

## Exophiala sp.의 중금속 흡착에 미치는 온도 및 pH의 영향

임정수 · 이소진 · 이은영\*  
수원대학교 환경공학과

**Effect of Temperature and pH on the Biosorption of Heavy Metals by *Exophiala* sp.** Lim, Joung Soo, So Jin Lee, and Eun Young Lee\*. Department of Environmental Engineering, Suwon University 445-743, Hwaseong, Korea – To find the optimum growth and metal removal condition of isolated strain LH2, effects of the environmental factors such as medium pH, growth temperature, and metal concentrations were investigated. Based on the 18S rDNA analysis, the isolated strain was identified to *Exophiala* sp. with 100% homology. Isolated strain *Exophiala* sp. LH2 showed maximum removal efficiency of metals at the shaking conditions of pH 7 and 25°C. When the concentration of metal was under 200 ppm, the specific metal removal velocity at pH 7 increased from 0.01 to 4.43 mg-metal · L<sup>-1</sup> · d<sup>-1</sup> · mg · DCW<sup>-1</sup> as the concentration of metal increased from 10 ppm to 200 ppm. When 200 ppm of each metal was contained in the culture medium adjusted with pH 7, metal removal efficiencies of Cr, Cu, Ni, Pb and Zn were 99.28%, 97.67%, 91.94%, 99.77%, 99.61%, respectively.

**Key words:** *Exophiala* sp., biosorption, heavy metals

### 서 론

경제성장과 더불어 급변하는 산업화로 인해 중금속의 수요량은 하루가 다르게 증가하고 있다. 이들 대부분은 유독성으로 인해 인체 및 생태계에 광범위하게 영향을 미칠 뿐만 아니라 하천 및 토양 등의 환경에 심각한 오염원으로 작용하고 있다.

이들의 발생원으로는 주로 도금공장, 제련공장, 피혁공장, 페인트 제조 등이 있으며 음료수, 아이스크림제조업 등에서도 상당량이 배출된다. 또한 광산에서는 대부분 Fe, Zn, Cu, Ni과 Mn 등이 배출되며 도시 및 가정하수에서는 부식수도관 등에서 용출된 Cu, Pb, Zn, Cd 등이 함유되어 있다[2].

산업체에서 배출되는 폐수 중에는 중금속이 적절한 처리 없이 배출될 경우 생태계의 먹이사슬에 의한 농축효과로 인해 그 피해가 심각해질 수 있다. 중금속 중 Pb, Hg, Cd은 체내에 축적되면 치명적이다. 음용수를 통한 Cu 섭취량은 연수의 경우에 약 1.4 mg/day이고, 경수의 경우는 약 0.05 g/day 정도이며[4], 음용수에서의 Cu의 최대 허용농도를 3,000 µg/dm<sup>3</sup> 이하로 제시하였다[10, 11].

국내에서는 Cu의 경우 1mg/L 이하이며, Pb와 Hg의 경우 0.01 mg/L, 0.001 mg/L를 넘지 못하도록 먹는물 수질 기준에 명시되어있다[21](Table 1). 또한 Cu와 Pb도 일부 고등식물 및 미생물에 대해 유독한 금속이라 할 수 있으며, 포유동물에 대해서도 As 및 Hg과 더불어 가장 높은 독성을 나타

내는 것으로 알려져 있다[1, 9, 17].

수중의 중금속들은 용해상태 또는 불용해 상태로 아니면 유기금속상태나 침전 또는 흡착된 형태로 존재 한다[12]. 이처럼 다양한 형태로 존재하는 중금속을 처리하기 위해서는 적당한 상태로 변형을 시키거나 잔존상태 그대로 처리하여야 한다.

일반적인 중금속 처리방법으로는 침전법(precipitation), 흡착법(adsorption), 이온교환법(Ion Exchange), 역삼투압법(reverse osmosis) 등이 있다. 침전법은 가장 많이 이용되고 있는 방법으로서 주로 Lime(Ca(OH)<sub>2</sub>)을 이용하여 중금속을 침전 제거시키는 처리법이다[13]. 이 방법은 저비용으로 경제성이 우수하다는 장점이 있으나 용해도가 pH에 민감하여 좁은 범위의 최적 pH를 벗어날 경우 다시 용해되는 단점이 있다. 흡착법은 저농도의 중금속처리에는 효과적이거나 높은 처리비용으로 인해 경제성이 낮다. 그 외 이온교환법은 단일 또는 특정성분의 제거에 탁월한 효과가 있으나 불순물이 많은 폐수처리 시 부적당한 방법으로 알려져 있다. 역삼투압법은 중금속 처리에 효과적이거나 불순물이 있으면 fouling이나 clogging이 일어나며 처리비용이 높아서 산업체에서 일반화하여 사용하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 효과적인 중금속처리를 위해서는 높은 제거효율과 저렴한 처리비용의 조건을 갖추어야 한다. 기존처리 방법의 문제점을 극복하고 경제적으로 중금속을 제거할 수 있는 방법으로 생물학적 용출 방법에 대한 연구가 최근들어 주목받고 있다[3, 6, 15, 18-20].

미생물에 의한 중금속 흡착공정(Biosorption)은 중금속에 대한 흡착능이 우수하고, 미생물의 종에 따라 선택적인 흡착이 가능하며, 발효공정이나 생물학적 처리공정 등에서

\*Corresponding author  
Tel: 031-220-2614, Fax: 031-220-2533  
E-mail: ley@suwon.ac.kr

Table 1. Standard for drinking water quality in Korea.

