

불완전 균류 *Aureobasidium pullulans*으로 납을 제거하기 위한 인자들과 흡착모델

서정호¹ · 서명교² · 정경태 · 이용희*

¹울산과학기술대학교 환경생활화학학과, ²동의과학대학교 의무행정학과, 동의대학교 생명응용과학과 및 기초과학연구소

Received April 14, 2006 / Accepted July 26, 2006

Biosorption Model and Factors for Removing Lead to *Aureobasidium pullulans* being Imperfect Fungus. Jung-Ho Suh¹, Myung-Gyo Suh², Kyung-Tae Chung and Yong-Hee Lee*. ¹Dept. of Environment & Chemistry, Ulsan College, Ulsan 680-749, Korea, ²Dept. of Medical Administration, Dong-Eui Institute of Technology, Busan 614-715, Korea, Dept. of Life Science & Biotechnology and Research Institute for Basic Sciences, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea – An alternative method to remove and recover heavy metals is biosorption based on metal-sequestering properties of natural or biological origin. In this study, the effects of factors such as temperature, pH, initial concentration of lead, and initial amount of biomass on biosorption of lead using *Aureobasidium pullulans* were investigated. *A. pullulans* has an excellent selectivity to remove lead than other heavy metals such as cadmium, chromium, nickel in pure and mixed solution. The optimum temperature of biosorption with *A. pullulans* was 40°C and the amount of removal increased at high pH. The higher initial lead concentration or the lower cell dry weight, the higher amount of lead was adsorbed. The adsorption isotherm of lead was accorded with Freundlich model. The adsorption capacity and initial adsorption rate of living *A. pullulans* were about twice higher than that of dead one.

Key words – Lead, *Aureobasidium pullulans*, biosorption, adsorption

서 론

급속한 산업의 발전은 인류에게 물질문명의 풍요를 안겨 주었지만 다양한 오염물질의 발생으로 자연생태계의 파괴도 더불어 제공하였다. 하천이나 강으로 배출되는 일반하수, 산업폐수, 각종 폐기물의 매립 및 농약살포 등의 다양한 오염물질의 배출로 인해 지구환경이 파괴되고 있을 뿐만 아니라 인류의 건강까지도 위협당하고 있다. 특히 생산활동의 과정에서 배출되는 산업폐수는 유해 중금속을 다량 함유하고 있어 적절한 처리없이 배출될 경우 생태계의 먹이사슬에 의한 농축효과(biomagnification)로 인해 그 피해가 급격히 확산될 수 있다[5]. 또한 중금속은 폐수내에 다양한 형태로 존재하며 그 형태에 따라 인체에 미치는 영향도 다양해서 이러한 폐수 중에 존재하는 중금속의 제거와 회수는 인류의 미래를 대비한 매우 중요한 과제로 많은 관심과 연구가 진행되고 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 용액중의 중금속을 제거하는데 미생물흡착 공정(biosorption process)가 적용되었다[1]. 미생물흡착이란 살아 있는 미생물 또는 죽은 미생물을 이용하여 용액 중의 중금속과 방사선 물질 등을 세포벽, 세포막, 세포질 및 세포의 고분자물질(extracellular polymer substance) [11] 등에 흡착 또는 축적시키는 것을 말한다. Yeast, bacteria, fungi 및 algae와 같은 미생물이 중금속을 잘 제거할

수 있다는 것은 오래전부터 보고되어 왔다[8]. 그 이유는 다당류, 단백질 및 지방질로 구성된 미생물 세포벽에 존재하는 carboxylate, hydroxyl, sulphate, phosphate 및 amine 리간드에 중금속이 잘 흡착될 수 있기 때문이다. 또한 이러한 미생물 흡착제로는 발효공정이나 폐수처리장에서 발생하는 폐균체를 이용하기 때문에 손쉽게 구할 수 있고, 가격이 저렴하며, 폐자원을 가공 처리없이 그대로 이용할 수 있어 경제적이다. 미생물의 종류에 따라 특정 중금속을 선택적으로 흡착하는 성질을 가지고 있어 산업폐수 내 함유된 독성 중금속의 처리 및 고가의 중금속 회수에도 사용 가능하게 되었다[4]. 본 연구는 용액중에 존재하는 독성 중금속인 납을 발효공정에 많이 사용되는 균류인 *Aureobasidium pullulans*를 이용해서 제거할 때 이 미생물에 의한 납의 제거량에 대해서 알아 보고 또한 적절한 흡착속도모델을 제안하고자 한다. *A. pullulans*는 *Aspergillus niger* 등과 함께 올리고당을 생산하는 미생물로 무성포자인 분생자(conidia)가 자낭에 싸여있고 yeast-like, typhae, chlamydospore와 같은 여러가지 형태(polymorphic)로 존재하기 때문에 불완전 균류(imperfect fungus)라 불린다. 이 미생물은 중금속에 대해 상당한 내성이 있고, 중금속으로 오염되어 있는 지역의 나뭇잎에서 우점종으로 존재하는 것으로 알려져 있다[6]. 다른 미생물에 비해 비교적 크기 때문에 실험의 조작성이 쉽고 올리고당 생산과 알코올 생산에 사용되므로 폐 미생물로 쉽게 구할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

