

< Review >

유독 중금속 오염물질 처리를 위한 미생물균주의 최근 이용 및 개발

방 상 원* · 최 영 길 · 한 명 수

한양대학교 자연과학대학 생명과학과

Recent Development of Removal and Treatment of Toxic Heavy Metals by Microorganisms

Sang-Weon Bang*, Yong-Keel Choi and Myung-Soo Han

Department of Life Science, Hanyang University

Abstract - There are several ways to remove and treat toxic heavy metals in the environment: chemical, physical and biological ways. The biological treatment utilizes the natural reactions of microorganisms living in the environments. These reactions include biosorption and bioaccumulation, oxidation and reduction, methylation and demethylation, metal-organic complexation and insoluble complex formation. The biological reactions provide a crucial key technology in the remediation of heavy metal-contaminated soils and waters. According to recent reports, various kinds of heavy metal species were removed by microorganisms and the new approaches and removal conditions to remediate the metals were also tried and reported elsewhere. This was mostly carried out by microorganisms such as fungi, bacteria and alga. In addition, a recent development of molecular biology shed light on the enhancing the microorganism's natural remediation capability as well as improving the current biological treatment.

Key words : heavy metal, bioremediation, removal, biosorption, metal sulfide

서 론

경제개발 우선주의에 의해 야기된 우리나라의 환경용량은 과밀한 인구의 거주와 산업활동 등으로 인해 선진국에 비해 과도하게 부하되고 있으며, 이는 현대뿐 아니라 미래세대와 여타 생물의 생존까지 위협하게 되는 결과를 낳을 수 있다. 인간에게 독성 및 폐해를 일으킬 수 있는 환경오염물질은 크게 유기(예, 유류, 농약, 제초제)와 무기물질(예, 중금속, 방사능물질)로 구분된다. 이

중 무기 환경오염물질인 중금속은 먹이사슬(Food Chain)을 통한 생체축적 및 증폭(Bioaccumulation, Bioamplification)과정을 통해 최종소비자인 인간에게 전달되어, 인간의 활동과 생명에 치명적인 영향을 끼칠 수 있다. 이런 중금속의 생태계 유입방지 및 제거를 위해 우리나라는 물론 선진국들은 중금속을 유해오염물질로 분류하여 중점관리하고 있으며, 중금속을 처리하기 위한 새로운 방법의 개발을 시도하고 있다. 따라서, 이 논문에서는 최근에 보고된 생물학적 중금속의 처리방법을 중심으로 다양한 종의 균주 이용결과와 처리된 금속 종류 및 효율결과를 요약하였다.

* Corresponding author: Sang-Weon Bang, Tel. 02-2290-0909, Fax. 02-2290-1704, E-mail. swbang@hanyang.ac.kr

중금속 (Heavy Metal)

1. 유독 중금속의 종류

중금속 중 환경 생태계에 심각한 영향을 끼치는 중금속에는 비소(As), 카드뮴(Cd), 코발트(Co), 구리(Cu), 크롬(Cr), 수은(Hg), 망간(Mn), 니켈(Ni), 납(Pb), 셀레늄(Se), 아연(Zn) 등이 있다.

미국의 경우에는, 미국 환경청(Environmental Protection Agency)과 독극물 및 질환 등록국(Agency for Toxic Substances and Disease Registry)이 위 중금속들을 주요환경오염물질 목록(CERCLA Priority List of Hazardous Substances, 1997)에 포함시킴으로써, 중금속이 환경생태계로 유입되는 것을 방지하고 그들의 처리 및 제거에 중점을 두고 있다. 특히 275개에 달하는 미국 환경청 지정 주요 유기 및 무기환경오염물질 목록상에 비소(As), 납(Pb) 그리고 수은(Hg) 등의 중금속이 1, 2, 3위로 선정되어 있다는 사실은 중금속이 다른 유해환경물질보다 얼마나 더 큰 폐해를 일으킬 수 있는지를 역설적으로 보여주고 있다.

국내에서도 환경부 소속기관인 각 지방환경관리청이 토양측정망 12가지 조사항목 중에 중금속 6개 항목 [카드뮴(Cd), 구리(Cu), 비소(As), 수은(Hg), 납(Pb), 크롬(Cr)]을 포함시켜 토지용도별로(전답, 과수원 등 농경지와 공장용지, 잡종지 등) 조사하고 있으며, 지하수 수질기준의 10개 특정유해물질 항목에 구리를 제외한 나머지 5개 항목을 지정하여 중금속의 오염도를 조사하고 있다(환경부 환경백서 2000).