Components	Standard concentration (mg/L)
Pb	0.01
As	0.01
Hg	0.001
CN	0.01
Cr	0.05
Cd	0.005
Cu	1
Zn	3

발생되는 폐슬러지를 값싸게 이용할 수 있어 폐기물의 재활용적인 측면에서도 고려해 볼만한 공정으로 알려져 있다 [5].

이처럼 미생물을 이용한 중금속처리는 저렴한 비용으로 다량의 biomass를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 미생물에 의한 중금속의 흡수와 탈착이 단시간 내에 이루어지면, 중금속의 선택적 분리가 용이하고, 고정화된 미생물은 재사용할 수 있으므로 중금속의 생물학적 처리방법은 현행 물리화학적 처리방법에 비하여 더 효율적이라 할 수 있다. 따라서, 미생물을 이용하여 슬러지의 중금속제거 특성에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

본 연구에서는 분리균주 *Exophiala* sp. LH2 균주를 이용하여 중금속 농도를 달리하여 중금속 제거효율을 조사하였으며, 또한, 용액의 pH와 온도변화에 따른 상관관계를 알아 보았다.

## 재료 및 방법

### 균주 및 배지 조성

본 연구에서 사용한 중금속 처리 균주는 *Exophiala* sp. LH2이다. 이 균주는 Biosorption 배지를 이용하였으며 [7, 8], 조성은 증류수 1 L에 20 g의 glucose, 3 g의 CaCO<sub>3</sub>, 2 g의 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 1 g의 K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 0.5 g의 MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 0.5 g의 KCl, 0.01 g의 FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O이 포함되어 있으며, 1 M HCl을 이용하여 이 배지의 pH를 5.5로 보정하였다. 또한, CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O, PbSO<sub>4</sub>, CrK(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·12H<sub>2</sub>O, ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, NiSO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O를 각각 1,000 ppm으로 제조하였다. 이후 필요에 의하여 10, 50, 100, 150, 200 ppm으로 희석하여 사용하였다. 각 배지 및 실험 시 사용되는 실험 재료는 Autoclave (TOMY, SS-325, Japan)를 사용하여 121°C에서 15분간 멸균한 후 사용하였다. 멸균 시 배지와 glucose는 따로 분리하여 각각 멸균하였다.

### 균주의 분리 및 동정

경안천 유역에서 채취한 퇴적토를 10% 접종원으로 하여 혈청병에 Biosorption 배지를 넣고 첨가된 중금속의 농도를

10 ppm에서 최대 200 ppm까지 점차적으로 증가시켜주며 계대 배양하였다. 약 20여회의 계대배양이 진행되면서 최종적으로 배양액 1 ml를 9 ml 증류수와 섞어 10배 희석법을 이용하여 10<sup>-4</sup>~10<sup>-10</sup>의 시료를 만들어 중금속이 함유되어진 고체 배지에 도말하였다. 도말한 plate를 일부는 30°C incubator에서 호기적으로 배양하였으며, 일부는 혐기조에 넣은 뒤에 질소가스로 혐기조를 채운 후에 뚜껑을 닫아 공기가 들어가지 않도록 기밀하여 incubator를 이용하여 30°C에서 약 10일간 배양한 뒤 균락체 형태, 색깔, 크기에 따라 선별하여 다시 plate에 접종하여 한차례 더 순수분리를 시도하였다.

균의 분자생물학적 동정을 위해서 plate에서 배양한 균체를 Bionics에 의뢰하여 18S rDNA sequencing 방법에 의거하여 동정하였다.

이 후 CLUSTAL W[16]를 사용하여, 염기서열을 조합하여 NCBI(The National Center for Biotechnology Information, <http://www.ncbi.nlm.nih>)에서 제공하는 Advanced Blast search를 이용하여 Genebank의 염기서열과 비교함으로써 곰팡이의 분자 동정을 하였다.

### 균주 *Exophiala* sp. LH2의 성장과 중금속제거에 미치는 환경인자의 영향

250 mL 삼각플라스크에 100 mL의 Biosorption 배지를 넣고 전 배양된 *Exophiala* sp. LH2 균주를 10%(v/v)가 되도록 접종한 후, 다양한 조건에서 7일간 진탕 배양 및 정지 배양하였다. Biosorption 배지에는 5종의 중금속을 각각 10, 50, 100, 150, 200 ppm으로 첨가하여 배양하였다. 균주생장에 미치는 배지의 pH 및 온도영향을 알아보기 위하여 pH 4, 5, 6, 7로 설정하였으며, 온도는 25, 37, 45°C로 설정하여 각각의 조건에서 최적 성장조건 및 중금속 제거효율을 관찰하였다. 매일 일정량의 시료 5ml를 회수하여 pH 및 O.D를 측정하였으며, 실험 종료 후 건조중량을 측정하기 위하여 시료 10 ml를 회수하여 원심분리(10,000 rpm, 10 min)하였다. 원심분리 후 상등액을 버린 후 남겨진 균체를 90°C의 건조기에서 24시간 건조 후 실온에서 방냉하여 중량을 측정하였다. 온도에 대한 영향을 제외한 모든 실험은 30°C에서 수행되었으며, 모든 실험조건은 3회 반복 실험하였다.