*Corresponding author

Tel : +82-51-890-2129, Fax : +82-51-891-7740

E-mail : lyh202@deu.ac.kr

재료 및 방법

실험재료

본 실험에 사용한 미생물은 *Aureobasidium pullulans* KFCC (Korean Foundation of Culture Collection) 10245로 사면배지에 보관하였으며 사면배지로부터 종균배양을 하여 미생물의 활성을 증가시킨 다음 성장배지에서 배양했다(Table 1). *A. pullulans*는 호기적 조건에서만 성장한다. 본 실험에서는 300 ml 삼각플라스크에 멸균된 배지 100 ml를 넣고 호기성 상태를 유지하기 위해 통기성 실리콘마개로 막아 멸균한 후, 집종원을 피펫을 이용하여 집종하여 30℃의 진탕배양기에서 150 rpm으로 각각 72, 48시간 동안 배양하였다. 미생물을 회수하기 위해 3,000 rpm으로 20분간 원심분리한 다음, 상등액을 버리고 pellet은 같은 양의 증류수로 재 현탁시켜 다시 원심분리하는 과정을 3차례 실시하였다. 여기서 얻어진 미생물을 이온이 제거된 초순수 증류수에 현탁시켜 흡착실험에 사용하기 전까지 4℃에서 냉장 보관하였다. 실험에 사용된 중금속은 납, 니켈, 카드뮴, 크롬으로 특급시약인 $Pb(NO_3)_2$, $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, $Cr(NO_3)_2 \cdot 9H_2O$ 를 탈이온화된 초순수 증류수(Millipore, Milli-Q)에 용해시켜 원하는 농도로 희석하여 사용하였다.

실험방법

미생물 현탁액(50 ml)와 원하는 농도의 2배가 되도록 준비한 중금속 용액(50 ml)을 300 ml 플라스크에서 1 : 1로 섞은 후, 진탕배양기에서 30℃, 150 rpm으로 교반하였다. 일정한 시간간격으로 1.5 ml시료를 채취하여 10,000 rpm에서 10분간 원심분리한 후, 상등액을 희석하여 중금속의 농도를 측정하였다. 균체건조무게는 균체용액의 흡광도(660 nm)를 측정하여 구하였으며, 잔류 납농도와 초기 납농도의 차이를 균체건조무게로 나누어 흡착된 납의 양을 계산하였다. 그리고 진탕배양기의 온도를 20~50℃ 범위에서 10℃ 간격으로 설정해서 미생물 현탁액과 납 용액을 혼합한 300 ml 삼각플라스크를 교반하면서 흡착실험 과정과 동일하게 실험하였다. 일정한 납 용액에 0.1 M-HNO₃와 0.01 M-NaOH용액으로 pH를

다양하게 조절한 후, 농도가 일정한 미생물 현탁액과 혼합했다. 이 후, 실험방법도 흡착실험 과정과 동일하게 하였다. 농도의 영향에 대한 실험은 위에서 구한 최적온도와 pH 조건에서 미생물 농도를 일정하게 유지하고 초기 납용액의 농도를 50~500 mg/l 범위 내에서 다양하게 변화시키며 흡착실험을 하였다. 흡착시 초기 미생물 농도의 영향은 초기 납용액의 농도를 일정하게 두고 미생물의 농도를 변화시키며 흡착실험을 했다. 이때 *A. pullulans*를 1 g/l 이하의 농도에서 실시하였다.

