

유류와 중금속으로 오염된 토양에서 분리한 미생물의 Pb와 Cd 생물흡착 특성

김상호¹ · 전효택^{2*} · 이종운³

¹STX 에너지, ²서울대학교 에너지자원공학과, ³전남대학교 에너지자원공학과

Biosorption of Pb and Cd by Indigenous Bacteria Isolated from Soil Contaminated with Oil and Heavy Metals

Sang-Ho Kim¹, Hyo-Taek Chon^{2*} and Jong-Un Lee³

¹STX Energy Co. Ltd, STX Namsan Tower, Seoul 100-958, Korea

²Department of Energy Resources Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

³Department of Energy and Resources Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

Indigenous bacterium which shows a tolerance to high metal toxicity was isolated from soil concomitantly contaminated with oil and heavy metals. The characteristics of the bacterium for Pb and Cd biosorption was investigated under the various experimental conditions such as bacterial growth phase, the initial metal concentration, the input biomass amount, temperature and pH. The Langmuir adsorption isotherm modeling was described to know the capacity and intensity of biosorption. The low initial concentration of heavy metals and high biomass has a maximum heavy metal removal efficiency, but biosorption capacity of Pb and Cd has different values. Biosorption efficiency was highest in the end of the microbial growth stage and under pH 5~9 condition, but was less affected by temperature variation of 25~35°C. The maximum biosorption capacity for Pb and Cd was 62.11 and 192.31 mg/g, respectively and each R^2 was calculated as 0.71 and 0.98 by applying Langmuir isothermal adsorption equation. Biosorption for Cd was considered as monomolecular adsorption to single layer on the surface of cells, whereas biosorption for Pb was considered as accumulation process into the cell by the microbial metabolism and precipitation reaction with anion of bacteria.

Key words : indigenous bacteria, biosorption, removal of heavy metals

유류 및 중금속으로 오염된 토양에서 Pb 및 Cd에 내성을 갖는 미생물을 분리하여 미생물 내 중금속 흡착 특성을 조사하였다. 분리한 토착미생물의 Pb 및 Cd의 흡착특성과 흡착에 영향을 미치는 요인 중에 성장단계, 중금속 농도, 생물량, pH, 온도에 따른 영향을 비교하였다. 또한 흡착등온식을 적용하여 중금속의 흡착용량과 흡착강도를 알아보았다. 낮은 중금속 초기 농도와 높은 생물량에서 높은 중금속 제거 효율을 가지며 중금속 마다 다른 흡착 효율을 보여 주었다. 흡착 효율은 미생물 성장 말기, pH 5~9 조건에서 최적의 효율을 나타내었으나, 25~35°C에서 온도 변화에 따른 영향은 미미하였다. 생물흡착 과정을 Langmuir 등은 흡착식에 적용하면, 이론적 최대 흡착량은 Pb와 Cd에 대해서 각각 62.11과 192.31 mg/g로 나타났고, R^2 가 0.71과 0.98로 계산되었다. Cd는 세포 표면의 단일 층에 단분자 흡착에 의한 생물흡착이 진행되었으나, Pb는 미생물 대사 작용을 통한 세포 내로의 축적 작용과 미생물 내 음이온과의 반응에 의한 침전물 형성작용 등을 통하여 생물흡착이 진행된 것으로 판단된다.

주요어 : 토착 미생물, 생물 흡착, 중금속 제거

1. 서 론

유해한 중금속을 처리하는 방법에는 산화, 환원, 침

전, 여과, 수분증발, 이온교환수지 이용 등의 물리화학적 방법이 이용되고 있으나 이러한 방법은 고비용과 저효율의 문제점이 있어 최근 중금속의 물리화학적 처리

*Corresponding author: chon@snu.ac.kr

방법을 대체할 수 있는 방법으로 생물학적 처리 방법이 대두되고 있다. 생물학적 처리방법 중 생물흡착은 다당류, 단백질 및 지방질로 구성된 미생물 표면에 존재하는 carboxyl, amino, phosphate, sulfate 및 hydroxyl 등의 작용기에 중금속이 흡착되는 현상을 말한다. 중금속은 음전하를 지닌 세포벽 성분에 흡착될 뿐만 아니라, 세포내 단백질과의 화합물을 형성하거나 세포내 효소에 의해 불용성 물질로 변화(산화, 환원, 메틸화)하기도 하며, 생체물질 자체가 가지고 있는 Ca, Mg, K 및 Na 등의 금속들과 중금속간의 이온교환에 의해서도 제거될 수 있다. 생물흡착(Biosorption) 방법은 100 mg/L 이하의 저농도로 존재하는 중금속 제거시 매우 효과적이며, 자연계에서 흔한 이온(Na, Ca, K 등)에 친화력이 약하여 중금속만을 선택적으로 제거할 수 있고 넓은 범위의 pH(pH 3~9)에서도 사용할 수 있다. 또한 흡착이 1시간 이내로 빨리 진행되어 다량의 중금속 이온을 동시에 제거할 수 있고, 상온에서 반응이 이루어지므로 비용이 절약되는 장점을 가지고 있다 (Gavrilescu, 2004).