2. 유독 중금속의 환경생태계 유입

유독 중금속들은 화석연료 및 생활쓰레기의 연소(예, 납, 카드뮴, 수은), 광산채굴 활동, 농약 및 제초제(예, 비소), 건전지(예, 납, 카드뮴, 수은), 페인트(예, 납), 또는 목재 방부처리제(예, 비소)의 생산 및 사용, 중금속으로 오염된 어패류, 해조류와 농축산물 등의 음식물 섭취(예, 비소, 카드뮴, 수은) 그리고 자연적인 화산 활동에 의해 인간 및 지구계의 대기, 수질 및 토양으로 유입 전파된다.

국내의 경우, 환경부 토양오염도 조사결과에 의하면, 중금속 오염도는 토양환경보전법에서 규정한 농경지의 토양오염우려기준의 10분의 1에서 100분의 1 수준으로 낮은 오염도를 보이나 폐금속광산 주변지역 20지점을 포함한 총 29지점에서는 발암물질인 비소(As) 등이 토양오염 우려기준을 초과하는 높은 오염도를 보였음을

보고하였다(환경부 환경백서 2000).

3. 유독 중금속에 의한 환경오염 피해

환경생태계로 유입된 중금속들은 폭로과정(예, 섭취, 접촉, 호흡)을 통해 인간과 동물에게 전달되며, 특히, 먹이사슬(Food Chain)의 최종소비자 위치에 있는 인간에게는 독성을 지닌 중금속의 생체축적(Bioaccumulation) 현상을 통하여, 심각한 중금속 중독을 유발시키게 된다(Bolton Jr. and Gorby 1995).

비소의 경우, 경미한 정도의 비소중독환자는 설사와 구토 증상을 보이고, 심한 중독의 경우에는 환자에게 방광암, 폐암, 피부암을 일으키고, 신장과 간암을 일으킬 수 있다. 납중독은 일반적으로 신경계, 면역계, 신장과 생식기관에 손상을 입히는 것으로 알려져 있으며, 조산 또는 저능아 출산을 유발시킬 수 있다. 수은은 특히 어류의 지방질과 산모의 모유에 존재하기 쉬우며, 경미한 중독의 경우에는, 현기증, 피부질환, 두뇌활동의 교란을 일으키고, 심한 경우에는 영구적인 뇌, 신장기관의 파괴, 그리고 특히 발생과정중의 태아에 심각한 영향을 끼칠 수 있다. 경미한 카드뮴 중독의 경우에는 설사, 구토증상을 보이나, 심한 경우에는 폐, 신장기관에 치명적인 손상을 일으키는 것으로 알려져 있다(Goyer 1997; Hartwig 1998).

생물학적 중금속의 제거 및 처리 방법

금속이온을 처리 제거하는 기술은 화학적 침전, 화학적 산화 용매추출, 이온교환, 침탄법(Cementation), 막분리, 액상막분리(Liquid Membrane Separation), 역삼투, 유동상 전기분해(Fluidised Bed Electrolysis)법과, 물리적인 열분해, 오존처리(Ozonization), 자외선 광산화법(UV Photolysis), 그리고 생물적 방법으로 활성슬러지, 생물학적 산화법을 들 수 있다(환경부 국제환경동향 제 23호).

생물학적 방법은 미생물들의 자연적인 생체기작을 이용하는 방법으로, 미생물들이 유독 중금속의 용해성(solubility)과 비용해성(insolubility)을 결정짓는 가장 중요한 환경요인이라는 사실로 인해 중금속으로 오염된 환경을 복원시키는 데에 중요한 기술기반으로 이용된다. 이는 주로 박테리아 균주에 의한 중금속의 용해도(solubility)를 변화시키는 것과 곰팡이에 의한 heterotrophic leaching 그리고 미생물 균주들의 중금속 환원반응과 메틸화 및 탈메틸화기작 등을 들 수 있다(Wade *et al.* 1993; White *et al.* 1997).