분석방법

미생물 농도는 분광광도계 (Spectronic 20, Milton Inc., USA)의 파장 660 nm에서 흡광도를 측정하여, 먼저 구한 흡광도와 세포건조무게의 검량선을 이용하여 미생물 농도를 환산하여 계산하였다. 납 흡착시 미생물의 보관시간에 따른 영향의 분석에서는 정상기까지 배양해서 이를 회수한 후, 이온이 제거된 초순수 증류수에 미생물을 현탁시켜 4℃에서 냉장 보관하면서 일정시간이 경과할 때 마다 현탁액을 사용하여 흡착실험을 하였다. 흡착속도는 중금속의 초기농도를 약 50~500 mg/l로 바꾸어 가면서 각 중금속 농도에서 일정시간(10 min) 동안에 흡착된 중금속 양을 구하여 초기속도법으로 계산하였다. 세포의 고분자물질을 추출하기 위해서는 초음파쇄적법, NaOH 추출법, 증기추출법 등 여러가지가 있는데 그 중에서도 고속 원심분리법과 ethylene diamine-tetra acetic acid (EDTA)법을 혼합하여 사용하였다. 미생물 현탁액 25 ml에 5 M-EDTA와 NaCl을 각각 0.2 ml 씩 첨가한 후, vortex mixer로 교반시켰다. 이 시료를 36,000 rpm에서 40분간 고속으로 원심분리한 후, pellet은 이온이 제거된 증류수로 현탁시켜 원심분리하고 다시 현탁시키는 과정을 3차례 실시하여 흡착실험에 사용하였으며 상등액은 isopropyl alcohol과 1 : 4의 부피로 혼합한 후, 4℃에서 3시간 동안 정지시킨 다음 무게를 아는 여과지에 여과하여 세포의 고분자물질의 무게를 측정했다. 수용액중 중금속의 분석은 Atomic Absorption Spectrometer (Varian, Spectra 55B)를 사용하였다. 투과전자현미경 (Transmission Electron Microscope; TEM, Hitach H-600)으로 흡착된 미생물을 관찰하기 위해서 중금속을 흡착한 미생물을 원심분리기로 회수하여 멸균 증류수로 3회 세척한 후, 25% glutaraldehyde로 실온에서 2시간 전고정시킨 다음 1% osmium tetroxide로 24시간 후고정시킨다. 이때 사용한 모든 시약의 희석은 0.1 M 인산완충용액(pH 7.0)로 하였으며, 동일한 완충용액으로 세척하였다. 균체를 연속적으로 60, 70, 80, 90, 100%의 에탄올로 탈수하고 propylene oxide로 조직을 치환시켜서 Epon 812에 포매(embedding)하여 60℃ 건조기에서 24시간 중합시킨 후에 ultramicrotome (ULTRACUT, Reicher-Jung)을 이용해서 0.35 μm 크기로 절단하여 carbon coated 200 mesh nickel 또는

Table 1. Compositions of growth medium for *Aureobasidium pullulans* (unit: g/l)

Composition of medium	<i>Aureobasidium pullulans</i>		
	Slant	Seed	Main medium
Sucrose	50	10	20
Yeast extract	2	2	20
Agar	20	-	-
K ₂ HPO ₄	-	-	5
MgSO ₄ · 7H ₂ O	-	-	2
NaNO ₃	-	-	15

는 copper grid에 고정시켜 투과전자현미경으로 75 KV에서 관찰하였다.

결과 및 고찰

납 제거에 대한 선택도

Fig. 1은 *A. pullulans*의 특정 중금속에 대한 흡착정도를 알아보기 위하여 카드뮴, 크롬, 니켈, 납 등의 4가지 중금속을 각각 흡착시킨 결과로 납>크롬>니켈>카드뮴 순으로 나타났다. 납에 대한 흡착능이 다른 중금속에 비해 월등히 높았다. 또한 4가지 중금속을 동시에 투입한 혼합중금속 용액에서의 선택적 흡착결과도 단독으로 흡착시켰을 때 보다 흡착량은 다소 적어졌지만 흡착량 순서가 거의 같았다. 이러한 실험결과는 Nakajima[7] 등이 9가지의 혼합중금속을 *Saccharomyces cerevisiae*를 사용하여 흡착시켰을 때 납의 흡착량이 높게 나타난 것과 유사하다. 이는 미생물이 중금속에 대한 선택도가 중금속과 결합할 수 있는 결합자리를 제공하는 미생물내 구성성분들인 단백질, 핵산, 다당류 등의 화학적 조성과 이러한 성분내에 존재하는 배위자의 종류와 수 등에 따른 특정 중금속에 대한 친화도와 관계가 있는 것으로 생각된다.

납 제거에 미치는 온도의 영향

온도에 따른 세포의 생활성도(viability) 및 활성부위의 변화, 중금속과 리간드사이의 온도에 따른 친화성의 차이 때문

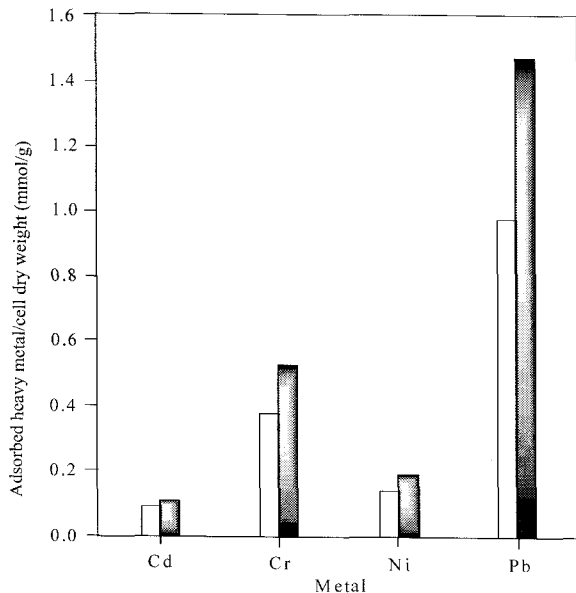


Fig. 1. Adsorption of heavy metal by *Aureobasidium pullulans* in solution melted each 4 heavy metals (■, initial metals concentration : 2 mmol/l) and selective adsorption of heavy metal by *Aureobasidium pullulans* in mixed solution melted 4 heavy metals at the same time (□, initial concentration of each component : 2 mmol/l).