### 중금속 분석

배양액 중의 중금속 농도는 유도결합 플라즈마 원자 방사 분광기(ICP-MS, Elan 6100, Perkin Elmer, U.S.A.)를 이용하여 분석하였다. 배양이 종료된 후 10,000 rpm에서 10분간 원심분리(20PR-52D, HITACHI, Japan)하여 균체를 제거한 후 배양액 0.5 ml에 존재하는 유기물을 제거하기 위해서 질산용액(85%)을 2 ml 넣고 건조하는 전처리과정을 거친 후 분석하였다.

## 결과 및 고찰

### 중금속 제거능을 보이는 곰팡이의 순수 분리 및 동정

클로닝 된 유전자는 556 bp로 밝혀졌으며(Fig. 1), 종 간의 염기서열의 유사성 검정은 NCBI(The National Center for Biotechnology Information, <http://www.ncbi.nlm.nih>)에서 제공하는 Advanced Blast search를 이용한 결과 *Exophiala*와 높은 상동성을 보였고 그 중에서 *E. oligosperma*와 100% 상동성을 보였다. 보다 자세하게 동정하기 위해서는 다른 유전자(rDNA-ITS, Beta-tubulin, actin, calmodulin 등)의 염기서열을 분석 비교하고 형태적으로 자세하게 관찰을 해야겠지만 본 논문의 목적은 중금속을 제거하는 균주의 제거 특성을 알아보는 것이기 때문에 *Exophiala* sp.로 표기하고자 한다.

Fig. 2는 *Exophiala* sp. LH2를 현미경(BX41TF, OLYMPUS, Japan)으로 1,000배에서 관찰한 사진이다. 균체는 PDA에서 25°C에서 5일간 배양한 것을 멸균수에 현탁한 후 관찰한 것으로 단균사는 직경이 0.9~1.3  $\mu\text{m}$ 으로 관찰되었다.

### 분리균주 *Exophiala* sp. LH2의 생장 특성

배지의 pH 및 기질농도 변화에 따른 *Exophiala* sp. LH2의 성장을 관찰하였다. 초기 pH값을 각각 4, 5, 6, 7로 설정하였으나 중금속의 농도가 증가할수록 초기 pH값이 낮게 나타났다. 이는 배지에 첨가되는 중금속이 황산염의 형태로 있기 때문에 농도가 증가될수록 pH를 감소시켜주는 문제점이 있었다. 그러나, 첨가되는 중금속의 농도가 10~200 ppm으로 증가될 경우에 균주의 성장에는 큰 영향을 미치지 않는

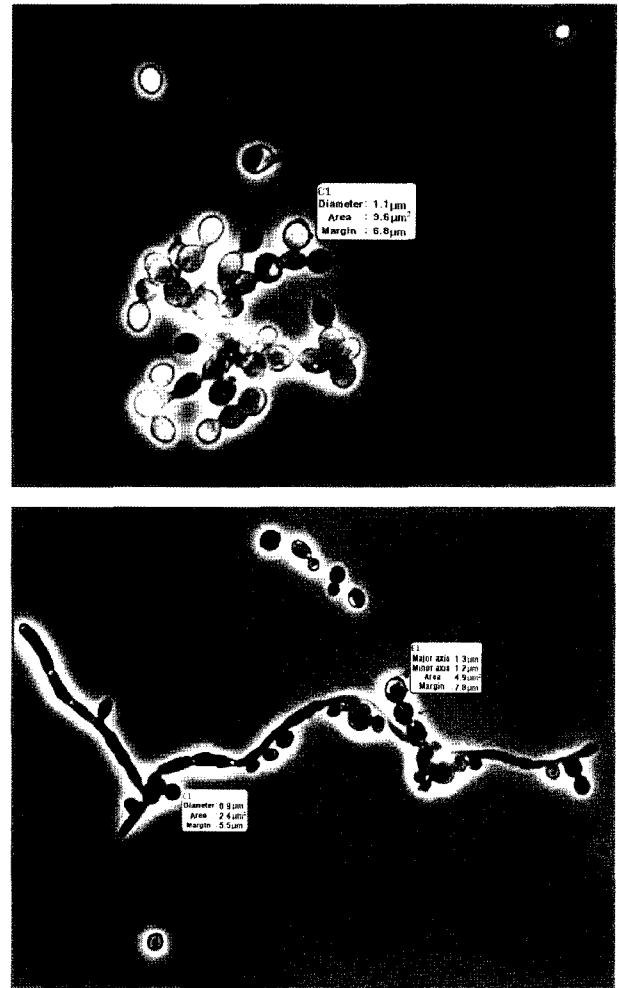


Fig. 2. Cellular morphology of *Exophiala* sp. LH2 grown in PDA plate culture at 25°C for 5 days ( $\times 1,000$ ).

```
TCCCAACCCATTGTTTATGATACCTAGTGTTGCTTCGGTAGGCCTGGTCT
ATCTGTTATAGACCTGCCGGGGGGCCGTAAGACGCCCGCCGGAGAGTGCC

TACCGACAGCCTCAACTCCAAAATTCTTTAACCAAACGTGTCTTTGTCTG
AGTAACGTCTTTTAAAATAAAGCAAACTTTCAACAACGGATCTCTTGGT

TCTGGCATCGATGAAGAACGCAGCGAAATGCGATAAGTAATGCGAATTGC
AGAATTCTCGTGAGTCATCGAATCTTTGAACGCACATTGCGCCCTTTGGT

ATTCCGAAGGGCATGCCTGTTTCGAGCGTCATTTTCACCCCTCAAGCCCCC
GGCTTGGTGTGGACGGTCTGGTCCGGGGACCTCAAACCCCTGGACCCC

TCCCAAAGACAATGACGGCGGGCTGTTGAACCCCGGTACACTGAGCATC
TTCACGGAGCACGTACCGGTCTCAAGGGTCGACGGCACCCGGTCTATACC

TATATTTTCAAGGTTGACCTCGGATCAGGTAGGAATACCCGCTGAACCTT
AAGCAT
```

556bp

Fig. 1. Nucleotide sequence of *Exophiala* sp. LH2.