1. 생체흡착과 생체축적 (Biosorption and Bioaccumulation)

많은 박테리아, 곰팡이, 그리고 조류(algae)와 같은 미생물들은 자신의 신진대사에 필요한 양이온 무기영양염류를 동화(assimilation) 하거나, 농축(concentrate)시킬 수 있는 능력을 가지고 있다(Bolton Jr. and Gorby 1995).

미생물들이 영양염류 금속을 축적하는 과정은 크게 생체축적(bioaccumulation)과 생체흡착(biosorption)으로 구분이 된다. 이중 에너지를 사용하여 능동적으로 금속을 체내로 전달 시켜, 무기금속화합물 동화과정을 거치면서 금속을 체내에 축적하는 것을 생체축적이라 하고, 생체흡착은 능동적인 에너지의 사용 없이, 미생물의 세포벽 표면에 있는 리간드(ligand)나 기능기(functional group)가 금속이온과 복합체를 형성하고, 궁극적으로는 금속이 세포벽에 흡착되어 제거되는 현상을 말한다(Bolton Jr. and Gorby 1995).

이런 자연적인 금속축적 능력들은 오염된 환경에서 미생물이 중금속을 축적하는 방법으로 이용되며, 생물학적 중금속 처리 및 제거에 하나의 기반이 된다.

2. 산화환원반응 (Oxidation and Reduction)

미생물들은 무기 오염원들의 용해도(solubility)와 이동도(mobility), 그리고 독성(toxicity)에 큰 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다(Wade *et al.* 1993; White *et al.* 1997). 이는 미생물이 지닌 생물학적 산화반응(oxidation)과 환원반응(reduction)에 의해서 이루어지는 것으로, 산화반응은 미생물이 금속의 전자(electron)를 제거하거나 금속 원자가(metal valence)를 증가시키는 반응을 말하며, 환원반응은 그 반대의 반응을 말한다. 한 예로써, 크롬(Cr)의 경우, 생태계에 잔존하는 Cr(III)은 독성과 용해도가 매우 낮으나, 미생물에 의해 산화된 상태의 Cr(VI)은 상대적으로 높은 독성과 이동성을 띄게 된다. 따라서, 이 산화환원 반응기작은 중금속을 처리하는 방법 중의 하나로 사용될 수 있다(Chen and Hao 1998).

3. 메틸화 및 탈메틸화반응 (Methylation and Demethylation)

많은 수의 미생물들은 독성을 지닌 중금속들로부터 자신을 보호하기 위한 수단으로 금속을 메틸화 또는 탈메틸화할 수 있는 능력을 지니고 있다. 이런 현상은 몇몇 금속들의 독성이 낮아지거나, 또는 반대로 높아지는 결과를 유발시키게 된다. 한 예로, 셀레늄(Se)의 경우, 미생물에 의해 메틸화된 dimethyl selenide는 원래 상태의 셀레늄

보다 낮은 독성을 띄게 되는 반면, 수은(Hg)의 경우에는, 메틸화된 수은이 원래상태의 수은보다 더 큰 독성을 띄게 되는 것으로 알려져 있다. Pongratz와 Heumann (1999)의 실험에 의하면, 극지점에서 분리된 여러 해양 미생물 균주들의 혼합배양을 통하여, 그들이 메틸화된 trimethyl lead와 monomethyl cadmium을 생산할 수 있으나, methylated mercury는 생산하지 못함을 보고하였다. 그러나 이러한 메틸화 및 탈메틸화반응은 미생물의 종류와 환경, 그리고 금속의 종류에 따라서 달라진다. 미생물에 의해 메틸화가 될 수 있는 금속은 셀레늄(Se), 수은(Hg), 비소(As), 납(Pb), 백금(Pt), 주석(Sn) 등이 알려져 있으며, 이는 조건에 따라서 금속의 독성을 낮추기 위한 처리 방법의 하나로 활용 되기도 한다(Bolton Jr. and Gorby 1995).

4. 금속 유기물질 복합반응 (Metal-organic complexation)

몇몇 미생물들은 금속복합체 형성물질(metal-complexing agent)을 생산할 수 있으며, 이 물질이 금속의 용해도와 이동도를 증가시킴으로써, 독성을 띤 금속들이 유기물질과 복합체(complex)를 형성하는 결과를 낳는다. 이 기작은 수용액 내의 자유 무기염류(free inorganics)의 농도를 낮추는 기능을 함과 동시에 복합체를 형성하게 된 금속이 체내로 유입(uptake)되는 것을 저지시키는 기능을 하게 된다. 미생물들이 생산하는 대표적인 금속 chelating agent의 예로는 siderophores를 들 수 있으며, 이는 *Alcaligenes eutrophus* CH34 균주가 독성을 띤 중금속으로부터, 자신을 보호하는 기작으로 알려져 있다(Diels *et al.* 1999).