에 미생물에 의한 중금속의 흡착에 있어서 같은 미생물을 사용하더라도 중금속의 종류에 따라서 최적온도가 달라짐을 알 수 있다[12]. Fig. 2에 나타낸 *A. pullulans*의 납 제거에 미치는 온도의 영향에 따르면 20℃, 30℃, 40℃ 그리고 50℃ 가운데서 40℃가 최대의 양을 흡착하는 최적온도지만 온도영향에 별로 민감하지 않아서 온도에 따른 흡착량의 변화가 다른 온도들에 비해서 그다지 큰 차이를 나타내지 못했다. 이는 미생물 흡착에 미치는 온도의 영향이 대사 비의존형으로 중금속이 표면에만 흡착하기 때문에 온도에 따른 흡착능의 차이가 그다지 크지 않는 것으로 생각된다.

납 제거에 미치는 pH의 영향

*A. pullulans*를 사용하여 납을 흡착시킬 때 pH에 따른 흡착량의 결과를 Fig. 3에 나타내었고, 최적 pH는 9로 나타났다. 그리고 이 경우에 500 mg/g이상의 흡착량을 가지는 것으로 보였으며, 따라서 이는 다른 균체를 사용한 Friis[3] 등의 결과들 보다 아주 우수한 것이다. 일반적으로 미생물에 의한 중금속의 흡착은 온도보다는 pH에 훨씬 민감하게 변하며, pH가 중성으로 갈수록 흡착량이 증가하거나 혹은 사용된 미생물 흡착제의 종류에 따라 최적 pH가 존재하는 것으로 알려져 있다[2]. 미생물 흡착이 pH에 큰 영향을 받는데 이러한 이유가 낮은 pH에서는 용액중에 존재하는 수소이온과 중금속과의 경쟁흡착을 나타내고 높은 pH에서는 중금속이 수화물을 형성하여 미생물에 잘 흡착이 되는 것으로 나타나기 때문인 것으로 생각된다.

납 제거에 미치는 초기 납 농도의 영향

Fig. 4는 *A. pullulans*를 사용하여 일정한 미생물 농도에서

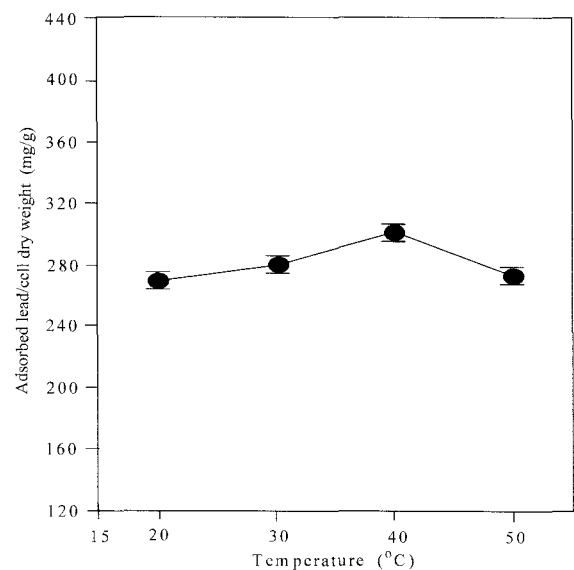


Fig. 2. Effect of temperatures on the absorption of lead to *Aureobasidium pullulans*.

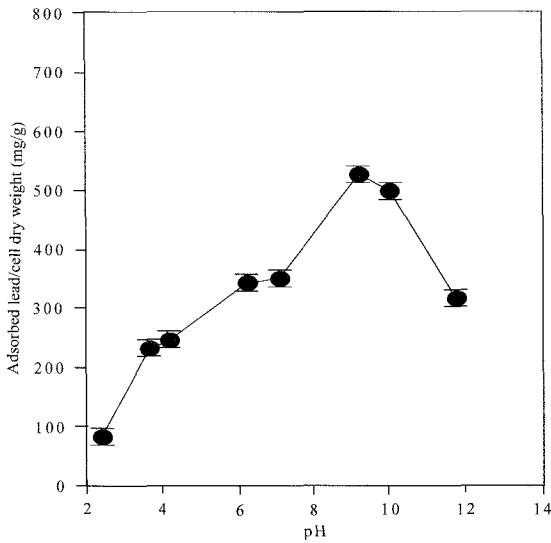


Fig. 3. Effect of pH on the adsorption of lead to *Aureobasidium pullulans*.

