

Pseudomonas cepacia KH410의 중금속 흡착특성

박지원 · 김영희*
동의대학교 미생물학과

담수식물의 근계(根界)에 부착하는 미생물 군집에서 중금속 제거능이 있는 균주인 *Pseudomonas cepacia* KH410을 분리하여 이 균주의 납과 카드뮴, 구리에 대한 생흡착 특성을 조사하였다. 최적 흡착조건은 1.0 g-biomass, pH 4, 그리고 온도는 40°C일 때이었다. 흡착평형은 120분에서, 1000 mg/l 농도에서 이루어 졌다. 흡착용량(K)은 납이 카드뮴에 비해 5.6배, 구리에 비해서는 4.0배 높았으며 흡착강도(1/n)는 납>구리>카드뮴의 순이었다. 흡착강도에 따른 등온식 적용은 납은 Langmuir 등온식, 그리고 구리와 카드뮴은 Freundlich 등온식 적용이 오차가 적었다. 건조 균체를 이용한 최대 흡착은 납과 카드뮴, 구리에 대하여 각각 83.2, 42.0, 65.2 mg/g-biomass 이었다. 중금속 회수를 위한 탈착 실험에서는 납은 0.1 M HCl에서 그리고 카드뮴과 구리는 0.1 M HNO₃에 의하여 높은 탈착율을 나타내었다. 고정화 균체의 강도를 높이기 위한 전처리는 각각의 세 가지 중금속에 대하여 0.1 M KOH가 가장 효율적이었다. 고정화 균체에 의한 최대 흡착은 납, 카드뮴, 구리가 각각 77.8, 58.5, 71.2 mg/g-biomass 이었으며 정금속 혼재시에도 비교적 안정한 상태를 나타내었으며 중금속 제거효율을 비교한 결과 고정화 균체가 이온교환수지에 의한 제거보다 높았다.

Key words □ adsorption, Cd, Cu, Pb, *Pseudomonas cepacia* KH410

현재까지 주목을 받고 있는 중금속 제거방법은 많은 에너지 소모와 고비용의 처리부담, 그리고 처리되는 수질에 독성을 가지는 부산물인 슬러지를 양산한다는 문제점이 제기된 바 있다(4). 또한 지금까지 사용되고 있는 물리적, 화학적 처리방법이 경제적으로나 기술적으로 많은 난관에 직면한 상태이므로(5,6) 이러한 단점을 보완하기 위한 방법의 하나로 생물을 이용한 생흡착법(biosorption)을 적용하여 산업활동의 결과로 유출되는 폐수 중에 존재하는 중금속이온을 제거하고자 하는 노력에 관심을 가지고 있는 중이다.

생흡착법은 생물체 표면이나 내부로 중금속을 흡착시켜 제거하는 방법으로 낮은 농도의 중금속을 처리하는데 매우 효과적이고, 경금속들이 함께 존재하여도 중금속만을 선택적으로 제거하는 것이 가능하다는 장점이 있어(7-10), 이러한 중금속 이온 제거에 미생물들이 이용되고 있다. 생흡착제에 사용되는 미생물의 경우 균체(biomass)가 갖추어야 할 기본적인 요건들은 우선, 중금속의 흡착력이 우수해야하며 양이 풍부하거나 구하기 쉽고 가격이 저렴해야한다는 점이 중요시 되어왔다. 또한 흡착 후에 탈착을 통한 재생이 가능하여 연속적인 사용이 가능하여야 한다는 점등이다. 이러한 조건을 만족시키는 초창기 생흡착법으로 황산화 슬러지를 이용하는 것과 더불어 차츰 조류, 진균류, 효모, 박테리아 균체등을 이용한 여러 흡착제가 개발되면서 급속도로 발전하고 있는 실정이다(7-9).

박테리아나 균류의 경우 생육과정에 금속이온을 영양원으로

요구하며 생물체의 수동적인 흡착과 착 화합물 형성 등의 과정을 통해 금속이온의 제거가 가능하다(10,11). 그러나 중금속에 대한 미생물의 반응이 매우 다양하여 각각의 중금속에 대한 생물학적 기전이 모두 밝혀져 있지 않으며 미생물 자체의 특성에 의한 차이가 매우 다르다는 점이 주목할만하다(12,13). 각 미생물의 중금속에 대한 생리적 반응은 금속농도나 미생물의 유전적인 특성에 따라 차이가 있으므로 이들을 실용화 할 수 있는 가능성에 대한 검토가 있어야 할 것으로 보인다 (11,14).

따라서 본 실험에서는 자연계의 자정작용에 기여하는 미생물 균주 검색의 한 단계로 담수에 서식하는 식물의 근계(根界)에서 분리한 균을 이용하여 최적흡착조건 및 등온식 적용, 중금속 이온별 흡착 특성을 건조균체와 고정화된 상태에서 검토하고 중금속회수를 위한 탈착의 효율성을 살펴보고자 하였다.