5. 비용해성 복합체형성 (Insoluble complex formation)

Sulfate-reducing bacteria들은 dissimilatory sulfate reduction과정을 통해 sulfate를 sulfide이온으로 환원시킬 수 있다. 이때 생산된 sulfide이온들은 수용액 상태의 양이온 금속들과 반응하여, 용해도가 낮은 metal sulfides를 형성하는데, 그 결과 수용액 상태의 금속 이온이 metal sulfides로 침전되고, 궁극적으로는 금속이 제거되는 결과를 낳는다(White *et al.* 1998). Sulfide와 반응하여 metal sulfide로 침전이 되는 금속 이온의 종류들은, 카드뮴(Cd), 은(Ag), 수은(Hg), 납(Pb), 니켈(Ni), 셀레늄(Se), 아연(Zn) 등이 있으며, 이 비용해성 복합체형성 기작은 중금속 제거 처리시설에 자주 활용되고 있다(Bolton Jr. and Gorby 1995).

중금속 처리를 위한 최근 미생물 균주의 이용 및 개발

1. 생체축적 (Biosorption and Bioaccumulation)

최근 Day 등(2001)은 사상곰팡이류인 *Phanerochaete chrysosporium*의 생체를 이용하여, Cd(II), Pb(II), 그리고 Cu(II) 등의 중금속을 흡착방법에 의해 제거한 실험결과를 보고하였다. 이 균주는 pH가 6.0일 때 최고의 금속 흡착률을 보였고, 그 흡착률은 Langmuir sorption model과 일치하는 결과를 보였다. Yu 등(2000)은 *Durvillaea potatorum*을 포함하는 여러 종의 해수 거대조류(macroalgae)를 이용한 생체흡수제(biosorbent)를 개발하여, 중금속 제거에 사용한 결과, 그 생체흡착제의 금속 흡착률이 여러 이가를 띤 금속(divalent metal)에 대해 0.8 ~ 1.5 mmol g⁻¹(dry wt)에 이르는 것을 보고 하였다. 이 외에 조류(algae)를 이용한 다양한 중금속의 흡착제거 실험 결과들이 보고되었는데, 이는 *Cladophora crispate* 균주(Ozer et al. 2000), *Durvillaea*, *Laminaria*, *Ecklonia* 그리고 *Homosira* 균주(Figueira et al. 2000), *Chlorella sorokiniana*를 포함한 11종의 조류(Chong et al. 2000), *Microcystis aeruginosa*(Pradhan et al. 1998) 등을 이용한 보고들이 포함된다.

한편 발효공정에서 부산물로 남은 *Bacillus lentus*, *Aspergillus oryzae*와 *Saccharomyces cerevisiae* 등의 균주를 사용한 중금속 제거실험에 따르면, 구리와 카드뮴에 대해서는 *Bacillus lentus*균주가 최고의 흡착율을, 그 다음으로 *Aspergillus oryzae*와 *Saccharomyces cerevisiae* 순을 보였고, 반면, 아연의 경우에는, 전반적으로 모든 균주가 그 금속에 대해 낮은 흡착율을 보였다고 보고했다(Vianna et al. 2000). 이는 이 미생물들이 서로 다른 기능을 지닌 세포벽 구조를 지니고 있고, 이로 인해, 금속흡착률과 흡착되어지는 금속종류에 차이가 있음을 암시한다. 이런 현상은 *Rhizopus arrhizus*(사상곰팡이류)를 이용한 Pb(II), Cu(II)와 Zn(II)의 제거실험 결과에서도 볼 수 있는데, 이 균주에 대해 가장 흡착률이 높은 금속은 Pb(II)였고, 그 다음으로 Cu(II)와 Zn(II)순이었음을 보고하였다(Sa et al. 2000). 각기 Yeast의 일종인 *Rhodotorula rubra*를 이용한 카드뮴(Cd)과 납(Pb)의 흡착제거 보고에 의하면, 이 균주의 금속 흡착율은 pH가 낮을 때 함께 저하되는 것으로 보고되었다(Salinas et al. 2000). *Aspergillus niger*를 이용한 실험에서는, 살아있는 *Aspergillus niger*균주보다 0.1N NaOH로 처리한 균주가 Pb, Cd, Cu의 제거에 더 효율적이었으나, Ni의

경우에는 살아있는 균주가 더 효율적임을 보고하였다(Kapoor et al. 1999).