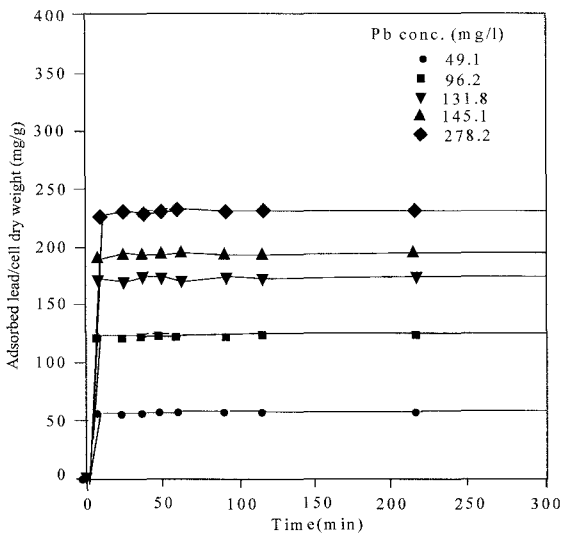


Fig. 4. Effect of initial lead concentration on its adsorption to *Aureobasidium pullulans* (cell dry weight : about 0.74 g/l).

초기 납의 농도를 달리했을 때, 단위 미생물당 납 흡착량의 변화를 나타낸 것이다. 초기 납의 농도가 높을수록 단위 미생물당 납 흡착량은 증가하였으나, 평형상태에 도달하는 시간은 초기 납의 농도와 관계없이 매우 빠르게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이것은 납이 *A. pullulans*에 흡착될 때 세포내로 침투하는 것이 아니고 납이 표면에서 전부 흡착이 되는 것으로 생각된다. 따라서 실제공정에서는 더욱 많은 양의 납을 짧은 시간내에 제거가 가능할 것으로 생각된다. 초기 납의 농도가 96 mg/l인 경우에 단위 미생물당 흡착량이 120 mg/g로 짧은 시간내에 많은 양의 납을 제거함을 알 수 있다.

납 제거에 미치는 초기 미생물농도의 영향

Fig. 5는 0.215~0.891 g/l의 범위에서 납의 흡착량을 보여준 것으로서 미생물 건조질량이 평형에 도달하는 시간이 매우 짧게 소요되었다. 그러나 미생물 건조질량이 0.4 g/l 이하일 경우에는 단위 미생물당 흡착량이 변하지 않는 것을 볼 때, 약 200 mg Pb/g cell dry weight 정도가 최대 납 흡착량인 것으로 나타났다. 이는 용액내 존재하는 미생물의 양이 많을수록 정전기적인력이 높아져서 금속이 더 많이 흡착된다는 Gadd[4] 등과는 맞지 않아서 용액내의 미생물의 농도를 너무 높이는 것은 미생물 흡착의 효율을 떨어뜨릴 것으로 생각된다.

흡착등온모델

Fig. 6은 흡착등온모델로 *A. pullulans*를 Langmuir와 Freundlich 흡착평형모델의 직선식인 $\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{max}bC_e} + \frac{1}{q_{max}}$ 과 $\ln q_e = \ln k + \frac{1}{n} \ln C_e$ 에 적용하여 계산한 결과를 나타내었다. 이때 q_e 는 평형상태에서 미생물의 흡착량, q_{max} 는 미생물에 의한 최대 흡착량, C_e 는 용액중의 평형최종농도, b 는 흡착에너지와 관계있는 상수이다. 절편 $\ln k$ 는 흡착능력의 정도를 그리고 기울기 $1/n$ 은 흡착의 세기를 나타낸다. 따라서 *A. pullulans*를 이들 모델에 적용했을 때, 상수 값은 $q_{max} = 208.7$ (mg/g), $b = 0.64$, $k = 132.8$ (mg/g · min), $1/n = 0.108$ 이었다. 이 값을 대입하여 Langmuir 모델 식인 $q_e = \frac{q_{max}bC_e}{1 + bC_e}$ 과 Freundlich 모델 식인 $q_e = kC_e^{1/n}$ 의 형태로 Langmuir ;

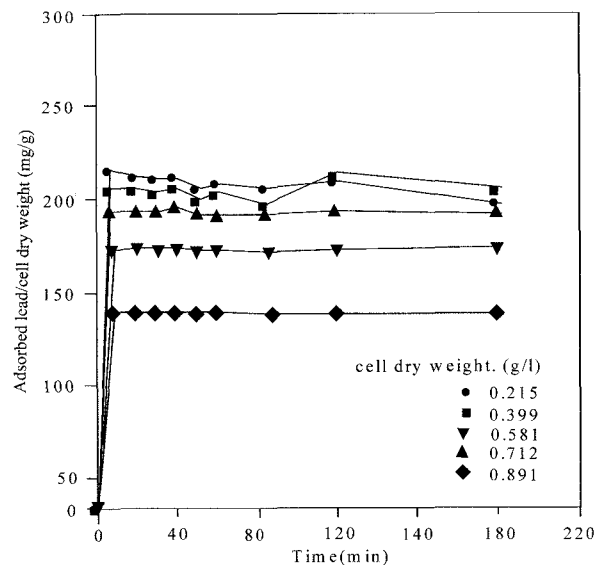


Fig. 5. Effect of cell dry weight on its adsorption to *Aureobasidium pullulans* (initial lead concentration : about 200 mg/l).

