

중금속내성균의 중금속 축적에 미치는 외부요인의 영향

조주식 · 이홍재¹⁾ · 이원규¹⁾ · 허중수¹⁾

경상대학교 공동실험실습관, ¹⁾경상대학교 농화학과

Effect of External Factors on Heavy Metal Accumulation in the Cell of Heavy Metal-Tolerant Microorganisms

Ju-Sik Cho, Hong-Jae Lee¹⁾, Won-Kyu Lee¹⁾ and Jong-Soo Heo¹⁾ (Central Laboratory, Gyeongsang National University, Chin Ju 660-701, Korea ; ¹⁾Dept. of Agricultural Chemistry, Gyeongsang National University, Chin Ju 660-701, Korea)

Abstract : This study was performed to develop the biological treatment technology of wastewater polluted with heavy metals. Heavy metal-tolerant microorganisms, such as *Pseudomonas putida*, *P. aeruginosa*, *P. chlororaphis* and *P. stutzeri* possessing the ability to accumulate cadmium, lead, zinc and copper, respectively, were isolated from industrial wastewater and mine wastewater polluted with various heavy metals. The effect of several external factors, such as temperature, pH and heavy metal compounds on heavy metal accumulation in the cells was investigated.

The amount of heavy metal accumulation into cells according to the kind of heavy metal compound was slightly increased in the case of the heavy metal compound with -nitrate group, but generally, there is little change according to the kind of compound in the amount of heavy metal accumulation.

The amount of heavy metal accumulation according to the precultured time was increased in the case of the cell precultured for 24 hours, but generally the precultured time did not affect to the amount of heavy metal accumulation.

Heavy metal accumulation into cells was affected by several external factors, such as temperature and pH. The optimum temperature and optimum pH of the accumulation of heavy metal into cells were 20~37°C and pH 6~8, respectively.

By increasing the concentration of each heavy metal-tolerant microorganism in the solution, the total amount of heavy metal accumulated was increased, whereas the amount of heavy metal accumulated per cell(mg, heavy metal/g, dry cells) was decreased. These results indicated that the amount of heavy metal accumulated was not proportional to the concentration of microorganisms.

서 론

자연계에는 수계로부터 여러가지 중금속 이온들을 선택적으로 흡착 또는 흡수할 수 있는 능력을 지닌 미생물들이 존재하는 것으로 알려져 있으며, 이러한 미생물들은 자연으로부터 유용한 금속의 회수와 환경오염의 조절 차원에서 큰 관심을 끌어 왔다. 또한 최근에는 중금속오염폐수의 처리법으로 이용되고 있는 물리화학적 처리법의 단점을 보완하기 위하여 미생물을 이용하여 중금속을 처리하려는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 결과 이온교환 수지 혹은 활성탄에 비하여 중금속 처리효율이 더 높은 미생물들이 발견되고 있다.^{1,2)}

중금속에 대한 미생물의 작용은 일반적으로 ① Intracellular accumulation, ② Cell surface binding, ③ Siderophore interactions, ④ Metabolite solubilization or immobilization, ⑤ Polymer binding and transport, ⑥ Enzyme-mediated transformations의 여섯가지 과정으로 나타나는 것으로

알려져 있다.³⁾

대부분의 미생물과 중금속의 상호작용은 상기 여섯가지 과정이 복합적으로 일어나며, ②와 ⑤ 과정은 죽은 세포나 그 유도체에서도 일어나지만, 그의 과정은 신진대사가 활발한 세포에서만 일어나며 온도 및 에너지등과 관련된 물질 대사에 의하여 일어나는 것으로 알려져 있다.^{4,5)}

미생물에 의한 중금속 제거효율 및 이에 미치는 인자들에 대해 많은 연구가 진행되어 왔으며, 미생물에 의한 중금속의 처리는 물리화학적 인자 및 생물학적 인자와 이들 상호작용에 의해 많은 영향을 받으며, 물리화학적 인자들은 온도, pH, 알칼리도, 중금속의 종류, 용해도, 농도 및 다른 중금속의 존재 등이며, 주된 생물학적인자는 반응조내 균체농도, 반응시간등을 들 수 있다.⁶⁻⁸⁾

본 연구는 중금속오염폐수처리예의 미생물 이용 가능성을 검토하기 위하여 중금속에 강한 내성을 지닌과 동시에 균체내 중금속 축적능력이 우수한 중금속 내성균을 분리하여 온도, pH, 및 균체 전배양시간 등과 같은 외부 요인에 따른

균체내 중금속 축적변화를 조사하였다.