재료 및 방법

사용균주 및 배양

본 실험에 사용된 균주는 담수식물 수초의 근계(根系)에서 분리된 균주로 미생물 자동동정 분석기(E-10136, Biolog Microstation, Biolog, USA)로 동정하여 *Pseudomonas cepacia* KH410로 명명하여 사용하였다. 균주를 배양하기 위한 기본 배지로는 Nutrient broth를 사용하였으며 대량 균체 생산을 위하여 각각 1%의 soytone과 yeast extract를 첨가하였고 28°C에서 24시간 진탕 배양한 후 원심분리하여(3000×g, 10분, 4°C) 균체만을 회수하여 사용하였다. 흡착 및 최적조건 확인을 위한 배양은 같은 배지에 0.5% NaCl을 첨가하고 같은 온도 및 시간으로 배양하였다.

*To whom correspondence should be addressed.
Tel: (051) 890-1535, Fax: (051) 890-1532
E-mail: yhKim@hyomin.dongeeui.ac.kr

동결건조

균체를 수분이 없는 상태의 흡착제로서 사용하기 위해 회수된 균체를 멸균수로 현탁, 세척단계를 거치고 다시 원심 분리(3000 ×g, 10분, 4°C)하는 과정을 3회 반복한 후 20 ml의 멸균수에 현탁하여 deep freezer에서 3시간 동안 급속 동결을 시키고 난 뒤, Freezer Dryer (FD-1, EYELA, Tokyo, Japan)에서 72시간 동안 동결건조를 과정을 거친 후, 막자사발에 갈아 분말화 시킨 다음 사용하였다.

중금속 정량

전 과정의 실험에 사용된 중금속의 종류는 $Pb(NO_3)_2$, $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 및 $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ 였으며 모두 2차 탈이온수에 녹여 일정농도로 조절하여 사용하였다. 우선 각각의 Pb^{2+} 및 Cd^{2+} , Cu^{2+} 의 표준용액을 적당한 희석배수로 희석하여 표준 검량선을 작성하였고 예비측정을 거쳐 검량선의 측정 가능 농도범위를 정하고 시료도 검량선의 측정 범위에 들어가도록 희석하여 정량하였다. 반응 중금속 용액에서 중금속의 이온 농도를 정량하기 위해 원자흡광광도계(Atomic adsorption spectrometry, Shimadzu AA6500 series, Japan)를 사용하였다.

흡착 실험

중금속 이온별 흡착강도 결정은 균체를 이용하고 각각의 중금속 속에 대한 흡착평형에 필요한 시간을 결정하기 위해 표준 금속 농도 1000 mg/l인 용액 100 ml과 균체 0.1 g을 500 ml Erlenmeyer flasks에 넣고 30°C 진탕 배양기내에서 150 rpm으로 교반 시키면서 일정시간별로 1 ml의 시료를 채취하였다. 채취한 시료는 원심분리하여(3,000 ×g, 10분, 4°C) 상등액을 적절히 희석한 후 원자 흡광광도계를 사용하여 각각의 잔존 중금속 이온의 농도를 측정하였다.

흡착 최적 조건

흡착의 최적 조건을 위하여 먼저 각각의 중금속 이온용액에 0.05 g, 0.25 g, 0.5 g, 1.0 g의 균체량을 넣고 시간별로 반응을 관찰하여 최종 평형화에 이르는 시점을 관찰하였다. 단일 및 혼합 중금속에서의 흡착반응은 균체량 별 최적 조건하에서 단일 금속속에서의 반응과 혼합된 조건에서의 흡착평형시의 각 금속별 흡착량을 정량하였다. 반응 온도 및 pH별 최적 흡착조건은 결정된 균체량에 반응온도를 변화시켜 흡착평형의 결과를 비교하였으며 최적의 pH 결정은 균체 량과 온도의 조건에서 pH를 달리하여 각각 흡착평형의 결과를 검토하였다.

고정화, Bead화 및 전처리

균체를 이용한 세포의 고정화는 Bready법(5)을 따랐다. 균체 10 g의 wet mass를 8°C 정도의 0.15 M의 NaCl 용액 20 ml에 잘 현탁한 뒤, 8°C의 acrylamide solution (acrylamide monomer 7.5 g, Junsei Chemical, Japan; N,N'-methylenebis-acrylamide 0.4 g, Sigma, USA) 24 ml를 첨가하여 유리막대로 잘 저어 혼합하였다. 그리고 2.5% TEMED (N,N,N',N', tetramethylethyl-

endiamine) 1 ml를 첨가하고 마지막으로 1% ammonium persulfate 5 ml를 첨가 한 뒤 50°C 이하에서 exothermic polymerization 반응이 1시간 정도 일어나도록 하였다. 고정화 세포를 bead화하기 위해 우선 중합반응이 끝난 상태의 균체를 멸균수 100 ml에 넣은 후 마쇄기를 사용하여 갈아주었다. 그리고 정치시켜 여과지로 한번 거른 후 고정화 균체를 모아 사용하였다. 전처리를 위하여 고정화된 세포를 전처리시약인 0.1 M NaOH, 0.1 M KOH, 0.1 M $CaCl_2$ 를 조제하여 각각 현탁한 뒤 4시간 정도 반응시킨 후 균체를 회수하고 탈이온수로 세척한 상태에서 유리 column (18×130 mm)에 충전한 후 흡착평형에서의 제거된 중금속 량을 정량하였다.