*Pseudomonas aeruginosa*을 이용한 실험에서, 이 균주가 세포벽에 여러 금속에 대해 서로 다른 흡착도를 지닌 두개의 수용장소(receptor site)가 존재하고 있으며, 세포벽에 존재하던 Ca과 Mg 금속들이 중금속과 치환되어, 결과적으로 중금속이 세포벽에 흡착되는 것을 보고하였다(Philip et al. 2000). *Arthrobacter* sp.의 경우, 여러 실험을 통해 적어도 두개의 약산성 receptor site가 이 균주의 세포벽에 존재하며, 그 균주에 의한 금속흡착도는 배양액의 pH에 따라 많은 영향을 받는다고 보고하였다(Pagnanelli 2000). 화학적으로 처리된 *Citrobacter* MCM B-181균주는 Cd에 대해 증가된 흡착도를 보였으나, Pb와 Zn의 흡착도에는 영향을 끼치지 못했다. 또한 일반적으로 이 균주에 의한 중금속의 uptake는 pH, 초기 중금속의 농도, 생물체 농도와 배양액의 종류에 따라 큰 영향을 받는다고 보고하였다(Puranik and Paknikar 1999). 이외, *Sphaerotilus natans*을 이용한 Cr(III)의 흡착제거 실험결과(Solisio et al. 2000)와, *Pseudomonas fluorescens* 4F39을 이용한 여러 중금속의 흡착제거 실험보고(Lopez et al. 2000)가 있다. 이중 *Pseudomonas fluorescens* 4F39에 의한 실험은 이 균주가 여러 금속에 대하여 Ni>Hg>U>As>Cu>Cd>Co>Cr>Pb 순서의 금속 흡착도를 띠는 것을 보고하였다. 특히, *E. coli*의 outer membrane protein인 OmpC를 분자생물학적인 방법을 사용하여 조작함으로써, ompC가 조작된 균주가 조작되지 않은 균주에 비해 3~6배로 증가된 중금속 흡착능력을 갖게 된 보고가 있다(Cruz et al. 2000). 또한, 중금속에 저항성이 높은 *Ralstonia eutropha*균주를 사용하여 세포의 표면에 쥐의 metallothionein 유전자를 발현시킴으로써 재조합된 metallothionein이 카드뮴을 효과적으로 제거할 수 있음을 보고하였다(Valls et al. 2000).

2. 산화환원반응 (Oxidation and Reduction)

Smith와 Gadd(2000)는 Cr(VI)를 Cr(III)로 환원시키는 능력을 지닌 sulfate-reducing bacterial biofilm을 이용하여 크롬을 처리한 실험을 보고하였다. Philip 등(1999)은 폐수에서 분리된 미생물-중의 하나인 *Bacillus coagulans*균주가 Cr(VI)를 Cr(III)로 환원시키는데 효율적인 능력을 지니고 있음을 보고하였고, 그 균주를 이용한 reactor실험결과 수용액에 존재하는 모든 크롬 [초기 Cr(VI)농도 26 mg l⁻¹]을 24시간 내에 제거할 수 있었다. Bender 등(2000)은 immobilized된 미생물 silica

mat consortium을 개발하고, U(VI)를 U(IV)로 환원시켜서 초기농도 0.2 mg/l의 U(VI) 금속을 80%까지 제거할 수 있음을 보고하였다.