재료 및 방법

공시 중금속 내성균주 및 배지

본 실험에 사용한 중금속 내성균주는 본인들이 광산폐수 및 산업폐수로 부터 이미 분리한 Cd, Pb, Zn 및 Cu 내성 균주인 *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas chlororaphis* 및 *Pseudomonas stutzeri*를 사용하였으며, 균주의 배양은 basal medium(glucose 10g, polypepton 10g, yeast extract 5g, NaCl 5g, D.W 1000ml, pH 6.0)에 중금속을 필요한 농도로 첨가한 액체배지를 사용하였다.

균체의 수확 및 중금속처리

균체는 Cho 등⁹⁾과 같은 방법으로 수확하였으며, 균체의 중금속 처리는 각 중금속 화합물(CdCl₂, Pb(NO₃)₂, ZnCl₂, CuSO₄)을 중금속 이온 농도로서 10,000mg/l이 되게 조제한 표준용액을 다시 일정한 농도가 되도록 멸균증류수로 희석 조제하여 처리하였다.

중금속 분석

균체내에 축적된 중금속 축적량과 용액중에 남아있는 중금속 잔존량은 Cho 등⁹⁾과 같은 방법으로 시료를 전처리한 다음 Atomic absorption spectrophotometer(Shimadzu AA-680, Japan) 및 Inductively coupled plasma spectrometer(ICP, Atomscan25, TJA, U.S.A.)로 정량하였다.

중금속화합물 종류에 따른 중금속 축적변화

중금속 이온으로서 첨가되는 중금속 화합물종류에 따른 축적 양상은 -chloride, -nitrate 및 -sulfate group을 가지고 있는 수용성 중금속화합물들을 중금속 이온 농도로서 100 mg/l이 되도록 첨가한 용액(pH 6.0) 100ml에 준비된 균체를 각각 접종하여 30℃에서 진탕시키면서 처리 48시간 후의 축적량을 비교하였다.

균체 전배양시간에 따른 중금속 축적 변화

균체의 전배양 시간에 따른 중금속 축적양상은 De Rome과 Gadd등의 방법¹⁰⁾에 따라 중금속이 첨가되지 않은 기본배지에서 12, 24 및 48시간 동안 전배양한 균체를 중금속이 100mg/l농도로 첨가된 용액(pH 6.0) 100ml에 각각 접종하여 30℃에서 진탕시키면서 처리 48시간 후의 축적량을 비교하였다.

온도에 따른 중금속 축적변화

온도에 따른 중금속 축적 변화는 Nakajima 등의 방법¹¹⁾에 따라 중금속이 100mg/l의 농도로 첨가된 용액(pH 6.0) 100 ml에 준비한 균체를 접종하여 0℃, 5℃, 10℃, 20℃, 30℃ 및

40℃로 조정된 진탕 항온기에서 진탕시키면서 처리 48시간 후의 균체내 중금속 축적 양상을 조사하였다.

pH에 따른 중금속 축적변화

pH에 따른 중금속 축적 변화는 0.01M-Tris 완충액에 중금속을 100mg/l의 농도로 첨가하여 초기 pH를 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0 및 9.0으로 각각 조정된 다음 준비된 균체를 접종하여 30℃에서 진탕시켜 처리 48시간 후의 축적양상을 조사하였다.

균체량에 따른 중금속 축적변화

균체량에 따른 중금속 축적 변화는 중금속이 100mg/l의 농도로 첨가된 용액(pH 6.0) 100ml에 준비된 균체의 균체량을 각각 달리하여 접종하여 48시간 후의 축적량을 조사하였다.

결과 및 고찰

중금속 화합물 종류에 따른 중금속 축적 변화

여러가지 중금속화합물들중 -chloride(Cl), -nitrate(NO₃) 및 -sulfate (SO₄) group을 가진 수용성 중금속 화합물로서 각 중금속 이온 농도를 100mg/l되게 첨가한 용액(pH 6.0) 100ml에 중금속 내성균주들을 각각 처리하여, 처리 48시간 후 중금속 축적량을 비교함으로써 용액중에 중금속 이온으로서 첨가되는 중금속화합물 종류에 따른 중금속 축적 양상을 조사한 결과, Table 1에서 보는바와 같이 Cd 내성균의 경우 수용성 카드뮴 화합물인 CdCl₂, Cd(NO₃)₂ 및 CdSO₄를

Table 1. Effect of heavy metal compounds on accumulation of heavy metals by heavy metal-tolerant microorganisms.