고정화 세포를 이용한 중금속 흡착

본 실험 균주의 균체에 의한 중금속 흡착 제거량은 각각의 고정화된 균체를 open column (18×130 mm)에 충전한 후 유속량을 $4.32 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ 로 하여 초기농도 1000 mg/l의 용액을 흘려 100 ml씩 분획물을 받아 잔존 중금속량을 측정해 제거되는 중금속량을 측정하였다. 대조군으로 사용한 음이온 교환 수지에 의한 중금속 흡착 제거량은 strong base styrene type인 Amberlite IRA-410 (chloride form, Sigma, USA) 음이온 교환수지를 동일한 column에 동일한 높이로 충전한 후 같은 초기농도 및 유속으로 흘려서 100 ml씩 분획물을 회수하여 잔존 중금속 량을 측정해 제거되는 중금속량을 측정하였다. 이를 위하여 1000 mg/l의 중금속 반응 용액에 각각 1000 mg/l의 NaCl, $CaCl_2$, KCl, $MgSO_4 \cdot 4H_2O$ 를 넣고 위와 동일한 조건으로 본 실험 균체를 음이온교환수지에서 각각 동일하게 적용하여 분획물을 회수하여 제거된 중금속 량을 측정하였다.

탈착

중금속 회수를 위한 탈착시험은 0.1 M HCl, HNO_3 및 EDTA를 이용하여 1000 mg/l의 농도로 준비한 중금속 용액중에서 100 ml를 취하여 0.5 g biomass로 흡착시킨 후 상등액에서의 잔존 중금속량을 정량하여 제거된 중금속량을 계산하여 기준값으로 하고 탈착제를 처리하고 난 후 상등액의 동일 부피내의 중금속 농도를 측정하여 탈착율의 효율을 측정하였다.

결과 및 고찰

최적 흡착 조건

세균은 그 종류와 금속의 성질에 따라 흡착 정도가 매우 다양하다. 따라서 적용하는 균체의 양이 다르며 각각의 금속에 대한 흡착정도도 다르다. 본 실험 사용 균주에 의한 중금속 흡착 특성 검토에서 균체량 별로의 결과는 Fig. 1에 나타내었다. 균체량 증가에 따른 흡착량 차이의 비교에서는 0.5 g-biomass 이하에서는 흡착량의 증가를 관찰할 수 있었으나 1.0 g-biomass에서는 그 증가율이 별로 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 본 균주의 흡착 최적 균체량으로는 1.0 g-biomass 인 것으로 판단하여 전과정에 적용하였다. Ahn (3) 등의 보고에서는 건조 g-biomass당 납

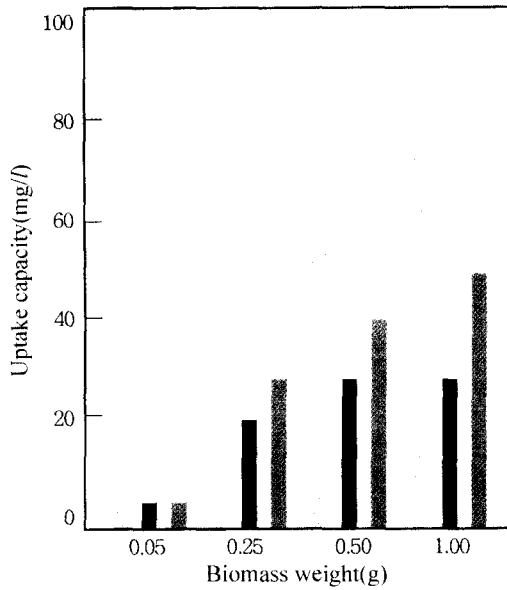


Fig. 1. Uptake capacity of Pb, Cd, and Cu by increasing biomass of *P. cepacia* KH410. Initial concentration, 1000 mg/l. Each histogram represents the average of the three independent experiments. - □ - Pb²⁺, - ■ - Cd³⁺, - ▨ - Cu²⁺

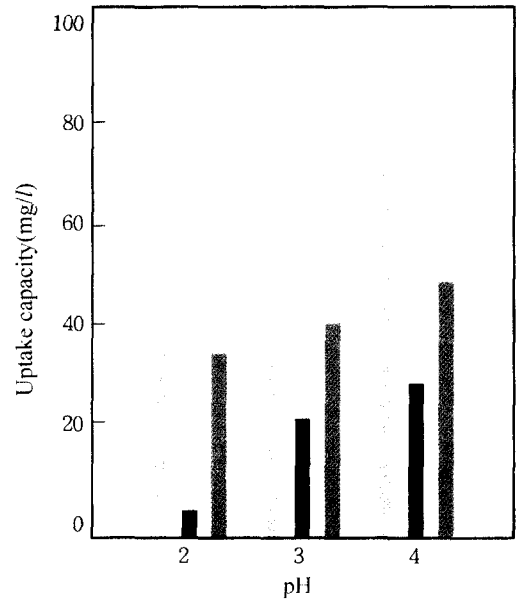


Fig. 3. Effect of pH on uptake capacity of Pb, Cd, and Cu by *P. cepacia* KH410. Initial concentration 1000 mg/l. Each histogram represents the average of three independent experiments. - □ - Pb²⁺, - ■ - Cd³⁺, - ▨ - Cu²⁺