생물흡착 처리 기술은 미생물의 특성, 오염물의 성질 및 환경적 요인들에 의해 영향을 받는다. 미생물의 특성을 결정하는 요인으로 미생물의 생물량, 종류, 성장단계, 오염 환경에 대한 순응력 등이 있으며, 오염물의 성질은 오염물질의 양, 오염물질의 상태에 의해 좌우된다. 환경적 요인으로 미생물의 성장과 중금속의 형태에 영향을 미칠 수 있는 인자들이 포함되는데 온도, pH, 산소, 물, 영양분, 토양의 특성 등이 이에 해당한다(Aksu, 2001). 이 연구에서는 중금속에 내성을 갖고 흡착에 활성을 나타내는 미생물을 분리하여, 분리한 토착미생물의 흡착특성과 성장시간, 초기농도, 생물량, pH, 온도가 중금속 흡착에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험을 실시하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 토착미생물 분리

중금속에 내성을 갖는 토착미생물을 분리하기 위하여 인천광역시 유류 및 중금속으로 오염된 토양을 대상으로 실험을 실시하였다. 채취한 토양시료 5g 에 3차 증류수 50 mL을 넣고 교반하여 토양이 가라앉을 때까지 기다린 후 상등액 0.1 mL을 취해 Pb와 Cd가 각각 1,000 mg/L 함유된 LB agar 배지(배지조성: Trypton 10 g/L, Yeast extract 5 g/L, NaCl 10 g/L, Agar 15 g/L)에 유리봉으로 접종시키고 상온에서 24시간 배양시켰

다. 콜로니가 형성되면 형성된 콜로니를 따서 평판배지에서 순수분리하고 항은 진탕 배양기에서 24시간 배양하였다. 배양 후 LB agar 배지에서 순수 분리된 균체 한 백금이씩 취하여 납이 100 mg/L 함유된 LB broth 배지(배지조성: Trypton 10 g/L, Yeast extract 5 g/L, NaCl 10 g/L) 50 mL에 접종시키고, 25°C, 150 rpm으로 진탕 배양기에서 24시간 배양하였다. 3회 계대배양(subculture)시켜 5 mL 씩 취해 500 mL의 LB 액체 배지에서 24시간 배양하고 원심분리 후 토착 미생물을 분리하였다. 분리된 미생물은 16s rRNA 분석을 통하여 동정을 실시하였다.

2.2. 성장단계에 따른 생물흡착 실험

미생물의 성장 진행 속도를 파악하기 위하여 미생물을 배양하면서 두 시간마다 배양액을 채취하여 UV-vis spectrophotometer를 이용하여 600 nm의 파장에서 용액의 광밀도(optical density)를 측정하였다. 측정결과를 바탕으로 미생물을 LB broth 배지 500 mL이 들어있는 Nalgen bottle에 접종 후 각각 8, 10, 14, 16, 24 시간이 경과한 후 미생물을 원심분리하고 3회 증류수로 세척 후 60°C, 2시간 조건에서 건조시켰다. 성장한 시간이 상이한 분리된 미생물에 Pb와 Cd의 농도가 각각 100 과 10 mg/L가 되고, 토착 미생물량은 1 g/L가 되도록 용액을 제조하였다. 이 용액 50 mL을 항은 진탕 배양기에서 25°C, 150 rpm의 조건으로 교반하였고, 10 분 간격으로 1시간 동안 시료를 채취하여 3,000 rpm에서 10분간 원심 분리하여 상등액을 취해 2 µm 크기로 필터링한 후에 원자흡광분광기(AAS, Atomic Absorption Spectrometer, Perkin Elmer, AAnalyst 100)로 용액 중 남아있는 Pb와 Cd의 농도를 측정하였다.

2.3. 초기 농도에 따른 생물흡착 실험

초기 Pb 및 Cd 농도에 따른 흡착효율 측정을 위해 Pb 농도는 PbCl₂ (Junsei)를 사용하여 50, 100, 200, 400, 800 mg/L로 조절하였고, Cd 농도는 CdCl₂ (Aldrich)를 이용하여 5, 10, 20, 50, 100, 200, 400 mg/L가 되게 하였다. 다른 조건으로 16시간 배양한 1 g/L 미생물량, 최종 용액의 부피는 50 mL이 되게 조절하였다. 기타 흡착실험 조건 및 분석과정은 2.2결과 동일하다.