$q_e = \frac{208.7C - c}{1 + 0.64C_e}$ $r^2 = 0.4993$, Freundlich; $q_e = 132.8C_e^{0.108}$ $r^2 = 0.5977$ 나타났다. 상관계수 (correlation coefficient) (r^2)을 구해 수치가 큰 값을 적정모델로 선택하였다. 이때 Freundlich 모델에서 잘 적용되었다[9]. Fig. 7은 흡착등온 실험값과 모델에서 구한 수식의 결과를 나타낸 것으로 납 흡착이 다분자층으로 진행됨을 알 수 있다. 초기에 세포가 분비하는 세포외 고분자물질에 의해 납이 고르게 흡착된 후, 그 위에 다시 계속적으로 흡착이 일어나는 것으로 판단할 수 있다. 용액중의 납의 농도와 흡착된 납의 농도를 비교해보면 평형농도가 10 mg/l 일 때 190 mg/g으로 친화도가 높음을 알 수 있다.

흡착속도 모델

Fig. 8은 미생물의 속도실험 결과를 이용하여 흡착속도를 나타낸 것이다. Γ_{ad} (초기흡착속도) = $\frac{\Gamma_{max}C_0}{\alpha + C_0}$ 식에서 초기 금속농도 C_0 , 최대흡착속도는 Γ_{max} 는 용액중의 금속농도에 영향을 받지 않고 단지 ligand의 양에만 영향을 받으며 흡착속도상수 α 값은 금속과 ligand의 친화도를 나타내며 이 값이 적을수록 친화도가 높은 것을 의미하며 최대흡착속도의 1/2의 속도에 해당하는 초기금속의 농도이다. *A. pullulans*의 흡착속도에서 최대 흡착속도 (Γ_{max} ; mg/g · min)가 42.37이었고, 최대흡착속도의 1/2일 때 납용액의 초기농도 (α ; mg/l)는 219.77이었다. 이것을 식으로 나타내면 *A. pul-*

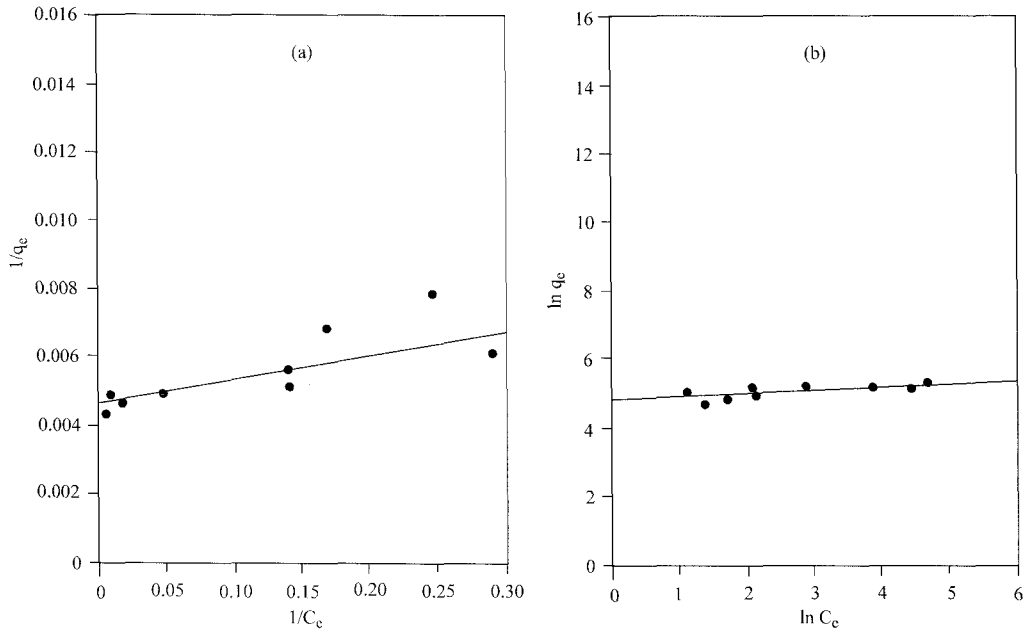


Fig. 6. The linear form of Langmuir (a) and Freundlich (b) models equation for *Aureobasidium pullulans*.