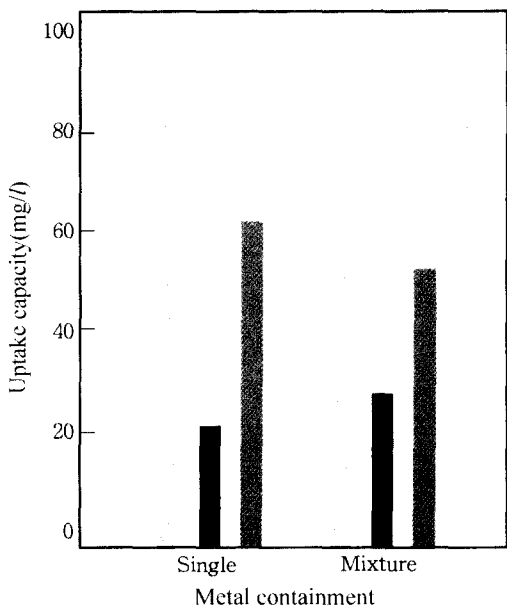


Fig. 2. Comparison of uptake capacity of single and mixed ions of Pb, Cd, and Cu by *P. cepacia* KH410. Initial concentration, 1000 mg/l. Each histogram represents the average of three independent experiments. - □ - Pb²⁺, - ■ - Cd³⁺, - ▨ - Cu²⁺

흡착율이 다르다는 결과를 발표하였는데 이 실험에서는 건조 균체량이 흡착에 영향을 미치는 것으로 사료되었다. 단일 및 혼합된 상태의 중금속에 대한 흡착정도의 비교에서는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 각각의 중금속에 대한 흡착정도는 단일 및 혼합된

상태에서 각기 다른 양상을 나타내었는데 납과 구리는 단일이온으로 존재시에 흡착율이 높은 반면 카드뮴은 혼합된 상태에서 흡착율이 높았다. 중금속 이온이 단일로 존재할 때가 혼합된 상태에서 보다 높은 흡착율을 나타내었는데 이는 여러 중금속이 혼재해 있을 때보다 단일로 존재 할 때가 본 균에 의한 흡착력이 덜 경쟁적으로 작용한다는 것을 의미한다. 따라서 혼합된 상태에서 중금속 이온별 흡착량은 단일로 존재할 때보다 10~15%의 낮은 감소율을 나타내었는데 이는 각각의 중금속이온이 세포 벽에 흡착시 경쟁적으로 작용하여 흡착성이 낮아진다고 Sag (15)는 보고하였다.

중금속 흡착량은 반응 pH 및 온도에 영향을 받는데 pH에 따른 흡착율은 산성 pH 범위에서 흡착이 상승된다는 보고 (2,15,16)에 따라 pH의 범위를 달리하여 흡착율을 비교한 결과 Fig. 3에서 보는바와 같이 본 균은 pH 4에서 가장 높은 흡착율을 나타내었으며 pH 5이상에서는 중금속과의 침전반응이 일어나 흡착정량이 불가하였다. 따라서 흡착조건 검토에서는 사용균주에 따른 최적 pH의 검토가 따라야 할 것으로 보여졌다. 온도에 대한 흡착량은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 온도가 올라감에 따라 중금속의 흡착량도 증가함을 볼 수 있었는데 세 가지 중금속 모두에서 온도가 각각 30°C와 40°C에서 흡착량이 최대로 나타났고 그 중에서는 납의 흡착이 가장 높게 나타났으며 구리나 카드뮴은 같은 양상을 나타내었다. 이와 같은 온도 상승에 따른 흡착량의 증가나 변화는 다른 미생물의 결과에서도 볼 수 있는 현상이 다(15,16). 그리고 10°C의 온도 변화에도 30% 이상의 큰 변화가 없는 것으로 보아 본 균은 담수의 낮은 수온에서도 일정한 흡착율을 지속할 수 있을 것으로 사료된다.

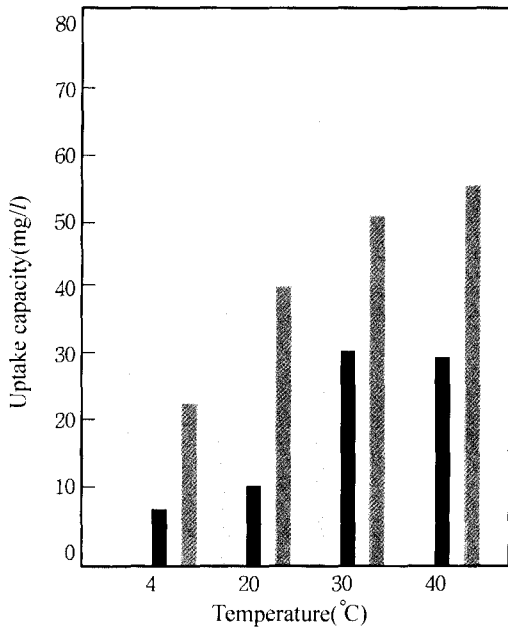


Fig. 4. Effect of temperature on uptake capacity of Pb, Cd, and Cu by *P. cepacia* KH410. Initial concentration, 1000 mg/l. Each histogram represents the average of three independent experiments. - □ - Pb²⁺, - ■ - Cd³⁺, - ▨ - Cu²⁺