2.4. 생물량(biomass)에 따른 생물흡착 실험

생물량별 흡착 특성을 알아보기 위하여 Pb 의 경우 16시간 배양한 생물량을 0.5, 1, 2, 4 g/L로, Cd의 경

우 생물량을 0.1, 0.5, 1, 2, 3 g/L로 조절하였다. 초기 농도는 Pb 100 mg/L와 Cd 10 mg/L 용액이 되도록 제조하였다. 기타 흡착실험 조건 및 분석과정은 2.2절과 동일하다.

2.5. pH 변화에 따른 생물흡착 실험

pH에 따른 흡착효율 실험을 위해 용액의 pH를 HCl과 NaOH를 이용하여 각각 3, 5, 7, 9로 조절하였으며, 16시간 배양한 미생물량을 1 g/L 주입하고, 초기 농도 Pb 100 mg/L와 Cd 10 mg/L 용액이 되도록 제조하였다. 기타 흡착실험 조건 및 분석과정은 2.2절과 동일하다. 미생물에 의하지 않은 순수한 pH의 영향을 알아보기 위하여 비교시료로 미생물 대신 증류수를 첨가한 용액에 대해서도 마찬가지로 방법으로 실험을 수행하였다.

2.6. 온도 변화에 따른 생물흡착 실험

온도에 따른 흡착효율 파악을 위해 용액의 온도를 항온 진탕 배양기를 이용하여 25°C와 35°C로 각각 맞추어 Pb 100 mg/L와 Cd 10 mg/L가 되고, 1 g/L의 16시간 배양한 미생물 용액이 되도록 하여 총 부피 50 mL의 혼합 용액을 만들었다. 기타 흡착실험 조건 및 분석과정은 2.2절과 동일하다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 토착 미생물 분리

유류 및 중금속으로 오염된 토양에서 Pb 및 Cd에 내성을 갖는 토착 박테리아를 분리하기 위하여 LB 고체 배지에 Pb와 Cd를 1,000 mg/L를 투입하였고, 이러한 고농도의 중금속 농도에 내성을 갖고 생존한 미생물을 분리하였다(Fig. 1). 분리된 미생물은 SPb-1이



Fig. 1. Colonies of Pb and Cd tolerant bacteria isolated from oil-contaminated soil.

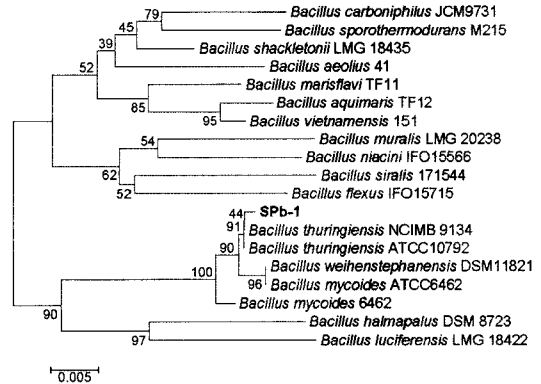


Fig. 2. Phylogenetic tree showing position of isolated bacteria (SPb-1) identified by 16s ribosomal RNA sequencing.

라 명명하였고, 16s rRNA로 분석한 결과 Firmicutes에 속하는 *Bacillus thuringiensis* NCIMB와 99.4%의 상동성을 가지고 있었다(Fig. 2).

3.2. 성장단계에 따른 생물흡착

미생물은 성장 단계별로 성장 매커니즘이나 대사가 다르다. 따라서 생육 단계에 따라 중금속을 흡착하는 정도가 다르게 나타날 수 있다. 분리된 미생물인 SPb-1의 성장 곡선을 Fig. 3에 나타내었고 미생물의 성장단계에 따른 Pb와 Cd의 흡착율은 Fig. 4과 Fig. 5에 나타내었다. 토착 박테리아는 배양 후 약 20시간 이후에 정체기(stationary phase)가 나타났으며, 16시간 이상 성장한 박테리아에서 Pb는 90%, Cd는 60%의 높은 흡착 능력을 보였고, 성장단계가 높을수록 흡착율은 증가하는 경향을 가지고 있었다. 그러나 24 시간 동안 성장한 박테리아의 흡착율은 Pb의 경우 90%, Cd의

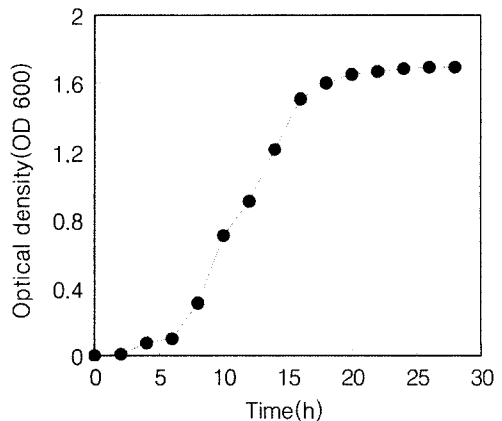


Fig. 3. Growth curves of the strain SPb-1 in LB broth medium.