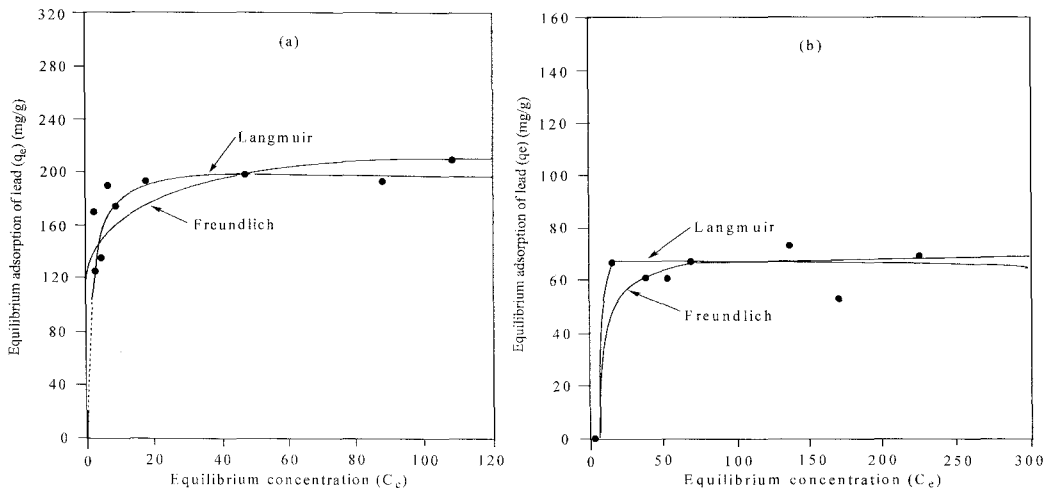


Fig. 7. Equilibrium isotherms of lead for live cell (a) and dead cell (b) of *Aureobasidium pullulans*.

pullulans : $r_{ad} = \frac{42.37C_0}{219.77 + C_0}$ 이다. 납 흡착제로써 흡착등온 모델과 흡착속도 모델에 적용하여 비교해 보면 납의 최대 흡착량은 Fig. 4와 Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 세포 건조무게그램 당 약 200 mg 정도로 거의 비슷한 것으로 나타났으나, 초기속도법에 의해 구한 납의 초기흡착속도는 초기 납 용액의 농도가 200 mg/l일 때를 기준으로 해서 비교해 보면 20.18 (mg/g · min)이었다. 이는 빠른 시간내에 납을 제거시킬 수 있음을 보여주는 것이다[10].

흡착모델의 적용

중금속 제거를 위한 미생물 흡착에서 흡착제로 쓰이는

미생물의 생활성도가 흡착량과 흡착속도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 살아있는 미생물과 멸균기에 넣어 약 15분 동안 멸균시켜서 사멸시킨 미생물을 이용하여 납을 흡착시켰다. Fig. 7은 살아있는 상태와 사멸된 상태의 *A. pullulans* 를 이용한 납의 흡착등온선으로 살아있는 상태가 사멸된 상태에서 보다 약 2배정도 흡착능이 우수한 것을 알 수 있었다. 이러한 사실을 증명하기 위해 *A. pullulans*에 납을 흡착시켜 일정시간이 지난 후에 투과전자현미경으로 관찰한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 보면 모든 납이 *A. pullulans* 의 세포벽 외부에 흡착이 되어있고 세포내부로는 전혀 침투가 안된 것을 알 수 있다. 따라서 *A. pullulans*에 의한 납의 흡착은 세포벽과 세포가 분비하는 세포의 고분자물질에 대