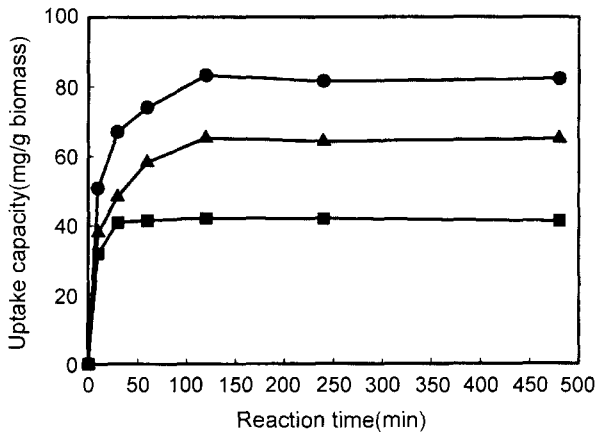


Fig. 5. Time course of Pb, Cd, and Cu biosorption by *P. cepacia* KH410. Each curve represents the average of three independent experiments. - ● - Pb²⁺, - ▲ - Cd³⁺, - ■ - Cu²⁺

흡착 등온식

수용액중의 특정물질이 흡착제에 의해 제거되는 양은 Freundlich 흡착등온식 또는 Langmuir 흡착등온식의 적용을 받는다. 따라서 각각의 중금속에 대한 흡착평형 model을 적용하고자 시간별, 반응용액 농도별 흡착의 평형반응을 유도하여본 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 균체 표면의 중금속 이온에 대한 흡착의 시간경과나 농도증가에 따라 흡착평형의 반응시간은 120분에서 최고에 이르렀는데 세 가지 중금속 모두가 120분대에 최대의 흡착율을 나타내었다. 그 중에서도 납의 흡착율이 카드뮴보다 2배

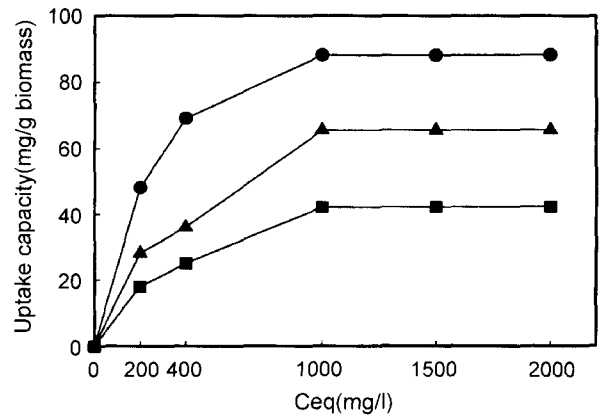


Fig. 6. Biosorption isotherm of Pb, Cd, and Cu by *P. cepacia* KH410. Each curve represents the average of three independent experiments. - ● - Pb²⁺, - ▲ - Cd³⁺, - ■ - Cu²⁺

Table 1. Langmuir model parameters of Pb, Cd and Cu uptake capacity by *P. cepacia* KH410

Heavy metals	q_{max}	b	r^2
Pb ²⁺	83.21	0.005189	0.98
Cd ³⁺	42.02	0.003183	0.98
Cu ²⁺	65.21	0.003147	0.95

The q_{max} is the maximum biosorption labeled with 1.0 g-biomass.

Table 2. Freundlich model parameters of uptake capacity of Pb, Cd and Cu by *P. cepacia* KH410

Heavy metals	K	1/n	r^2
Pb ²⁺	13.1882	0.2610	0.88
Cd ³⁺	2.3186	0.3963	0.93
Cu ²⁺	3.2884	0.4085	0.93

정도 높게 나타나는 차이를 보여 각 중금속별로 같은 시간대일 지라도 차이가 있음을 알 수 있었으며 평형에 이르는 농도는 1000 mg/l일 때 이루어졌다(Fig. 6). 이 결과는 김 등(9)이 *Sargassum horneri*와 *Saccharomyces cerevisiae* 그리고 *Arthrobacter* sp.의 각 균체를 이용한 흡착등온식 적용에서 시간별, 반응용액 농도별 결과에서 얻은 결과와 유사하다. 한편 흡착용량(K)은 Table 1,2에서 나타낸바와 같이 납이 카드뮴 보다는 5.6배 그리고 구리보다는 4.0배 높은 흡착용량을 나타내었는데 특히 본 균주는 납의 흡착이 높은 것으로 나타났다. 그리고 흡착강도(1/n)는 구리가 카드뮴보다는 1.03배 높게, 그리고 납은 카드뮴보다 1.57배 정도 높게 나타났다. 이 결과로 보아 납은 Langmuir 등온식 적용이 보다 효율적인데 반해 구리, 카드뮴은 Freundlich 등온식 적용이 보다 오차가 적었음을 나타내어 주는 결과로 나타났다(15). 한편 1 g의 biomass당 흡착의 차이는 납이 가장 높았으며 그리고 구리와 카드뮴의 순으로 나타났다.