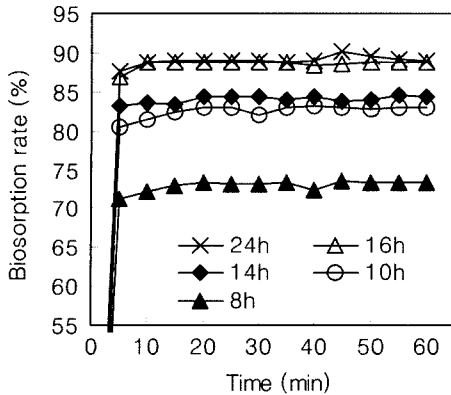


Fig. 4. Effect of different growing stage on the Pb biosorption capacity of the strain SPb-1.

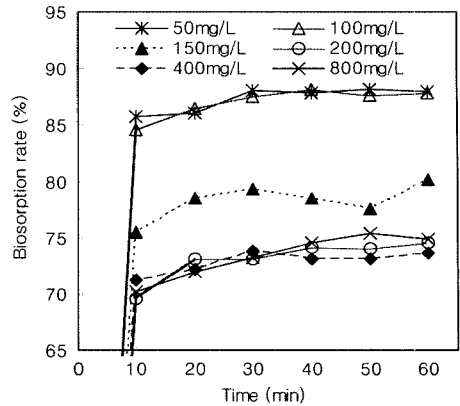


Fig. 6. Effect of different initial Pb concentration on Pb biosorption capacity of the strain SPb-1.

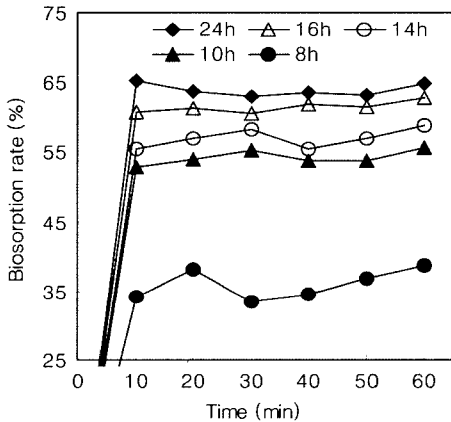


Fig. 5. Effect of different growing stage on the Cd biosorption capacity of the strain SPb-1.

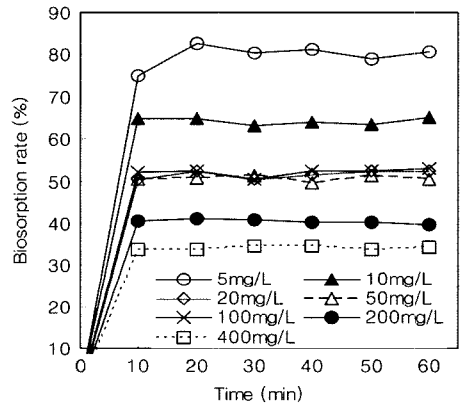


Fig. 7. Effect of different initial Cd concentration on Cd biosorption capacity of the strain SPb-1.

경우 60%로 16시간 동안 성장한 박테리아와 같은 흡착 효율을 보여주어 16시간 이상 성장한 박테리아에서 Pb와 Cd의 최대 생물흡착을 가졌다. 배양 시간이 적을수록 제거 효율이 낮은 이유는 미생물이 본격적으로 성장하는 시기에는 중금속에 대한 저항성 메커니즘이 작용하여 미생물 체외로 중금속을 배출하기 때문으로 생각된다.

중금속의 흡착 능력의 차이는 대부분의 미생물이 성장단계가 높아질수록 세포 구성물질의 함량이 변화하므로 배양시간이 중금속의 흡착에 영향을 미친 것으로 판단된다. 이와 유사한 연구로 유도기에서 중금속의 흡착이 적으나, 지수기부터는 중금속의 흡착량이 증가한 사실이 보고된 바 있으며(Scott *et al.*, 1990) 배양시간이 길어질수록 세포내 인의 총함량이 증가한 것이 그 원인이라고 설명하기도 하였다(Friis *et al.*, 1986).