것으로 나타났다. 진탕배양 시 배지의 pH가 4, 5, 6, 7인 환경 모두에서 전반적으로 시간이 지남에 따라 미생물 성장이 증가됨을 알 수 있었으며, 기질 농도가 증가함에 따라서 pH가 감소되는 것을 확인 할 수 있었다. 배지의 pH를 6, 7로 설정한 후 중금속의 농도를 달리하여 성장하는 균주의 흡광도 및 pH를 측정된 결과를 Fig. 3에서 나타내었다. 균주의 성장을 간접적으로 알 수 있는 지표 중의 하나인 흡광도의 증가 경향을 분석한 결과 pH 6인 환경에서 균주의 성장이 조금 더 활발하게 나타났다(Fig. 3). 그러나 본 실험의 경우 중금속이 함유된 배지이며 배양 균주가 균사체를 만드는 곰팡이이기 때문에 흡광도의 변화가 균주의 성장을 반드시 의미하지는 않는다. 따라서 실험이 종료된 5일째 배양액을 회수하여 건조중량을 측정 하였다. 각각의 중금속의 첨가량이 10~150 ppm으로 증가될 경우 균체의 건조중량(50~70 mg)에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으나, 첨가량이 200 ppm 이상으로 증가할 경우 건조중량이 절반이하로 나왔고 이는 고농도의 중금속 첨가로 균체의 성장이 저해받았음을 의미한다.

pH가 6, 7인 환경에서 정지배양 할 경우 시간이 지날수록 균체성장이 감소되는 것을 관찰할 수 있었으며, pH가 현저히 떨어지는 것을 관찰할 수 있었다(data not shown). 위의 결과를 종합적으로 균주는 호기적 성장을 하는 것으로 사료된다. 이후 모든 실험은 Shaking condition(진탕배양)으로 수

행하였다.

**Exophiala sp. LH2의 중금속 제거능에 미치는 환경인자의 영향**

분리균주 *Exophiala sp. LH2*를 중금속이 함유된 배지에서 배양하면서 각각의 중금속 농도 변화 및 pH 변화가 중금속(Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) 제거 효율에 미치는 영향을 알아

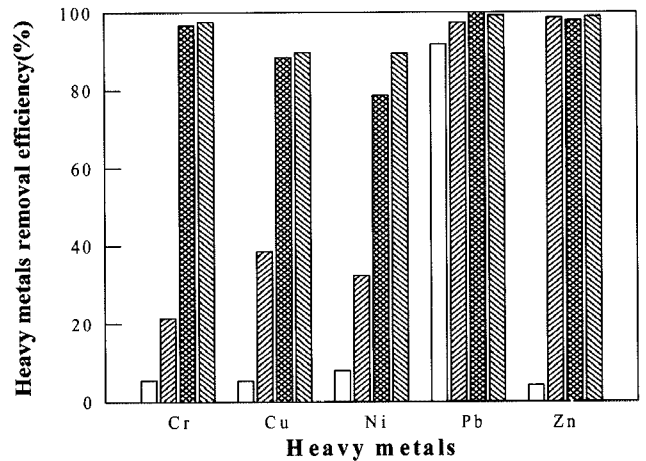


Fig. 4. Removal efficiencies of heavy metals at different pH conditions (\* Initial concentration : 100 ppm). pH: □; pH 4, ▨; pH 5, ▩; pH 6, ▪; pH 7.