Heavy metal tolerant microorganisms	Heavy metal compounds	Dry weight of cell (mg/100ml)	Initial con. of heavy metal (mg/l)	Accumulation of heavy metal in cells		
				mg/l	mg/g	dry cells
<i>P. putida</i> (Cd)	CdCl ₂	197	106.7	88.7	45.0	(100.0)
	Cd(NO ₃) ₂	192	112.3	92.5	48.2	(107.1)
	CdSO ₄	195	105.2	86.3	44.3	(98.4)
<i>P. aeruginosa</i> (Pb)	PbCl ₂	226	98.6	94.2	41.7	(100.0)
	Pb(NO ₃) ₂	225	103.7	97.0	43.1	(103.4)
	PbSO ₄	223	102.5	91.4	41.0	(98.3)
<i>P. chlororaphis</i> (Zn)	ZnCl ₂	219	103.5	83.2	38.0	(100.0)
	Zn(NO ₃) ₂	217	109.1	85.6	39.5	(104.0)
	ZnSO ₄	217	108.4	84.7	39.0	(102.7)
<i>P. stutzeri</i> (Cu)	CuCl ₂	180	113.2	78.4	43.6	(100.0)
	Cu(NO ₃) ₂	184	111.7	82.2	44.7	(102.6)
	CuSO ₄	181	108.6	79.6	44.0	(100.9)

() : index

The precultured heavy metal-tolerant microorganism cells were suspended in 100ml of solution (pH 6.0) containing 100 mg/l of each heavy metal compound.

각각 처리한 경우의 균체 g당 Cd 축적량은 각각 약 45mg, 48mg 및 44mg으로서 Cd(NO₃)₂에서 약간 높은 축적량을 나타내었으나 화합물 종류에 따라서 큰 차이가 나타나지 않았으며, 이러한 결과는 Pb, Zn 및 Cu 내성균주의 경우에도 비슷한 경향을 나타내었다.

균체 전배양 시간에 따른 중금속 축적 변화

중금속이 첨가되지 않은 기본배지에서 12, 24 및 48시간 전배양한 균체를 원심분리기로 회수하여 중금속이 100mg/ℓ 첨가된 용액(pH 6.0) 100ml에 각각 처리하여, 처리 48시간 후의 중금속 축적량을 비교함으로써 균체의 전배양 시간에 따른 중금속 축적양상을 조사한 결과, Table 2에서 보는바와 같이 균체 g당 축적량은 Cd, Pb 및 Cu 내성균의 경우 12시간 전배양한 균체의 축적량이 각각 약 49.7mg, 46.5mg 및 46.8 mg으로서 24 및 48시간 전배양한 균체에 비하여 약간 높은 축적량을 나타내었으며, Zn 내성균의 경우에는 24시간 전배양한 균체의 축적량이 약 35.3mg으로서 12 및 48시간 전배양한 균체에 비하여 높게 나타났으나 전반적으로 균체의 전배양시간에 따라서 큰 차이는 나타나지 않았다.

Table 2. Effect of preculture time on accumulation of heavy metals by heavy metal-tolerant microorganisms.

Heavy metal tolerant microorganisms	Preculture time (hours)	Dry weight of cell (mg/100ml)	Accumulation of heavy metal in cells	
			mg/ℓ	mg/g dry cells
<i>P. putida</i> (Cd)	12	116	57.7	49.7 (100.0)
	24	194	88.4	45.6 (91.8)
	48	181	86.2	47.6 (95.8)
<i>P. aeruginosa</i> (Pb)	12	145	67.4	46.5 (100.0)
	24	227	97.6	43.0 (92.5)
	48	219	98.1	44.8 (96.3)
<i>P. chlororaphis</i> (Zn)	12	121	40.4	33.4 (100.0)
	24	236	83.2	35.3 (105.7)
	48	228	85.3	37.4 (112.0)
<i>P. stutzeri</i> (Cu)	12	108	50.5	46.8 (100.0)
	24	186	79.3	42.6 (91.1)
	48	193	82.7	42.9 (91.7)

() : index

대부분의 미생물은 배양시간에 따라 세포 구성물질의 함량이 변화되므로 배양시간이 중금속 축적에 영향을 미칠^{12,13)} 것으로 생각되었으나, 본 실험에서는 12시간 전배양한 균체와 48시간 전배양한 균체들의 균체 g당 중금속 축적량은 큰 차이가 나지 않았으며, Horikoshi 등¹⁴⁾의 *Streptomyces viridochromogenes*의 uranium 축적에 배양시간은 전혀 영향을 주지 않는다는 연구결과와 비슷한 경향을 나타내었으며, Friis 등¹⁾은 *Streptomyces longwoodensis*의 경우 유도기에서는 uranium 축적율이 낮았으나 지수기부터는 높아졌다는 사실을 보고하면서 배양시간이 길어 질수록 세포내 인의

총합량이 증가한 것이 그 원인이라고 설명하기도 하였으며, Sterritt 등¹⁵⁾은 활성슬러지를 이용한 실험에서 슬러지 연령이 낮은 슬러지(young-sludge)는 대사활성이 활발하므로 floc 형성이 작고 슬러지가 불안정하며, 폭기조내 장시간 체류한 슬러지 연령이 높은 슬러지(old-sludge)는 대사활성은 약하나 floc이 안정하고 점질성의 polymer를 많이 생성하므로 중금속처리율이 더 높다고 하였다.