3.3. 초기 농도에 따른 생물흡착

중금속의 초기농도에 따른 생물 흡착율을 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. Pb 및 Cd에 내성을 갖는 분리된 토착 미생물은 10분 이내에 흡착이 모두 진행되어, Pb의 경우 50, 100 mg/L인 경우에 90%의 높은 Pb 제거 효율을 보여주고 있고 100 mg/L를 초과하는 150, 200, 400, 800 mg/L인 경우에는 그 효율이 각각 약 78, 74, 74, 74%로 나타났다. Cd는 10 mg/L 이하의 저농도인 5, 10 mg/L에서 62, 81%의 흡착율을 보였고, 20, 50, 100, 200, 400 mg/L의 농도에서는 각각 50, 50, 50, 40, 33%만이 흡착되는 결과를 나타내었다(Fig. 6). Cd의 경우 농도가 낮을 때 흡착 효율은 농도가 높을 때보다 높았으나 미생물 단위 질량에 대한 중금속 흡착량이 적게 나타났다(Fig. 7). 이는 미생물 농도가 Cd에 대해 포화된 상태이기 때문으로 판단된

다. 중금속 흡착 실험에서 미생물에 의한 중금속 흡착은 2단계로 진행되며, 1단계 흡착은 중금속 유입 직후부터 30~60분 사이의 빠른 시간 안에 발생하며 미생물 세포간의 생성 물질에 의한 중금속의 물리적인 흡착과 세포 표면에서의 이온 교환에 의해 일어나며, 2단계는 미생물 대사활성 또는 증식에 따른 흡착으로서 세포의 성장률에 의해서 결정된다(Tsezos, 1982). SPb-1에 의한 Pb와 Cd의 흡착은 60분 이내에 대부분의 흡착이 진행되었고 이후에 흡착량의 변화가 없는 것으로 보아 물리적인 흡착 과정이 주로 작용했다고 판단된다.

3.4. 생물량(biomass)에 따른 생물흡착

미생물은 중금속에 대해 내성(tolerance)을 나타내거나 저항성(resistance)을 나타낸다. 중금속에 대해 내성을 나타내는 균주는 중금속이 높은 농도로 존재하는 환경조건에서 미생물에 필요한 다른 금속과의 유사성으로 필수 이온에 대한 특이한 수송 시스템을 통하여 세포내로 중금속을 운반하거나 세포에 대해 더 이상 독성을 나타내지 못하게 화학적인 모식 또는 세포성 인자들과의 결합에 의한 형태의 변형에 따라 내성을 나타내게 된다(Lee et al., 1999). 저항성은 독성 이온이 세포 내부로 들어오는 것을 막아주는 것과 세포 외부로의 배출에 의한 이온 채널의 특별한 변형을 들 수 있다. 초기 생물량에 따른 중금속 흡착 효율은 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. Pb와 Cd 모두 초기 생물량이 2g/L 이상일 때 90%와 80%의 최대 흡착율을 가지며 생물량이 증가할수록 흡착율은 증가하는 경향을 보였다.

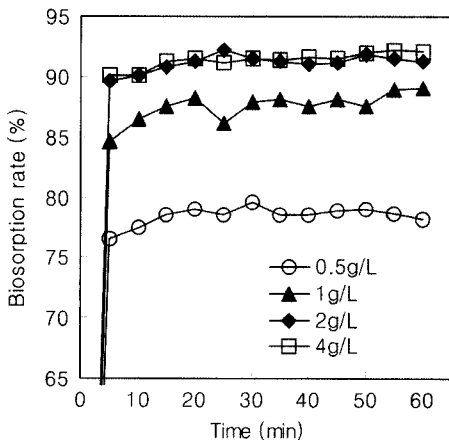


Fig. 8. Effect of biomass on the Pb biosorption capacity of the strain SPb-1.

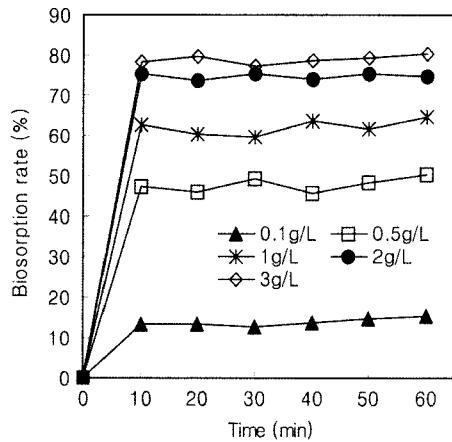


Fig. 9. Effect of biomass on the Cd biosorption capacity of the strain SPb-1.