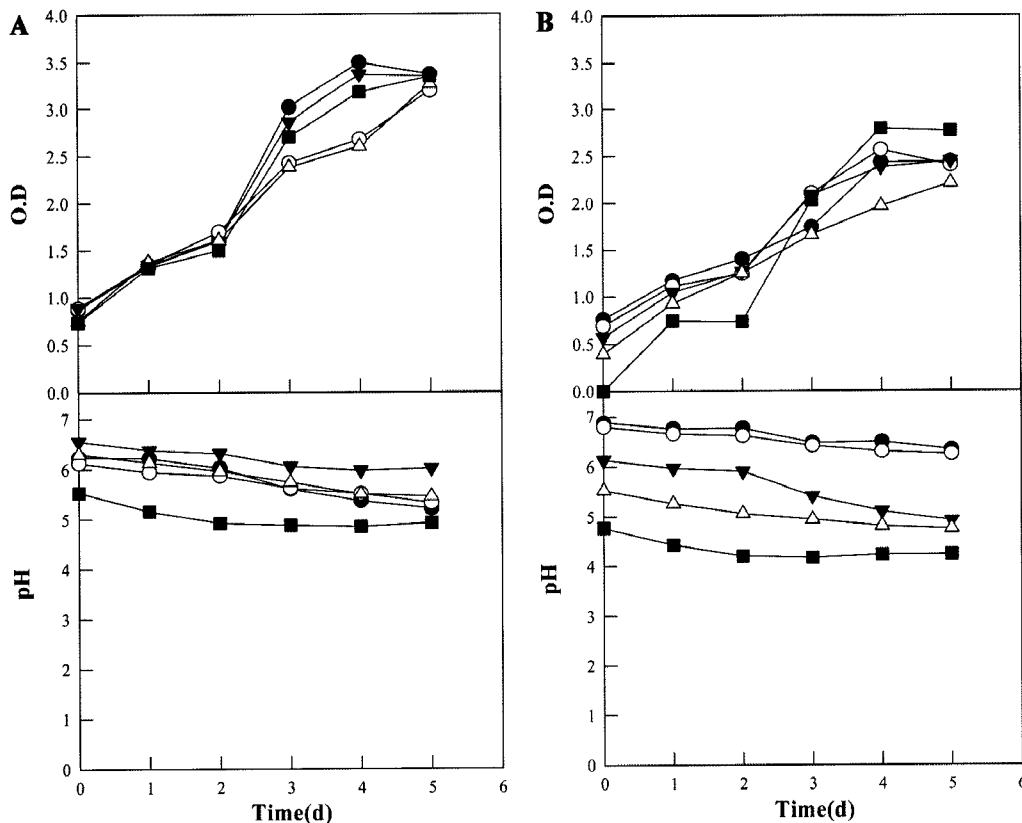


Fig. 3 Growth of *Exophiala sp. LH2* in shaking conditions at pH 6 (A) and pH 7 (B). Concentration (ppm): ●; 10, ○; 50, ▼; 100, △; 150, ■; 200.

보았다. 초기 pH가 4, 5, 6, 7인 배지에 첨가되는 중금속을 종류별로 각각 100 ppm씩 첨가한 후 접종한 분리균주 *Exophiala* sp. LH2의 배양이 완료된 시점(배양 5일 후)에 배양액 상에 남아있는 중금속을 측정하여 Fig. 4에 도시하였다. 모든 중금속에서 pH가 4에서 7로 증가됨에 따라 중

금속의 제거효율이 증가되는 경향을 관찰할 수 있었다. Pb를 제외한 Cr, Cu, Ni 등의 중금속은 약산성 환경인 pH 4 또는 5인 배지에서 균주에 의한 제거효율이 최저 5%에서 최고 38%였다. 이후 배지의 pH가 6 이상으로 증가하게 됨에 따라 제거효율은 비약적으로 증가하여 최저제거효율이 79%