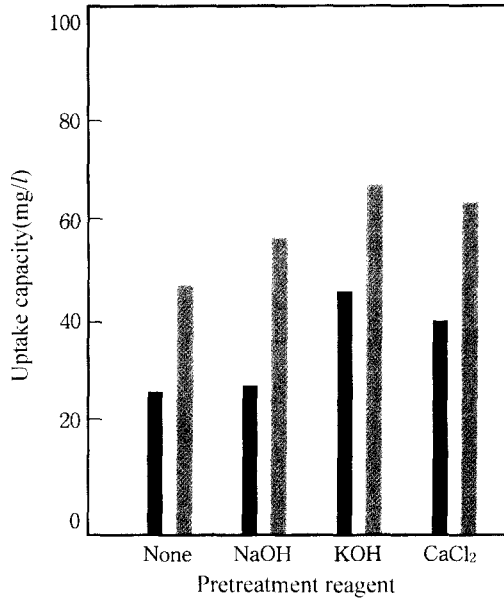


Fig. 7. Effect of pretreatment reagents on uptake capacity of Pb, Cd, and Cu by immobilized *P. cepacia* KH410. Initial concentration, 1000 mg/l. Each curve represents the average of three independent experiments. - ▨ - Pb²⁺, - ■ - Cd³⁺, - ▩ - Cu²⁺

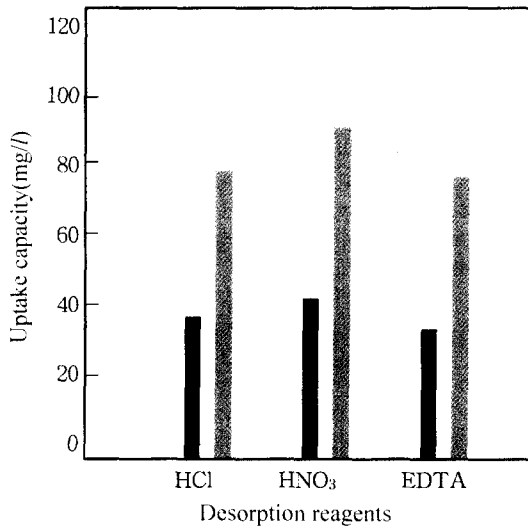


Fig. 8. Desorption efficiency of Pb, Cd, and Cu by desorption reagents on immobilized *P. cepacia* KH410. Initial concentration, 1000 mg/l. Each histogram represents the average of three independent experiments. - ▨ - Pb²⁺, - ■ - Cd³⁺, - ▩ - Cu²⁺

전처리 및 탈착율

흡착율을 유도하기 위한 전처리 시험에서는 Fig. 7에서 나타난 바와 같이 KOH나 CaCl₂가 높은 흡착율을 유도하였는데 KOH가 전체적으로 세 가지 중금속에 대하여 골고루 흡착력을 높이는

결과를 나타내었다. 전처리 시약의 균체에 대한 처리는 기존의 세포벽의 많은 biopolymer에 존재하는 음이온을 유도하는 작용기의 증가를 유도하기 위한 과정이고 이러한 전처리 시약별 중금속 흡착 효율성은 KOH나 CaCl₂ 등의 전처리시 높은 흡착율을 유도할 수 있다고 보고된 바(2,16)있다. 본 실험의 결과에서도 납의 경우 전처리가 전반적으로 효율적임을 알 수 있었는데 이것은 납 이온이 본 균주의 균체에 대한 흡착강도가 상대적으로 높은 것이 원인이라 사료된다. 전체적으로 전처리를 하였을 때가 하지 않았을 때 보다 흡착율이 증가하는 것으로 보아 흡착율을 높이기 위하여 전처리 과정을 거치는 것이 필요할 것으로 판단되어 졌다. 이 같은 결과는 *Arthrobacter* sp. (2)경우 전처리 시약을 납이온에 처리하였을 때 흡착이 높아지는 양상의 결과를 얻었으며 각 중금속 이온에 대한 흡착율의 효율도 상승되었다는 결과와도 일치함을 볼 수 있다. 한편 중금속의 회수를 위한 탈착에 대한 효율성 검증에서는 Fig. 8에서 나타난 바와 같이 납이 모든 탈착 시약에 대해 탈착 효율이 가장 높음을 알 수 있었다. 납은 HCl에 의하여, 그리고 카드뮴과 구리는 HNO₃에 의한 탈착율이 높은 것으로 나타났다. 카드뮴을 제외한 납과 구리에서는 75% 이상의 높은 탈착율을 보였으므로 본 균주의 사용이 납과 구리제거에 보다 높은 회수 결과를 기대할 수 있으리라 사료되었다.