3.5. pH 변화에 따른 생물흡착

pH에 따른 흡착 변화를 실험한 결과, Fig. 10과 Fig. 11에서 보는 바와 같이 용액 내 초기 pH에 따른 Pb 흡착량은 pH가 5 내지 9인 경우가 높게 나왔으며, pH가 3에서 가장 낮았다. pH가 3 이하인 산성 조건에서는 미생물의 흡착 사이트에 결합하는 Pb 및 Cd 양이온과 H⁺ 이온 간의 경쟁으로 인해 중금속 이온의 탈착현상이 일어나 낮은 흡착율을 보였다.

pH는 중금속 흡착 과정에서 매우 중요한 인자로서 작용한다. 일반적으로 pH가 증가함에 따라 미생물에 의한 중금속의 흡착능력도 증가하게 된다. pH가 낮아지면 미생물 표면에 존재하는 음이온성 그룹의 전하는 양으로 하전되어 중금속 양이온의 접근을 저해하기 때문에 흡착량이 낮아지는 반면, pH가 증가함에 따라 세포의 표면에 존재하는 carboxyl, phosphoryl, hydroxyl

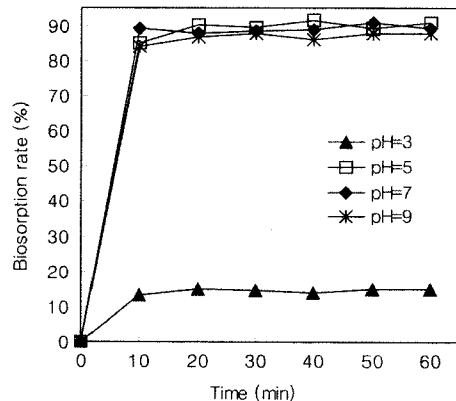


Fig. 10. Effect of pH on the Pb biosorption capacity of the strain SPb-1.

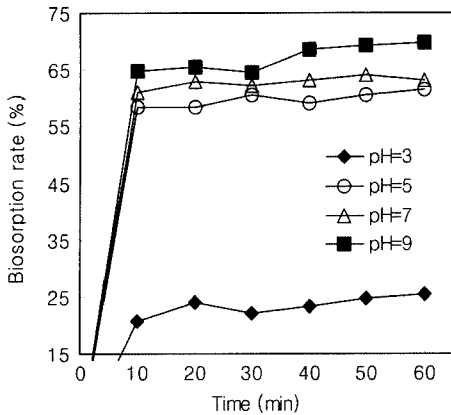


Fig. 11. Effect of pH on the Cd biosorption capacity of the strain SPb-1.

그룹 등과 같은 리간드들이 음전하를 띄게 되므로 중금속 양이온과의 흡착반응을 촉진시킨다(Ramelow *et al.*, 1992).

일반적으로 중금속 양이온은 미생물 표면의 음전하 기능기와 정전기적인 인력에 의해 결합되는 것이 주요하므로, 용액의 pH가 낮아질 경우, 중금속 이온은 박테리아 표면의 흡착기능기에 대하여 수소이온(H⁺)과 경쟁적으로 반응이 이루어진다. 이는 낮은 pH 영역에서 수소이온 증가에 따른 미생물 표면의 protonation, 중금속 이온의 용해도 증가, 산성조건에서의 미생물 구조 손상 등에 의한 것으로 사료된다.

pH 5 내지 9 범위의 중성 및 알칼리성 조건에서 생물흡착 효율이 좋으며, 높은 도양 pH 에서는 생물흡착 뿐만 아니라 중금속의 침전이 일어나 흡착율이 증가할 가능성이 존재한다.

3.6. 온도 변화에 따른 생물흡착

온도에 따른 흡착량은 온도가 증가할수록 보통 감소한다고 보고되고 있다. Aksu(2001)에 의하면 온도가 20°C에서 50°C로 증가함에 따라 Cd의 생물 흡착 효율이 85.3 mg/g_{biomass}에서 51.2 mg/g_{biomass}로 감소하였다. Reynolds(1982)에 의하면 온도는 미생물의 활성에 영향을 주는 요소로 미생물이 surface functional group의 형성에 관여하며 온도의 증가로 인해 중금속 이온의 확산이 촉진되어 결합을 활발하게 하여 중금속의 흡착이 더 잘 이루어 질 것으로 추측하였다. 이번 연구에서는 Pb의 경우에 25°C에서의 제거 효율이 35°C에서의 제거 효율과 비교해 더 높았으나, Cd의 경우에는 반대로 35°C에서의 제거 효율이 25°C보다 높았다

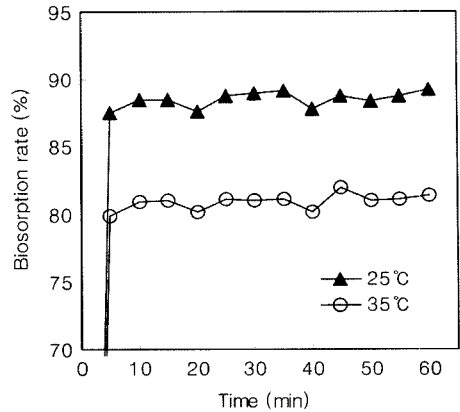


Fig. 12. Effect of temperature on the Pb biosorption capacity of the strain SPb-1.