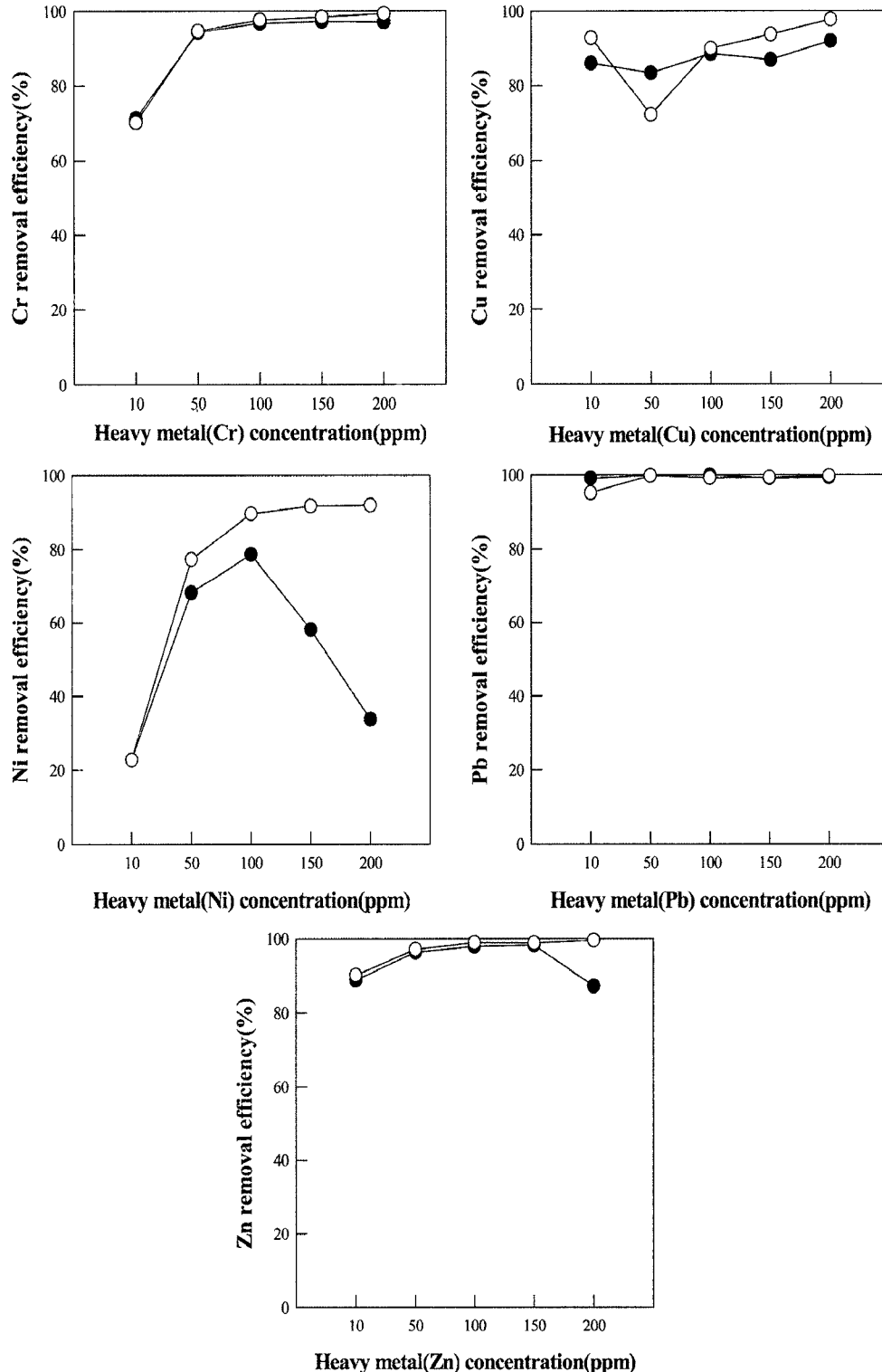


Fig. 5. Effects of the concentration of heavy metals on the removal efficiency of *Exophiala* sp. LH2 at pH 6 and pH 7. pH: ●; pH 6, ○; pH 7.

이상의 값을 보였다. 중금속 Pb의 경우는 pH의 영향을 거의 받지 않은 채 모든 영역에서 최저 92% 이상의 제거효율이 유지되었다. pH 4인 배지환경에선 Zn이 거의 제거되지 않았으나, 배지의 pH가 5 이상으로 증가하면서 98% 이상의 제거효율이 유지되었다. 이상의 결과에서 분리균주 *Exophiala* sp. LH2를 이용한 중금속의 제거는 pH 4 및 5의 약산성 환경보다는 중성 환경이 효율적임을 알 수 있었다. 이러한 결과는 최근 사상곰팡이류인 *Phanerochaete chrysosporium*를 이용한 Cd(II), Pb(II) 그리고 Cu(II) 등의 실험결과에서 pH 6일 때 최고의 금속 흡착률을 보였으며, 그 흡착률은 Langmuir sorption model과 일치한다는 보고[14]와 유사한 결과를 보인다.

배지의 pH가 6 및 7인 환경에서 중금속 농도의 증가가 균주의 중금속 제거효율에 미치는 영향을 Fig. 5에서 나타내었다. 첨가된 중금속 중 Ni과 Zn을 제외 할 경우 배지의 pH가 6 및 7인 환경에서 중금속의 농도가 증가함에 따라 제거효율도 증가하였으며, 첨가량이 200 ppm 이하인 경우는 균주에 의한 제거효율에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 반면, 중금속 Ni과 Zn은 각각 첨가량이 100 ppm 및 150 ppm 이상인 환경에서는 분리균주에 의한 제거효율이 감소함을 알 수 있었다. pH를 6으로 설정한 배지에서 생장하는 *Exophiala* sp. LH2 균주는 첨가된 Ni을 22~78%가량 제거하여 다소 낮은 제거효율을 보였으며, 첨가된 Cr은 중금속의 농도가 증가됨에 따라 제거효율도 71~97%로 증가하였다. *Exophiala* sp. LH2 균주는 150 ppm의 Zn이 첨가된 배지에서 최고 98%의 Zn을 제거하였으며, 200 ppm의 농도가 첨가될 경우 제거율이 다소 감소하는 경향을 보였다. *Exophiala* sp. LH2 균주는 첨가된 Pb을 200 ppm 이하의 모든 농도범위에서 99%의 제거하였다.

반면 pH를 7로 설정한 배지에서는 Ni과 Cr은 첨가되는 중금속의 농도가 증가함에 따라 *Exophiala* sp. LH2 균주에

의한 제거효율이 증가되어 각각 22~91%, 70~99%의 제거효율을 보였다(Fig. 5). *Exophiala* sp. LH2 균주는 배지에 첨가되는 중금속 Pb을 초기농도 10 ppm에서 200 ppm인 모든 범위에서 99% 이상 제거하였으며, Zn의 경우엔 첨가량이 증가됨에 따라 87~98% 이상의 제거효율을 보였다.

각 중금속에 대한 비제거속도를 Fig. 6에 나타내었다. *Exophiala* sp. LH2 균주 배양이 종료된 5일째 배양액으로부터 원심분리(10,000 rpm, 10 min) 후 균사체를 건조하여 얻은 건조 세포중량 값을 얻었다. 이로부터 총 5일의 배양기간 동안 제거된 중금속을 미생물 생물량(건조세포중량)으로 나누어 미생물 생물량에 근거한 비제거속도를 구하였다.

배양액의 pH가 6일 경우, 중금속농도에 비례적으로 비제거속도가 증가하여 최대 0.56-1.66(mg-heavy metals·L<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>·mg-DCW<sup>-1</sup>)의 값을 나타내었다. 또한 중금속의 농도가 200 ppm일 때, 그 이하의 농도에 비해 비제거속도값이 비약적인 증가를 보이는 것은, 고농도의 중금속이 200 ppm 씩 첨가되는 열악한 환경에서 균주의 생육이 저해되고 그에 따라 건조중량이 감소됨에 따라 나타난 결과로 보여진다.

배양액의 pH가 7인 경우에는 첨가되는 중금속의 종류와 무관하게, 첨가되는 농도에 의존적인 비제거속도를 보였다. 즉, 각각의 중금속 첨가량인 10 ppm에서 100 ppm으로 증가되는 경우, 비제거속도는 0.01에서 0.35(mg-heavy metals·L<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>·mg-DCW<sup>-1</sup>)로 증가하였다. 이후 첨가량이 150 ppm에서 200 ppm으로 증가됨에 따라 1.62에서 4.43(mg-heavy metals·L<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>·mg-DCW<sup>-1</sup>)까지 증가하였다.