고정화 세포에 의한 중금속 흡착

고정화 균체를 이용한 중금속 제거는 Table 3에서 보는바와 같이 고정화 세포의 각각의 중금속 제거에 있어 경금속 존재시의 제거량을 함께 표현하였는데 그 중 구리가 가장 변화가 심한 결과를 나타내었으며 납이나 카드뮴은 큰 차이를 나타내지 않았는데 이는 세포가 고정화된 상태에서는 전체적으로 경금속의 존재에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그리고 Table 3, 4를 보면 전체적으로 대량의 고농도 중금속제거에 적합하다는 것을 알 수 있다. 각 중금속에 대한 부유상태와 고정화 상태를 비교시 납은 부유상태가 흡착이 높은 반면 카드뮴과 구리는 고정화 상태가 흡착율이 높은 것으로 보아 중금속 종류별로 차이가 다른 것으로 나타나 중금속 종류별로 균체의 상태를 적용할 필요가 있을 것으로 판단되었다. 또한 실험 균주를 고정화된 상태의 균체로 이용 시에는 100 mg/l 미만 농도의 중금속이 함유된 경우

Table 3. Biosorption capacity of Pb, Cd, and Cu in light metals by columns packed with immobilized *P. cepacia* KH410

Light metal ions	Pb ²⁺		Cd ³⁺		Cu ²⁺	
	q _{max}	q _{min}	q _{max}	q _{min}	q _{max}	q _{min}
None	77.78	10.67	58.52	5.64	71.25	9.68
NaCl	70.20	11.20	55.21	4.28	55.24	6.22
KCl	68.20	12.30	54.00	4.00	60.22	7.14
CaCl ₂	61.00	8.40	48.28	8.00	51.20	3.20
MgSO ₄ · 4H ₂ O	58.40	7.80	43.40	9.20	48.10	4.81

unit : mg/g-biomass.

Table 4. Adsorption capacity of Pb, Cd, and Cu in light metals by columns packed with Amberlite IRA-410

Light metal ions	Pb ²⁺		Cd ³⁺		Cu ²⁺	
	q _{max}	q _{min}	q _{max}	q _{min}	q _{max}	q _{min}
None	73.28	13.20	58.52	5.64	70.45	9.58
NaCl	62.40	13.50	55.21	4.28	60.25	8.25
KCl	64.30	11.50	51.00	4.00	59.56	7.14
CaCl ₂	58.20	8.40	48.24	8.70	46.20	5.21
MgSO ₄ · 4H ₂ O	58.40	9.70	41.00	9.20	41.40	4.81

unit: mg/g-biomass

의 제거에 적합하다는 것을 알 수 있었다. 이것은 앞에서 언급된 부유상태의 중금속 흡착율에 비해 본 균의 경우 고정화가 상대적으로 안정된 중금속 흡착을 유도할 수 있는 결과로 사료되어졌고 acrylamide에 의해 고정화된 세포들의 안정성에 의해 그리고 acrylamide 분자의 polymerized ligand에 의한 상승적인 결과를 유도한 것이라 사료되어졌다.

이온교환수지에 의한 중금속 제거

지금까지 알려진 흡착의 기존 처리법의 대표적인 이온교환수지에 의한 중금속 제거를 보면 경금속 부재 시에 흡착 제거량은 상당히 높았으나, 반면 경금속이 존재할 때 그 흡착 제거량은 급격히 감소하는 특징을 나타내었다(2). 본 실험의 결과에서도 Table 4에서 보면 알 수 있듯이 경금속 부재 시에 흡착 제거량은 상당히 높았다. 반면 경금속이 존재할 때 그 흡착 제거량은 급격히 감소하는 특징을 보였다. 경금속이 함께 혼합된 상태에서 중금속이온의 흡착과 제거시 이온교환수지를 이용한 중금속 이온의 흡착 제거와 비교해 흡착율의 안전성이 입증되었고 본 실험균주에 의한 결과도 종합적으로 검토하여 본 결과 앞서 균체를 이용한 흡착에서 경금속에 의한 제거량 감소율 순서는 Mg²⁺ > Ca²⁺ > Na⁺ ≥ K⁺ 나타낼 수 있었다. 이것은 이온교환 수지의 작용기 form이 균체 표면의 다수의 작용기 보다도 단일하게 이루어진 것 때문으로 판단되었다(8). 납의 경우 본 실험 균주의 균체에 대한 친화성이 낮은 것을 알 수 있었고 납에 대한 흡착의 높은 효율성을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 중금속 흡착 후 탈착 시약에 의해 회수되는 중금속 이온의 회수율을 보다 높일 수 있다는 긍정적인 결과를 나타낸다.