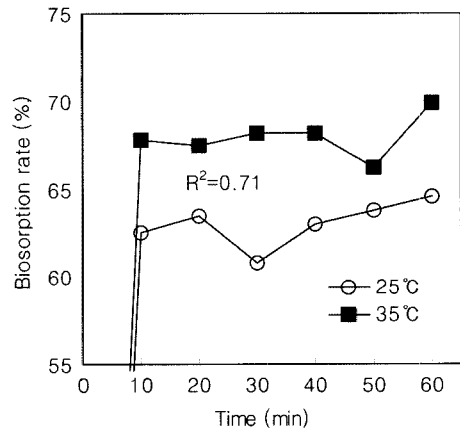


Fig. 13. Effect of temperature on the Cd biosorption capacity of the strain SPb-1.

(Fig. 12, Fig. 13). 실험한 온도의 범위가 넓지 않았기 때문에 온도의 변화에 따른 경향성에 대한 결론은 내리기 어려웠으나, Pb의 경우 25°C에서 제거효율이 더 높았던 것은 실험에 사용한 미생물인 SPb-1을 배양할 때 배양 조건이 25°C이었기 때문에 생장 과정 중 적응의 결과라고 판단된다. 그러나 Cd의 경우 35°C에서 높은 제거 효율을 보였으므로 같은 미생물이라도 최적의 흡착 효율을 갖는 온도는 상이하였는데, 이는 온도에 따른 세포 활성도 및 활성자리의 변화, 중금속과 리간드 사이의 온도에 따른 친화성 차이 등이 원인이라고 판단된다.

3.7. 등온흡착식 적용

중금속의 흡착특성은 중금속 및 미생물의 종류에 따라 다르게 나타난다. 이러한 흡착 특성은 Eq. 1과 같

Table 1. Values of experimental equilibrium constants for Langmuir isotherm equation

	q_m	b	R^2
Pb	62.11	0.041	0.71
Cd	192.31	0.065	0.98

은 Langmuir 흡착등온식이 적용될 수 있음을 나타내며, 이 때 구해진 각 상수는 Table 1과 같다.

$$q = q_m \frac{bC}{1 + bC} \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서, q : 단위 흡착제에 대한 금속이온의 흡착량 (mg/g)

C : 평형상태에서 용액 중 중금속의 농도 (mg/L)

q_m : 단위 흡착제에 대한 금속이온의 최대흡착량 (mg/g)

b : 흡착 평형상수 (L/mg)

Langmuir 모델적용 결과, 이론적 최대 흡착량은 Pb와 Cd에 대해서 각각 62.11과 192.31 mg/g로 나타났고, R^2 (상관성)가 0.71과 0.98로 계산되었다(Fig. 14,

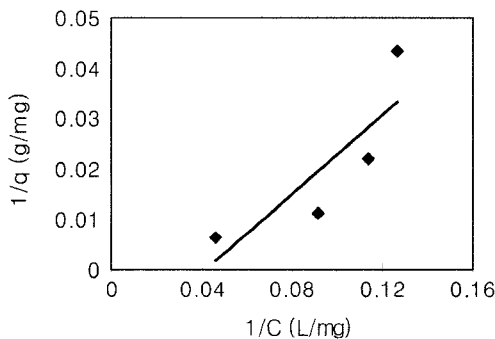


Fig. 14. Langmuir Isotherm of Pb.

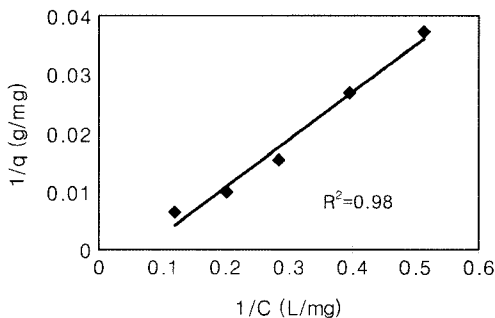


Fig. 15. Langmuir Isotherm of Cd.

Fig. 15). Langmuir 등은 흡착식은 미생물 표면에 중금속 분자가 단일 층으로 포화되고, 모든 위치에서 동일한 흡착 에너지를 가진다고 가정 하에 만들어진 것이다. Freundlich 등은 흡착식은 이론적인 배경을 가지고 유도된 Langmuir 등은 흡착식과는 달리 경험적으로 구하여진 실험식이라는 한계를 가지나 불균일한 흡착에너지를 갖는 흡착제의 경우 Freundlich 등은 흡착식이 더 적합하다(Ruthven, 1984).

