

가 잘 해석됨을 알 수 있었다. 실험결과를 각각의 흡착등온식에 적용하여 구한 여러 상수값과 q_{max}값 등 변수를 Table 1에 제시하였다. Freundlich 흡착등온식에서 구한 K값은 Pb가 Cu보다 높게 나타났고, 1/n값은 0.1 이상 0.5 이하로 유효한 흡착능을 나타내었으며, Langmuir 흡착등온식에서 구한 흡착제 단위 g당 중금속의 최대 흡착량 q_{max}는 Pb의 경우 95.24 mg, Cu의 경우 62.50 mg으로 Pb가 Cu 보다 단위 g당 흡착할 수 있는 중금속의 양(mg)이 더 많음을 알 수 있었다.

3.1.5. 흡착제 표면적과 FT-IR 분석

실험에서 사용한 *Spirulina platensis*와 분말활성탄의 비표면적과 기공부피를 조사한 결과를 Table 2에 나타내었다. 분말활성탄의 경우 비표면적과 기공부피가 *Spirulina platensis*에 비해 월등히 높게 나타났으나, 실험결과에서는 *Spirulina platensis*에 의한 중금속 흡착효율이 더 높게 나타나 *Spirulina platensis*의 중금속 흡착 메커니즘은 pore size와 비표면적의 영향을 받기보다는 표면적의 functional group에 의해 이루어짐을 짐작할 수 있다.

일반적으로 죽은 미생물에 의한 중금속 흡착은 cell surface binding과 polymer binding and transport 과정이 복합적으로 일어나는 것¹¹⁾으로 알려져 있다. 미생물의 중금속 축적 기작은 세포내부의 흡수과정과 세포벽의 단백질 및 지질의 음전하를 띤 관능기의 결합과정¹²⁾으로 구분할 수 있으며, 그 중 carboxyl group, phosphoryl group 및 sulfhydryl group이 중요한 중금속 결합부위로 알려져 있다.¹³⁾ 본 연구에서 사용된 *Spirulina platensis*에 의한 중금속 흡

Table 2. Physical properties of adsorbent

Adsorbent	SBET[m ² /g]	V Tot[cc/g]
Activated Carbon(powder)	1339	0.503
<i>Sp. platensis</i> (powder)	560.1	0.220

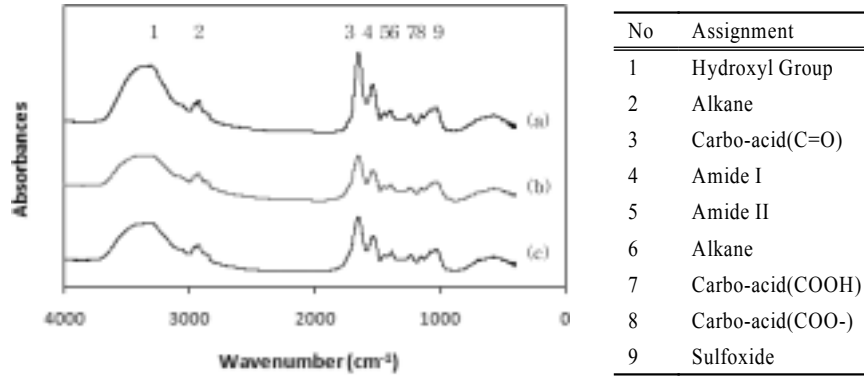


Fig. 8. FT-IR spectra of *Spirulina platensis* (a) before adsorption, (b) after biosorption of Pb and (c) after biosorption of Cu.

착 메커니즘과 그 영향정도를 명확하게 규명하기는 어려우나, 적어도 중금속 흡착에 영향을 주는 *Spirulina platensis*의 표면 작용기에 대하여 알아보기 위해 FT-IR(Fourier Transform Infrared Spectroscopy) 분석을 실시하였으며, 결과를 Fig. 8에 제시하였다. 흡착 전과 후 FT-IR 결과를 비교해 본 결과 amine, hydroxyl, carbo-acid, amide 그리고 alkane이 표면 작용기로 존재함을 확인하였고, 그 중 hydroxyl group, carbo-acid 그리고 amide이 가장 큰 변화를 보임에 따라 이들 작용기가 주로 Pb와 Cu의 흡착에 관여하는 것으로 추정된다.