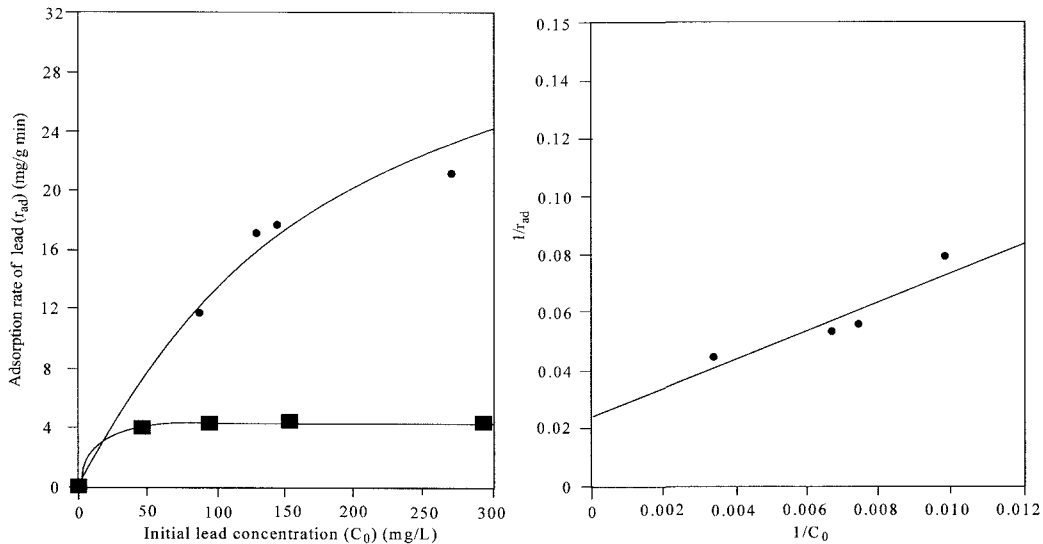


Fig. 8. Comparison of lead adsorption rate between live cells (●) and dead cells (■) of *Aureobasidium pullulans*.



Fig. 9. Transmission electron microphotograph of *Aureobasidium pullulans* with lead.

부분의 납이 흡착되며, 사멸된 *A. pullulans*의 경우, 멸균과정 동안 세포의 고분자물질내 존재하는 흡착자리가 유실되거나 흡착할 수 있는 리간드의 변화가 발생하여 흡착량이 감소되는 것으로 판단할 수 있다. Fig. 8에 *A. pullulans*의 살아있는 세포와 사멸된 세포를 사용하여 납을 흡착시킬 때 초기 흡착 속도를 나타내었다. 이것은 *A. pullulans*에 의한 납의 흡착은 세포벽주위에 존재하는 세포의 고분자물질에 의해 이루어지므로 다른 요인의 영향을 받지 않아 세포의 고분자물질의 양이 많은 살아있는 미생물의 흡착속도가 빠른 것이 당연한 것으로 생각되었다.

요 약

발효산업에 많이 사용되는 *A. pullulans*를 사용하여 독성 중금속인 납에 대한 제거량을 살펴보았다. 용액 중의 중금속을 제거할 때 *A. pullulans*가 다른 중금속에 비해 납에 대한 선택성이 우수하였으며 40℃에서 최대 흡착량을 나타내었으며, 또한 최적 pH가 9일 경우에 흡착량이 증가하였다. 초기 납의 농도가 96 mg/l인 경우에 단위 미생물당 흡착량이 120 mg/g로 짧은 시간내에 많은 양의 납을 제거함을 알 수 있었다. 그리고 약 200 mg Pb/g cell dry weight 정도가 최대 납 흡착량인 것으로 나타났다. 그리고 미생물의 보존기간에 따라 세포의 고분자물질의 분비가 증가하여 납 흡착량을 증가시켰으며, Freundlich 모델에 잘 적용되었다. 그리고 살아있는 상태가 사멸된 상태에서 평형흡착량은 약 2배 정도 흡착능이 우수함을 알 수 있었으며, 그에 따라서 초기 흡착속도도 살아있는 상태가 사멸된 상태보다 훨씬 빠른 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Fischer, R. G., S. Repsomanikis and M. O. Andreade. 1995. Bioaccumulation of methylmercury and transformation of inorganic mercury by macrofungi. *Environ. Sci. Technol.* **29**, 993-999.
2. 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.
3. Friis, N. and P. Myers-Keith. 1986. Biosorption of uranium and lead by *Streptomyces longwoodensis*. *Biotechnol. Bioeng.* **28**, 21-28.
4. Gadd, G. M. and L. de Rome. 1988. Biosorption of copper by fungal melanin. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **29**, 61-617.
5. Lee, E. J. 1995. A study on adsorption of Lead in wastewater using natural Kaolinite. *Kor. J. Env. Hlth. Soc.* **21**, 77-86.
6. Mowill, J. S. and G. M. Gadd. 1984. Cadmium uptake by *Aureobasidium pullulans*. *J. Gen. Microbiol.* **130**, 279-284.
7. Nakajima, A. and T. Sakaguchi. 1986. Selective accumulation of heavy metals by microorganism. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **24**, 59-64.
8. Pighi, L., T. Pumpel and F. Schinneer. 1989. Selective accumulation of silver by fungi. *Biotechnol. Lett.* **11**, 275-280.
9. Suh, J. H., M. G. Suh and Y. C. Cho. 1998. A comparative study for removal of mercury and lead by microorganisms. *Kor. J. Env. Hlth. Soc.* **24**, 98-103.
10. Suh, J. H., M. G. Suh and E. Y. Kim. 1997. Biosorption Model of mercury by *Saccharomyces cerevisia* and *Aureobasidium pullulans*. *Kor. J. Env. Hlth. Soc.* **23**, 21-25.
11. Suh, J. H., M. G. Suh and Y. S. Park. 1998. Biosorption process for removing heavy metals in aqueous solution(1). *Kor. J. Env. Hlth. Soc.* **24**, 29-41.
12. Volesky, B. and Z. R. Holan. 1995. Biosorption of heavy metals. *Biotechnol. Prog.* **11**, 235-250.