3. 비용해성 복합체형성 (Insoluble complex formation)

Citrobacter sp. 균주의 경우, 여러 종류의 중금속들이 무기인염 (inorganic phosphate) ligand와 결합하여 비용해성의 화합물로 전환되고, 궁극적으로는 균주의 세포벽에 침전 (precipitation)되는 것을 보고하였다 (Macaskie *et al.* 2000). 이는 금속이온이 무기인염과 결합하여 비용해성 복합체를 형성한 예이다. 한편, 가장 보편적인 금속의 비용해성 복합체형성방법으로 금속이온이 미생물이 생산한 sulfide이온과 결합하여 비용해성의 metal sulfide로 침전되어 제거되는 예를 들 수 있다. Sharma 등 (2000)은 염수침적층으로부터 중금속에 저항성이 높은 *Klebsiella planticola* Cd-1을 분리하였는데, 이 균주가 thiosulfate가 첨가된 배양조건에서 상당한 양의 카드뮴을 비용해성의 CdS로 침전 시키는 것을 보고하였다. Sulfate-reducing bacteria를 이용한 Upflow Anaerobic Fixed-Film (UAFF) reactor의 경우, 200 mg l⁻¹ 농도의 Cu, 150 mg l⁻¹ 농도의 Ni과 Zn, 75 mg l⁻¹ 농도의 Cr, 50 mg l⁻¹ 농도의 Cd, 그리고 40 mg l⁻¹ 농도의 Pb를 metal sulfides의 형태로 100% 침전 제거할 수 있음을 보고하였다 (El Bayoumy *et al.* 1999). White 등 (1998)은 integrated microbial process를 개발하여 Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, 그리고 Zn 등의 중금속들을 효과적으로 제거할 수 있었는데, 이는 sulfur-oxidizing bacteria가 생산한 황산이 중금속으로 오염된 토양으로부터 중금속을 생물추출 (bioleaching)하고, sulfate-reducing bacteria를 이용한 혐기성 bioreactor가 중금속을 비용해성의 metal sulfide로 침전 제거하는 것이다. 한편 습지에서 분리된 여러 sulfate-reducing bacteria를 조사한 결과 습지조건과 환경에 따라서, sulfate-reducing bacteria집단에 많은 차이를 보였고, 그 균주들의 sulfide이온 생산력과 중금속 제거효율에는 상관관계가 없다고 주장하였다. 이는 다른 생물학적 중금속 제거 기작이 관여하였음을 암시한다 (Webb *et al.* 1998). 한편, 기존의 비용해성 복합체형성 제거 방법의 효율을 높이기 위해, *Salmonella typhimurium*으로부터 분리된 thiosulfate reductase 유전자를 이용, 그 유전자의 발현을 증폭시킨 재조합 균주를 개발하여, 중금속 제거 및 처리방법에 사용한 실험보고가 있다. 이는 재조합된 thiosulfate reductase가 무기

물질인 thiosulfate를 환원함으로써 sulfide이온을 배가 생산하고, 수용액에 용존하는 높은 농도의 카드뮴, 납, 아연 등의 금속을 metal sulfide의 형태로 효율적으로 제거한 보고이다 (Bang *et al.* 2000a, b).

결 론

최근 중금속의 제거 및 처리방법은 몇몇 미생물이 지닌 중금속 생체흡착 기작을 이용한 방법들이 대부분이며, 이는 다양한 종류의 중금속들이 미생물의 세포벽에 존재하는 리간드 (ligand)나 기능기 (functional group)의 종류에 따라 흡착되는 현상을 이용하는 방법이다. 특히, 중금속을 비롯한 여러 방사능 중금속의 최근 처리 실험 결과는, 향후 생물학적 방법에 의한 방사능원소의 처리 기술의 개발 가능성을 보여주고 있고, 또한, 발효공정의 부산물로 남은 미생물들을 중금속 흡착제로 재활용하여 처리한 시도 등은, 미생물의 종류와 특성에 따라, 여러 생물공학 공정에서 남은 다양한 종류의 부산물(미생물)을 중금속 처리에 재활용 할 수 있는 기술개발을 제시하고 있다. 한편, 급속한 분자생물공학 기술의 발전은 기존 미생물들의 중금속 제거 및 처리기작 능력을 배가시키고, 새로운 처리기작의 개발을 가능하게 하는 방법으로 최근 주목을 받고 있다.