3.2. Ca-alginate에 고정된 *Spirulina platensis*의 흡착 특성

3.2.1. 중금속 농도와 흡착시간에 따른 흡착 특성

Ca-alginate에 고정된 *Spirulina platensis* 고정체에 대하여 중금속 용액의 농도 및 흡착시간에 따른 중금속 농도 변화 실험결과를 Fig. 9에 나타내었다. 이때 실험조건은 온도 20°C, pH 5.0에서 중금속 용액 1.0 L에 대해 고정체 30 g을 투입하였다. 고정화시키지 않은 *Spirulina platensis* 균체의 경우와 달리 흡착평형에 도달하는 시간이 40분 정도로 길어지는 것을 볼 수 있는데 이는 중금속이온이 Ca-alginate 내부 침투에 대한 확산제한(diffusion limitation)에 기인하는 것으로 판단되나, 확산제한이 크지 않아 실제 공정에서 응용이 가능할 것으로 생각된다.

Fig. 10은 중금속 농도에 따른 조류 *Spirulina platensis* 단위 질량(g)당 흡착된 중금속의 양(mg)을 나타낸 것으로, 균체의 경우와 마찬가지로 중금속 농도가 증가함에 따라 조류의 단위 g당 흡착된 중금속의 양도 점차 증가하며, 200 mg/L 이상의 고농도로 갈수록 *Spirulina platensis*의 중금속 단위 흡착량도 증가하였으나 증가폭은 감소하였다. 중금속 용액의 농도가 200 mg/L, pH 5.0, 온도 20°C의 조건에서, 고정체에 의한 중금속 흡착량(mg)은 *Spirulina platensis*의 단위 g당으로 환산할 경우 Pb가 61.12 mg 정도, Cu가 52.2 mg 정도로 나타나, 균체의 경우와 비교할 때 전 농도 범위에서 25.2~32.4% 정도 흡착량이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 고정화시 포획에 의해 금속이온들과 반응하는 기능기들의 일부가 반응하지 못하게 되었거나, 확산 제한에 기인하는 것으로 판단된다.

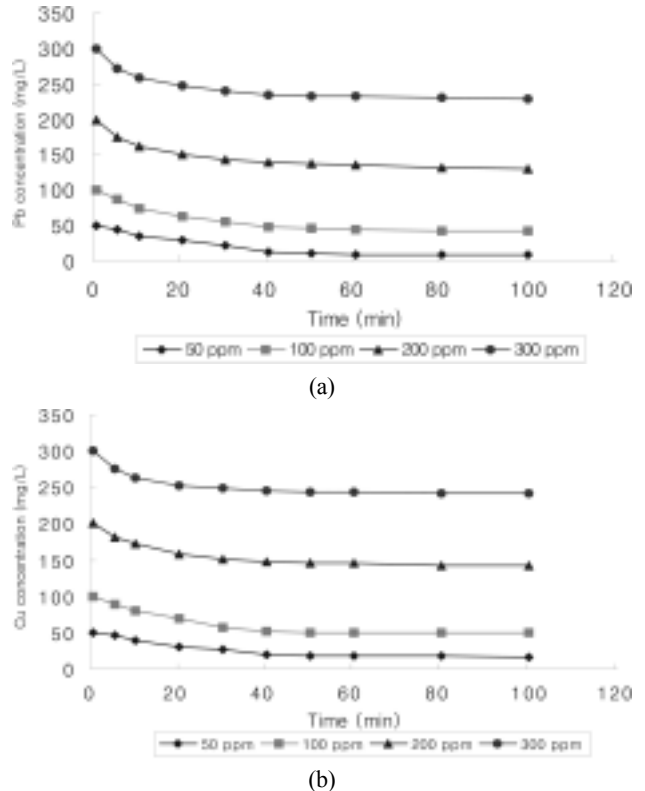


Fig. 9. The concentration profiles of (a) Pb and (b) Cu for biosorption by *Spirulina platensis* immobilized Ca-alginate bead according to the reaction time in the different concentration solutions of Pb and Cu, respectively.