5종류의 중금속을 각각 10 ppm씩 첨가한 배지의 pH가 7인 환경에서 *Exophiala* sp. LH2 균주를 접종하여 25°C, 37°C, 45°C의 온도에서 배양하며 온도의 차이에 따른 중금속 제거능을 알아보았다. 모든 중금속은 온도가 25°C에서 45°C로 증가함에 따라 제거효율이 감소하는 경향을 보였다. Cr의 경우 25°C에서 80.6%의 제거율을 보였으나 45°C로 온

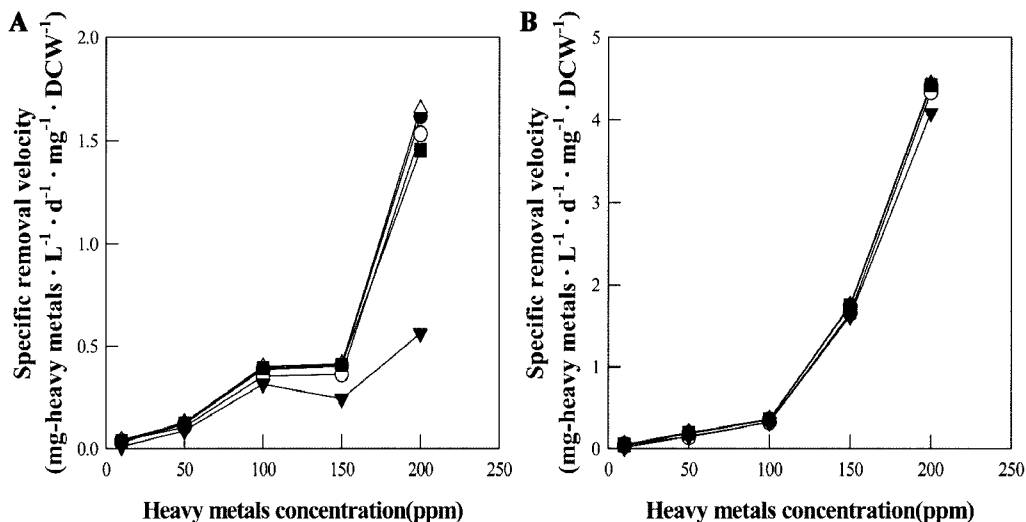


Fig. 6. Specific removal velocity of *Exophiala* sp. LH2 at pH 6 (A) and pH 7 (B). Heavy metal: ●, Cr, ○, Cu, ▼, Ni, △, Pb, ■, Zn.

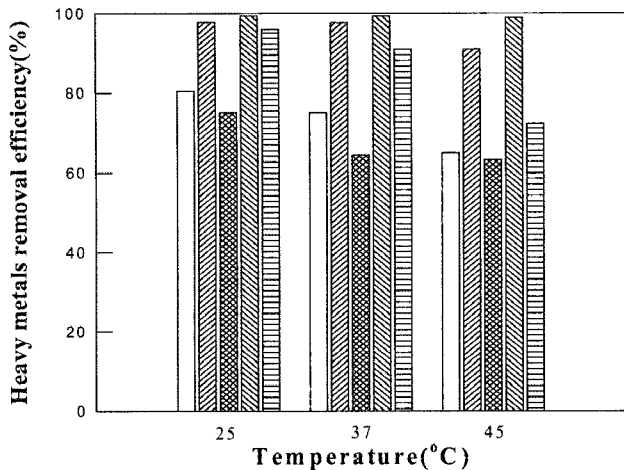


Fig. 7. Removal efficiencies of heavy metals at pH 7 and different temperature conditions (\* Initial concentration : 10 ppm). Heavy metal: □; Cr, ▨; Cu, ▩; Ni, ▪; Pb, ▫; Zn.

도가 증가함에 따라 제거율이 감소하여 65%로 감소하였으며, Cu의 경우 97.75%에서 91%로 Ni는 75%에서 63.2%로 감소하였다. Pb의 경우 99.33%에서 98.85%로 감소하였으며, Zn의 경우 96%에서 72.2%로 감소하는 경향을 보였다.

## 결론

분리균주 *Exophiala* sp. LH2를 이용하여 중금속 제거 효율 및 생장을 알아보았다. 분리균주는 중금속 Cr, Cu, Ni, Pb, Zn에 대한 내성을 가지고 있어 중금속 농도가 각각 200 ppm이 초과되지 않았을 경우 생육에 저해를 받지 않는 것으로 판단된다.

pH 변화에 따른 제거효율을 관찰한 결과 중금속을 각각 100 ppm씩 첨가할 경우 pH가 4에서 7로 제거효율이 증가하여, pH 7인 경우 Cr 97.58%, Cu 89.84%, Ni 89.6%, Pb 99.22%, Zn 98.98%로 나타났다. 반면 pH 7의 경우 첨가된 중금속을 각각 100 ppm으로 설정한 경우 Cr 97.58%, Cu 89.84%, Ni 89.6%, Pb 99.22%, Zn 98.98%로 제거효율이 가장 높게 관찰되었다. 즉 중금속의 첨가량이 각각 200 ppm 이하인 경우 pH가 4에서 7로 증가할수록 제거효율이 증가하였다. 따라서 여러 가지 중금속이 오염되어 있는 실제 오염원에 적용하기 위해서는 생장율을 일정하게 유지시킬 수 있는 방법과 여러 가지 오염물질의 처리효율을 동시에 증진시키기 위한 방법이 검토되어야 할 것으로 판단되며 이러한 문제점을 보완하면 실제 중금속 오염원에 적용할 경우 매우 좋은 처리효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