적 요

중금속을 처리하는 방법에는 일반적으로 화학적, 물리적 그리고 생물학적 처리방법 등이 있다. 이중 생물학적 처리방법은 미생물들의 자연 생체기작을 이용하는 방법으로, 생체축적 (biosorption & bioaccumulation), 산화환원반응 (oxidation & reduction), 메틸화 및 탈메틸화반응 (methylation & demethylation), 금속 유기물질 복합반응 (metal-organic complexation)과 비용해성 복합체형성 (insoluble complex formation) 등의 기작을 이용한 방법이다. 이런 중금속에 대한 생물학적 기작들은 중금속으로 오염된 환경을 복원시키는 데에 중요한 기술기반을 제공한다. 최근 금속의 종류와 미생물균주의 종류와 조건 그리고 오염환경에 따른 다양한 방법의 중금속 처리들이 제시되었고, 이는 주로 곰팡이, 박테리아, 조류 (algae) 등을 이용한 방법들이다. 또한 분자생물학의 발전과 더불어 중금속 제거능력을 배가 시킨 균주의 최근 개발시도는 기존의 생물학적 처리방법을 개량 발전시킬 수 있는 가능성을 제시하고 있다.

인 용 문 헌

- 환경부. 2000. 국제환경동향 제23호.
- 환경부. 2000. 환경백서 2000.
- Bang SW, DS Clark and JD Keasling. 2000a. Engineering hydrogen sulfide production and cadmium removal by expression of the thiosulfate reductase gene (*phsABC*) from *Salmonella enterica* Serovar *Typhimurium* in *Escherichia coli*. *Appl. Environ. Microbiol.* 66:3939-3944.
- Bang SW, DS Clark and JD Keasling. 2000b. Cadmium, lead, and zinc removal by expression of the thiosulfate reductase gene from *Salmonella typhimurium* in *Escherichia coli*. *Biotechnol. Lett.* 22:1331-1335.
- Bender J, MC Duff, P Phillips and M Hill. 2000. Bioremediation and bioreduction of dissolved U(VI) by microbial mat consortium supported on silica gel particles. *Environ. Sci. & Technol.* 34:3235-3241.
- Bolton JH and YA Gorby. 1995. An overview of the bioremediation of inorganic contaminants. pp.1-16. In *Bioremediation of Inorganics* (Hinchee, RE, JL Means & DR Burris eds.). Battelle Press, Columbus.
- Chen JM and OJ Hao. 1998. Microbial chromium (VI) reduction. *Crit. Rev. Environ. Sci. & Technol.* 28:219-251.
- Chong AMY, YS Wong and NFY Tam. 2000. Performance of different microalgal species in removing nickel and zinc from industrial wastewater. *Chemosphere* 41:251-257.
- Cruz N, S Le Borgne, G Hernandez-Chavez, G Gosset, F Valle and F Bolivar. 2000. Engineering the *Escherichia coli* outer membrane protein OmpC for metal bioadsorption. *Biotechnol. Lett.* 22:623-629.
- Day R, A Denizli and MY Arica. 2001. Biosorption of cadmium (II), lead (II) and copper (II) with the filamentous fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Bioresource Technol.* 76:67-70.
- Diels L, M De Smet, L Hooyberghs and P Corbisier. 1999. Heavy metals bioremediation of soil. *Mol. Biotechnol.* 12:149-158.
- El Bayoumy M, JK Bewtra, HI Ali and N Biswas. 1999. Removal of heavy metals and COD by SRB in UAFF reactor. *J. Environ. Eng.* 125:532-539.
- Figueira MM, B Volesky, VST Ciminelli and FA Roddick. 2000. Biosorption of metals in brown seaweed biomass. *Water Res.* 34:196-204.
- Goyer RA. 1997. Toxic and essential metal interactions. *Annu. Rev. Nutr.* 17:37-50.
- Hartwig A. 1998. Carcinogenicity of metal compounds: possible role of DNA repair inhibition. *Toxicol. Lett.* 103:235-239.
- Kapoor A, T Viraraghavan and D Cullimore. 1999. Removal of heavy metals using the fungus *Aspergillus niger*. *Bioresource Technol.* 70:95-104.
- Lopez A, N Lazaro, JM Priego and AM Marques. 2000. Effect of pH on the biosorption of nickel and other heavy metals by *Pseudomonas fluorescens* 4F39. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 24:146-151.
- Macaskie LE, KM Bonthron, P Yong and DT Goddard. 2000. Enzymically mediated bioprecipitation of uranium by a *Citrobacter* sp.: a concerted role for exocellular lipopolysaccharide and associated phosphatase in biomimneral formation. *Microbiology* 146:1855-1867.
- Ozer D, A Ozer and G Dursun. 2000. Investigation of zinc (II) adsorption on *Cladophora crispata* in a two-staged reactor. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 75:410-416.
- Philip L, L Iyengar and C Venkobachar. 2000. Biosorption of U, La, Pr, Nd, Eu and Dy by *Pseudomonas aeruginosa*. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 25:1-7.
- Philip L, C Venkobachar and L Iyengar. 1999. Immobilized microbial reactor for the biotransformation of hexavalent chromium. *Int. J. Environ. Pollut.* 11:202-210.
- Pongratz R and KG Heumann. 1999. Production of methylated mercury, lead, and cadmium by marine bacteria as a significant natural source for atmospheric heavy metals in polar regions. *Chemosphere* 39:89-102.
- Pradhan S, S Singh, LC Rai and DL Parker. 1998. Evaluation of metal biosorption efficiency of laboratory-grown *Microcystis* under various environmental conditions. *J. Microbiol. Biotechnol.* 8:53-60.
- Pagnanelli F, M Papini, L Toro, M Trifoni and F Veglio. 2000. Biosorption of metal ions on *Arthrobacter* sp.: biomass characterization and biosorption modeling. *Environ. Sci. Technol.* 34:2773-2778.
- Puranik PR and KM Paknikar. 1999. Biosorption of lead, cadmium, and zinc by *Citrobacter* strain MCM B-181: *Characterization* studies. *Biotechnol. Prog.* 15:228-237.
- Sa Y, A Kaya and T Kutsal. 2000. Lead, copper and zinc biosorption from bicomponent systems modelled by empirical Freundlich isotherm. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 53:338-341.
- Salinas E, ME de Orellano, I Rezza, L Martinez, E Marchesvky and MS de Tosetti. 2000. Removal of cadmium and lead from dilute aqueous solutions by *Rhodotorula rubra*. *Bioresource Technol.* 72:107-112.
- Sharma PK, DL Balkwill, A Frenkel and MA Vairavamurthy. 2000. A new *Klebsiella planticola* strain (Cd-1) grows anaerobically at high cadmium concentrations and precipitates cadmium sulfide. *Appl. Environ. Mi-*