3.2.2. 흡착제 양에 따른 중금속의 흡착량

Pb와 Cu의 농도가 각각 200 mg/L, pH 5.0, 20°C인 중금속 용액 1.0 L에 대하여 *Spirulina platensis* 고정체 투입 양을 5.0에서 30.0 g까지 변화시켜 가면서 실험한 흡착능 변화를 Fig. 11에 나타내었다. 고정체 투입 양이 증가함에 따라 중금속 용액 내에 잔존하는 중금속 농도는 감소하여 30.0 g 투입하였을 경우 Pb는 52%, Cu는 50% 정도의 처리효율을 얻을 수 있었으나, 조류 무게로 환산한 *Spirulina platensis* 단위무게(g)당 흡착된 중금속 양은 감소하였는데 이는 동일 반응용액 용적에서 흡착제 양이 증가할 경우 용액내 잔류하는 중금속 농도가 상대적으로 낮

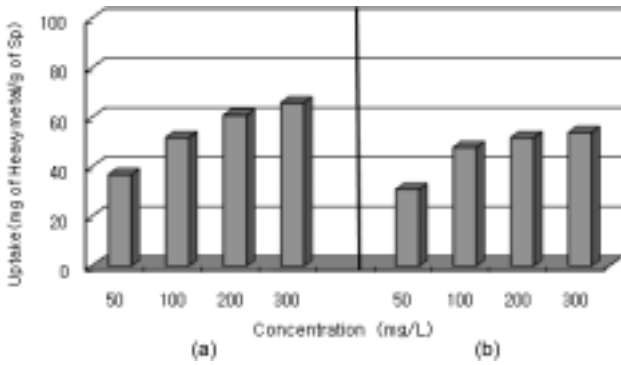


Fig. 10. The biosorption capacity of (a) Pb and (b) Cu by *Spirulina platensis* immobilized Ca-alginate bead in the different concentration solution of Pb and Cu, respectively.

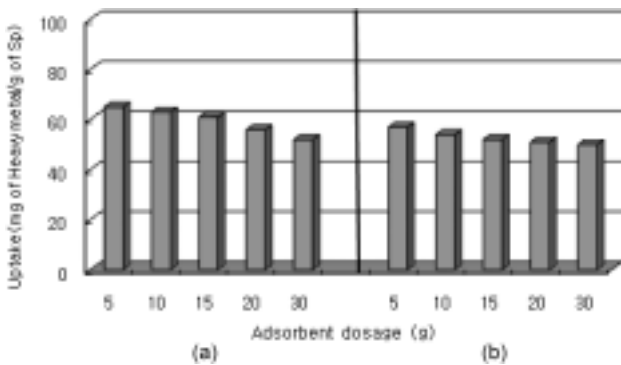


Fig. 11. The biosorption capacity of (a) Pb and (b) Cu by *Spirulina platensis* immobilized Ca-alginate bead depend on adsorbent dosage.

아져 흡착평형이 용액쪽으로 이동하였기 때문으로 생각되었고, 이러한 결과는 균체에 의한 중금속 흡착실험에서도 동일하게 나타났다.

3.2.3. 중금속 흡착시 pH의 영향

Ca-alginate를 이용하여 *Spirulina platensis*를 고정화 시킨 고정체에 의한 중금속 흡착시 pH에 대한 영향을 알아보기 위해 pH를 2.5에서 5.0까지 변화시키면서 실험한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 균체에 의한 흡착과 마찬가지로

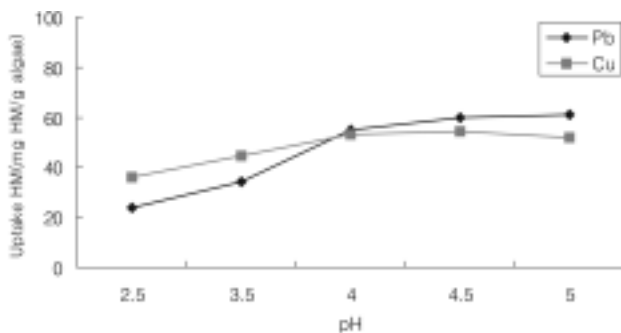


Fig. 12. The effects of pHs on the biosorption capacity of heavy metals by *Spirulina platensis* immobilized Ca-alginate bead in Pb and Cu ions solution.

pH의 증가함에 따라 흡착능도 점차 증가하였으며, Pb의 경우가 Cu에 비해 pH 변화에 더 민감하였다. 그러나, 균체에 의한 중금속 흡착과 비교하면 pH가 낮은 경우 흡착량의 감소가 적었으나 pH가 증가하면서 상대적으로 흡착량의 감소가 크게 나타나 전체적으로 pH 변화에 따른 흡착량의 차이가 감소하였음을 알 수 있으며, 이는 Aickin 등¹⁴⁾이 균주의 고정화는 고정화시키지 않은 경우에 비해 pH의 변화에 대해 더 안정성이 높다고 보고한 것과 유사한 결과이다.