## 요약

본 연구에서는 분리균주 LH2를 이용하여 각각의 중금속 (Cr, Cu, Ni, Pb, Zn)에 대한 최적성장조건을 도출하였으며,

pH, 온도 및 중금속 농도 변화에 따른 중금속 제거효율을 관찰하였다. 분리균주는 18S rDNA 분석에 의거하여 종 유사성이 100%로서 *Exophiala* sp.로 동정되었다. 분리균주의 경우 25°C, pH 7인 진탕배양 조건에서 가장 높은 제거효율을 보였다. 첨가되는 중금속의 농도가 200 ppm 이하일 경우 중금속의 비제거속도를 구한 결과 pH 7인 조건에서 중금속의 종류와 무관하게 10 ppm에서 200 ppm으로 중금속의 농도가 증가함에 따라 0.01에서 4.43 mg-metal·L<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>·mg<sup>-1</sup>·DCW<sup>-1</sup>으로 증가하였다. pH 7로 설정된 배양액에 약 200 ppm의 중금속이 첨가될 경우 중금속의 제거효율은 Cr, Cu, Ni, Pb, 및 Zn 이 각각 99.28%, 97.67%, 91.94%, 99.77%, 99.61%로 관찰되었다.

## REFERENCES

- Bowen, H. J. M. 1979. *The Environmental Chemistry of the Elements*. Academic Press, London.
- Connell, D. W. and G. J. Miller. 1984. *Chemistry and ecotoxicology of pollution*. John Wiley & Sons, New York.
- Cho, I. C., E. S. Byeun, I. S. Kim, and S. C. Park. 1994. Leaching of Heavy Metals from Anaerobic Sewage Sludge by *Thiobacillus thiooxidans* and *Thiobacillus ferrooxidans*. *J. Kor. Solid Wastes Eng. Soc.* 1: 239-246.
- Davies, D. J. A. and B. G. Bennet. 1983. Exposure Commitment Assessments of Environmental Research Centre, London.
- Gadd, G. M. 1998. Accumulation of metals by microorganisms and algae. *Biotechnology* 6: 401-433.
- Jain, D. K. and R. D. Tyagi. 1992. Leaching of Heavy Metals from Anaerobic Sewage sludge by Sulfur-Oxidizing Bacteria. *Enzyme Microb. Technol.* 14: 376-383.
- Kiran, I., A. Ramer, and T. Sibel. 2005. Biosorption of Pb(II) and Cu(II) from aqueous solutions by pretreated biomass of *Neurospora crassa*. *Process Biochemistry* 40: 3550-3558.
- Lee, E. Y., J. S. Lim., K. H. Oh., J. Y. Lee., S. K. Kim., Y. K. Lee, and K. Kim. 2008. Removal of Heavy Metals by an Enriched Consortium. *J. Microbiology* 46: 23-28.
- Lee, M. G. and K. H. Suh. 1996. Study on Adsorption of heavy metal ions by Cheju scoria. *J. Kor. Environ. Sci. Soc.* 5: 195-201.
- Murley, L. 1992. *Pollution Handbook, National Society for Clean Air and Environmental Protection*. Brighton.
- Manahan, S. E. 1991. *Environmental Chemistry*. Lewis Publishers, Chelsea, MI (USA) 5th (ed).
- Maruyama, T., S. A. Hannah, and J. M. Cohen. 1975. Metal removal by physical and chemical treatment processes. *J. WPCF*, 47: 962-975.
- Pack, S. W. 1987. *Specific Chemical Reactions at the Cadmium Sulfide-Water Interface*. Ph. D Thesis, University of Delaware.
- Say, R., A. Denizli, and M. Y. Arica. 2001. Biosorption of cadmium(II), lead(II) and copper(II) with the filamentous

- fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Biotechnol.* **76**: 67-70.
15. Sreekrishnan, T. R. and R. D. Tyagi. 1996. A Comparative Study of the Cost of Leaching Out Heavy Metal from Sewage Sludges. *Proc. Biochem.*, **31**: 31-41.
  16. Thompson, J. D., D. G. Higgin, and T. J. Gibson. 1994. CLUSTAL W: improving the sensitivity of progressive multiple sequence alignment through sequence weighting, position-specific gap penalties and weight matrix choice. *Nucleic Acids Res.* **22**: 4673-4680.
  17. Train, R. E. 1979. *Quality Criteria for Water*. Castle House, London.
  18. Tyagi, R. C., C. Couillard, and F. T. Tran. 1991. Comparative Study of Bacterial Leaching of Metals from Sewage sludge in Continuous Stirred Tank and Air-lift Reactors. *Proc. Biochem.* **26**: 47-54.
  19. Tyagi, R. D., D. Couillard, and F. Tran. 1998. Heavy Metals Removal from Anaerobically Digested Sludge by Chemical and Microbial Methods. *Environ. Pollut.* **50**: 295-319.
  20. Tyagi, R. D. and D. Chouillard. 1991. An Innovative Biological Process for Heavy Metals Removal from Municipal Sludge. In *Martic A. M. Biological Degradation of Wastes*(ed.). pp. 307-318, Elsevier *Appl. Sci.* Amsterdam.
  21. 환경부 , [www.me.go.kr](http://www.me.go.kr)

(Received April 2, 2008/Accepted May 27, 2008)