따라서 분리한 토착 박테리아의 경우에 Cd는 세포 표면의 단일 층에 단분자 흡착에 의한 생물흡착이 진행되었고, Pb는 미생물 대사 작용을 통한 세포 내로의 축적 작용과 세포외 고분자 물질 또는 sulfide나 phosphate 같은 미생물 내 음이온과의 반응에 의한 침전물 형성작용 등을 통하여 생물흡착이 진행된 것으로 판단된다.

흡착 후 미생물의 생존 여부를 관찰하기 위해 반응 후의 박테리아와 금속이온 혼합 용액 일부를 취해 LB 배지에 접종시킨 결과 미생물은 계속적으로 배양되어 활성이 유지되고 있음을 나타내었다. 이는 주어진 농도에서 금속이온이 박테리아에 치명적인 독성을 일으키지 않음을 나타낸다.

4. 결 론

Pb와 Cd에 내성을 갖는 박테리아를 분리하여 동정한 결과 *Bacillus thuringiensis*로 확인되었고 SPb-1으로 명명하였다. 분리한 토착 미생물의 생물흡착 실험 결과로 나타난 최대 제거 효율을 갖는 환경 조건과 흡착 효율은 다음과 같다.

Pb와 Cd 모두 16시간 이상 성장한 박테리아에서 최대 흡착 효율이 90%와 60%로 나타났고, 초기 중금속 농도가 Pb는 100 mg/L 이하에서 Cd는 5 mg/L 이하에서 최대 흡착 효율이 87%와 80%로 관찰되었다. 생물량은 2 g/L 이상에서 Pb와 Cd가 모두 최대 흡착 효율이 92%와 78%이었으며, pH는 5 이상에서 Pb와 Cd의 흡착 효율이 90%와 95%로 최대가 되었다. Pb와 Cd가 최적의 흡착을 보이는 온도는 25°C와 35°C로 상이하였으며 이때의 효율은 88%와 68%로 나타났다. 생물흡착 과정을 Langmuir 등은 흡착식에 적용하면, 이론적 최대 흡착량은 Pb와 Cd에 대해서 각각 62.11과 192.31 mg/g로 나타났고, R^2 가 0.71과 0.98로 계산되었다. 분리한 토착 박테리아의 경우에 Cd는 세포 표면의 단일 층에 단분자 흡착에 의한 생물흡착이 진행되었으나, Pb는 미생물 대사 작용을 통한 세포 내로의 축적 작용과 세포외 고분자 물질 또는 sulfide나

phosphate 같은 미생물 내 음이온과의 반응에 의한 침전물 형성작용 등을 통하여 생물흡착이 진행된 것으로 판단된다. 이러한 연구 결과는 토양 및 지하수의 중금속(Pb, Cd) 생물흡착 처리 기술에 활용 가능할 것으로 사료된다.

사 사

이 연구는 환경부 “GAIA 사업(토양·지하수오염방지기술개발사업)”의 일환으로 수행되었습니다. 16s rRNA 분석을 통하여 미생물 동정을 수행하여 주신 충북대 미생물학과 이성근 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- Aksu, Z. (2001) Equilibrium and kinetic modelling of cadmium(II) biosorption by *C. vulgaris* in a batch system: effect of temperature. *Separation and Purification Technol.*, v.3, p.285-294.
- Friis, N. and Myers-Keith, P. (1986) Biosorption of uranium and lead by *Streptomyces longwoodensis*, *Biotechnol. Bioeng.*, v.28, p.21-28.
- Scott, J.A. and Palmer, S.J. (1990) Site of cadmium uptake in bacteria used for biosorption. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* v.33, p.221-225.
- Gavrilescu, M. (2004) Removal of heavy metals from the environment by biosorption: *Engineering in Life Sciences*, v. 4, p.219-232.
- Lee, H.Y., Min, B.H. and Choi, Y.G. (1999) The cadmium biosorption mechanism in gram negative bacteria, *Serratia marcescens*. *Korean J. Environ. Agric.*, v.22(1), p.39-43. (in Korean)
- Ramelow, G.J., Fralick, D. and Zhao, Y. (1992) Factors affecting the uptake of aqueous metal ions by dried seaweed biomass. *Microbios.* v.72, p.81-93.
- Reynolds, T.D. (1982) Unit operation and processes in environmental engineering. *Brook/Cole Engineering Division*.
- Ruthven D.M. (1984) *Principles of Adsorption and Adsorption Process*, John Wiley & Sons, New York.
- Tsezos, M. and Volesky, B. (1982) The mechanism of uranium biosorption by *Rhizopus arrhizus*. *Biotechnol. Bioeng.*, v.24, p.385-401.

2009년 8월 20일 원고접수, 2009년 10월 5일 게재승인