- crobiol. 66:3083–3087.
- Smith WL and GM Gadd. 2000. Reduction and precipitation of chromate by mixed culture sulphate-reducing bacterial biofilms. *J. Appl. Microbiol.* 88:983–991.
- Solisio C, A Lodi, A Converti and M Del Borghi. 2000. The effect of acid pre-treatment on the biosorption of chromium (III) by *Sphaerotilus natans* from industrial wastewater. *Water Res.* 34:3171–3178.
- Valls M, S Atrian, V de Lorenzo and LA Fernandez. 2000. Engineering a mouse metallothionein on the cell surface of *Ralstonia eutropha* CH34 for immobilization of heavy metals in soil. *Nature Biotechnol.* 18:661–665.
- Vianna LNL, MC Andrade and JR Nicoli. 2000. Screening of waste biomass from *Saccharomyces cerevisiae*, *Aspergillus oryzae* and *Bacillus lentus* fermentations for removal of Cu, Zn and Cd by biosorption. *World J. Microbiol Biotechnol.* 16:437–440.
- Wade MJ, BK Davis, JS Carlisle, AK Klein and LM Valoppi. 1993. Environmental transformation of toxic metals. *Occup. Med.* 8:574–601.
- Webb JS, S McGinness and HM Lappin-Scott. 1998. Metal removal by sulphate-reducing bacteria from natural and constructed wetlands. *J. Appl. Microbiol.* 84:240–248.
- White C, JA Sayer and GM Gadd. 1997. Microbial solubilization and immobilization of toxic metals: key biogeochemical processes for treatment of contamination. *FEMS Microbiol. Rev.* 20:503–516.
- White C, AK Sharman and GM Gadd. 1998. An integrated microbial process for the bioremediation of soil contaminated with toxic metals. *Nature Biotechnol.* 16:572–575.
- Yu Q, P Kaewsarn, JT Matheickal and W Ma. 2000. Pre-treated biomass of marine macroalgae as low cost high efficiency adsorbent for heavy metal ions. *J. Chin. Inst. Chem. Eng.* 31:411–415.

(Received 28 December 2000, accepted 20 April 2001)