4. 결론

효율적인 생물 흡착제 개발을 위하여 *Spirulina platensis*에 대한 중금속 Pb와 Cu의 흡착특성을 조사하고, Ca-alginate로 고정할 때 흡착특성 변화에 대해 실험한 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) *Spirulina platensis*의 단위 무게(g)당 중금속 흡착량(mg)은 Pb가 Cu에 비해 높게 나타났으며, 동일 조건에서 분말활성탄의 경우와 비교할 때 더 높은 흡착능을 나타내었다.
- 2) *Spirulina platensis*에 의한 중금속 Pb와 Cu의 흡착은 20분 이내에 흡착평형에 도달하였으며, 초기 중금속 농도가 높을수록, 조류의 양이 적을수록 단위 무게(g)당 흡착량(mg)은 높은 것으로 나타났다. 또한, 용액의 pH가 증가함에 따라 흡착량도 증가하여 pH 4.5~5.0에서 최대 흡착량을 나타내었다.
- 3) *Spirulina platensis*에 의한 Pb와 Cu 흡착은 Freundlich와 Langmuir 흡착등온식에 의해 잘 해석 되었으며, 흡착제 단위 질량당 중금속의 최대 흡착량(q_{max})은 Pb의 경우 95.24 mg/g, Cu의 경우 62.50 mg/g으로 나타났다.
- 4) FT-IR 분석결과 *Spirulina platensis*에 의한 Pb와 Cu의 흡착에 관여하는 Functional group은 주로 Hydroxyl group과 Amide group, Carboxyl group 등인 것으로 나타났다.
- 5) *Spirulina platensis*를 Ca-alginate에 고정화한 고정체에 대한 중금속 흡착은 *Spirulina platensis* 균체에 비해 조류 단위무게(g)당 흡착하는 중금속 양(mg)은 약간 감소하였으나, 감소정도나 확산제한(diffusion limitation)이 크지 않았다.

사사

이 논문은 2006학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

1. Say, R., Denizli, A., and Arica, M. Y., "Biosorption of cadmium(II), lead(II) and copper(II) with the filamentous fungus, Phanerochate chrysosporium," *Bioresour. Technol.*,

- 76, 67~70(2001).
2. Kandah, M., Abu Al-Rub, F. A., Al-Dabaybeh, N., "The aqueous adsorption of copper and cadmium ions on sheep manure", *Adsorpt. Sci. Technol.*, **21**, 501~509(2003).
 3. Volesky, B., "Biosorption of Heavy Metals," CRC Press, Inc.(1990).
 4. Angerer, A., Klipp, B., and Braun, V., "Iron transport systems of *Serratia marcescens*," *J. Bacteriol.*, **174**(4), 1378~1387(1992).
 5. Freundlich, H., "Colloid and Capillary Chemistry," Methuen, London(1926).
 6. Langmuir, I. J., "The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum," *J. American Chem. Soc.*, **40**, 1361~1403(1918).
 7. 北川睦夫, "활성탄 수처리 기술과 관리," 신탉문화사(1995).
 8. Horikoshi, T. A., Nakajima, and Sakaguchi, T., "Studies on the accumulation of heavy metal elements in biological systems. XIX. Accumulation of uranium by microorganisms," *European Journal of Applied Microbiology and Biotechnology*, **12**, 90~96(1981).
 9. Doyle, R. J., Matthews, T. H., and Streips, U. N., "Chemical basis for selectivity of metal ions by the *Bacillus subtilis* cell wall," *Journal of Bacteriology*, **143**(1), 471~480(1980).
 10. Gong, R., Ding, Y., Liu, H., Chen, Q., and Liu, Z., "Lead biosorption and desorption by intact and pretreated *spirulina maxima* biomass," *Chemosphere*, **58**, 125~130(2005).
 11. Mitchell, R., "Environmental microbiology," John Wiley and Sons, New York, 83~101(1993).
 12. Muraleedharan, T. R. and Venkobachar, C., "Mechanism of biosorption of copper(II) by *Gonoderma iucidum*," *Biotechnol. Bioeng.*, **35**, 320~325(1990)
 13. Tobin, J. M., Copper, D. G., and Neufeld, R. G., "Investigation of the mechanism of metal uptake by denatured *Rizopus arrhizus* biomass," *Enzyme Microbiol. Technol.*, **12**, 591~595(1990).
 14. Aickin, R. M. and Dean, A. C. R., "Lead accumulation by *Pseudomonas fluorescens* and by a *Citrobacter sp.*," *Microbios Lett.*, **9**, 55~66(1979).