이상의 결과로 본 실험 대상 균주인 *P. cepacia* KH410에 의한 중금속 제거력을 일부 확인 하고 지금까지 담수에 서식하는 식물의 뿌리에 부착하여 생활하는 다양한 세균의 군집이 확인되었으므로(1) 이들의 자정력을 검토하여 생흡착제로 이용가능한 우수한 균주의 확보를 자연계에서 찾을 수 있는 자료로 활용할 수 있는 계기로 삼아야 할 것으로 보인다. 앞으로 본 균주에 대한 다른 중금속에 대한 흡착 연구를 병행하여 적용할 수 있는 모델 제시 및 다른 균주와 혼합 사용시의 효율성도 검토되어야 할 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 2001학년도 동의대학교 일반 과제의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. 김영희. 1999. 담수식물 뿌리로부터 세균의 분리. 생명과학회지 9, 525-530.
2. Ahn, K.H. and K.H. Suh. 1998. Removal of lead by *Artherobacter* sp. *J. Korean Environmental Sci. Soci.* 7, 57-61.
3. Ahn, K.H., Y.K. Shi, and K.H. Suh. 1997. Removal, recovery, and process development of heavy metal by immobilized biomass methods. *J. Korean Environmental Sci. Soci.* 6, 61-67.
4. Bitton, G. 1994. Wastewater Microbiology, p. 296-303. John Wiley & Sons, New York.
5. Bready, D. and J.R. Duncan. 1994. Bioaccumulation of metal cations by *Saccharomyces cerevisiae*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 41, 149-154.
6. Brown, N.L., J.R. Lloyd, K. Jakeman, J.L. Hobman, I. Bontidean, B. Mattiasson, and E. Csoregit. 1998. Heavy metal resistance genes and proteins in bacteria and their application. *Biochemical Society Transactions* 26, 218-221.
7. Hamdy, A.A., 2000. Removal of Pb²⁺ by biomass of marine algae. *Current Microbiology* 41, 239-245.
8. Hassen, A., N. Saidi, M. Cherif, and A. Boudabous. 1998. Effects of heavy metals on *Pseudomonas aeruginosa* and *Bacillus thuringiensis*. *Bioresource Technology* 65, 73-82.
9. Kim, D.S., J.H. Suh, and S.K. Song. 2000. A variation of microorganism by the biosorption of Pb²⁺. *J. Korean Environmental Sci. Soci.* 9, 331-337.
10. Kotrba, P., L. Doleckova, V.D. Lorenzo, and T. Ruml. 1999. Enhanced bioaccumulation of heavy metal ions by bacterial cells due to surface display of short metal binding peptides. *Appl. Environ. Microbiol.* 65, 1092-1098.
11. Mago, R. and S. Srivastava. 1994. Uptake of zinc in *Pseudomonas* sp. Strain UDG26. *Appl. Environ. Microbiol.* 60, 2367-2370.
12. Mullen, M.D., D.C. Wolf, F.G. Ferris, T.J. Beveridge, C.A. Flemming, and G.W. Bailey. 1989. Bacterial sorption of heavy metals. *Appl. Environ. Microbiol.* 55, 3143-3149.
13. Nies, S.H. 1999. Microbial heavy-metal resistance. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 51, 730-750.
14. Panichev, N.A., A.O. Diakov, and K.V. Kvitko. 1997. Bio-transformation of cadmium species by microorganism. *Canadian J. Analytical Sciences and Spectroscopy* 42, 16-20.
15. Sag, Y. and T. Kutsal. 1996. Fully competitive biosorption of chromium and iron ions from binary metal mixtures by *R. arrhizus*: Use of the competitive Langmuir model. *Process Biochemistry* 31, 573-585.
16. Suh, J.H., J.W. Yun, and D.S. Kim. 1999. Effect of pH on Pb²⁺ accumulation in *Saccharomyces cerevisiae* and *Aureobasidium pullulans*. *Bioprocess Engineering.* 20, 471-477.

(Received July 26, 2001/Accepted September 3, 2001)

ABSTRACT: Characteristics of Heavy Metal Biosorption by *Pseudomonas cepacia* KH410

Ji-Won Park and Young-Hee Kim (Department of Microbiology, Dong-Eui University, Pusan 614-714, Korea)

An ubiquitous bacterium, *Pseudomonas cepacia* KH410 was isolated from fresh water plant root and identified. Adsorption of heavy metals of lead, cadmium and copper by this strain was investigated. Optimal conditions for adsorption was 1.0 dry g-biomass, at pH 4.0 and temperature of 40 °C. Adsorption equilibrium reached maximum after 120 min in 1000 mg/l metal solutions. The adsorption capacity (K) of lead was 5.6 times higher than cadmium and 4.0 times higher than that of copper. Adsorption of lead was applicable for Langmuir model whereas Freundlich model for cadmium and copper, respectively. Adsorption strength (1/n) of heavy metal ions were in the order of lead>copper>cadmium. Uptake capacity of lead, cadmium and copper by dried cell was 83.2, 42.0, 65.2 mg/g-biomass, respectively. Effective desorption was induced 0.1 M HCl for lead and 0.1 M HNO₃ for cadmium and copper. Pretreatment to increase ion strength was the most effective with 0.1 M KOH. Uptake by immobilized cell was 77.8, 58.5, 71.2 mg/g-biomass for lead, cadmium and copper, respectively. The immobilized cell was more effective than ion exchange resin on removal of heavy metals in solution containing light metals.