온도에 따른 중금속 축적 변화

중금속이 100mg/ℓ 첨가된 용액(pH 6.0) 100ml에 중금속 내성균체를 처리하여 온도별로 조정된 진탕 항온기에서 진탕시켜 처리 48시간 후의 온도에 따른 중금속 축적양상을 조사한 결과, Fig. 1에서 보는바와 같이 Cd, Zn 및 Cu 내성균주의 Cd, Zn 및 Cu 축적은 30°C까지는 온도가 상승함에 따라 그 축적량도 증가되었으나 40°C에서는 30°C에 비하여 축적량이 감소되었고, Pb 내성균의 Pb 축적은 온도에 따라서 별 차이가 나타나지 않았으며, 전반적으로 30°C 범위에서 높은 축적량을 나타내었다.

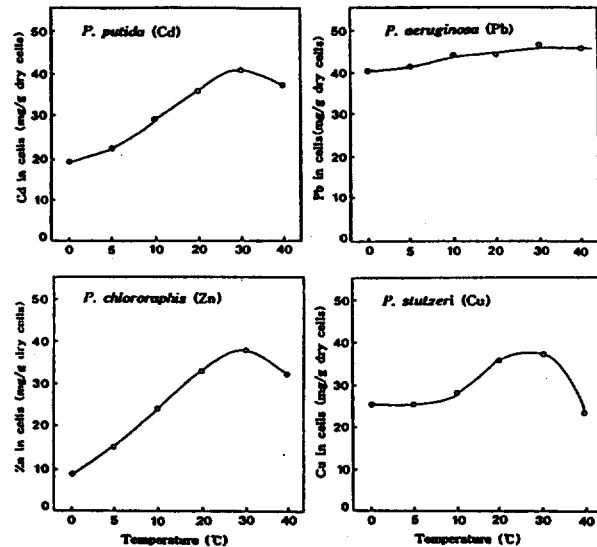


Fig. 1. Effect of temperature on accumulation of heavy metals by heavy metal-tolerant microorganisms. The precultured microorganism cells(dry weight ; *P. putida* 156mg, *P. aeruginosa* 175mg, *P. chlororaphis* 150mg or *P. stutzeri* 175mg) were suspended in 100ml of a solution(pH 6.0) treated with 100mg/ℓ of each heavy metal.

미생물 균체내 중금속 축적과 온도와의 관계에 대한 지금까지의 연구보고에 의하면, 중금속 흡수평형 상수는 온도에 크게 의존하지 않으므로 중금속의 축적량은 온도에 거의 영향을 받지 않는다는 보고^{10,16)}가 있는 반면, 온도는 미생물의 활성에 영향을 주는 인자로서 미생물 표면의 functional group 형성에도 영향을 주며, 온도의 증가로 인하여 중금속이온의 분자확산이 촉진되어 결합을 활발하게 함으로서 중금속 축적량이 증가한다는 보고¹⁷⁾가 있다. Scott 등¹⁸⁾은 *Pseudomonas putida*와 *P. cruciaviae*의 Cd 축적율이 온도가

낮아짐에 따라 크게 감소된 것은 Cd 축적이 물질대사와 관련되어 있을 것으로 추정하였으며, 본 실험에서도 Cd, Zn 및 Cu 내성균주의 Cd, Zn 및 Cu 축적량은 각 공시균주들의 최적 성장온도¹⁹⁾인 30°C 범위에서 가장 높게 나타났으며 온도가 낮아질수록 축적량은 더 크게 감소되었고, 40°C에서도 감소되었으며, 이것은 Cd, Zn 및 Cu 내성균주의 Cd, Zn 및 Cu 축적은 물질대사와 관련되어 있는 에너지 의존적인 과정에 의하여 축적되는 것으로 생각되었으며, Pb 내성균주의 Pb 축적은 주로 물리적인 흡착과정에 의하여 축적이 되었기 때문에 온도에 따라서 별 차이가 나지 않는 것으로 판단되었다.

pH에 따른 중금속 축적 변화

중금속이 100mg/l의 농도로 첨가된 용액의 초기 pH를 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0 및 9.0으로 각각 조정 한 다음, 각 중금속 내성균체를 처리하여 처리 48시간 후 pH에 따른 균체내 중금속 축적양상을 조사한 결과, Fig. 2에서 보는바와 같이 Cd, Zn 및 Cu 내성균주의 Cd, Zn 및 Cu 축적량은 pH가 증가됨에 따라 증가되었으나 Pb 내성균주의 Pb 축적은 별 차이가 없었으며, 전반적으로 중금속 내성균주들의 최적 성장 pH인 pH 6.0~8.0 범위에서 높은 중금속 축적량을 보였다.

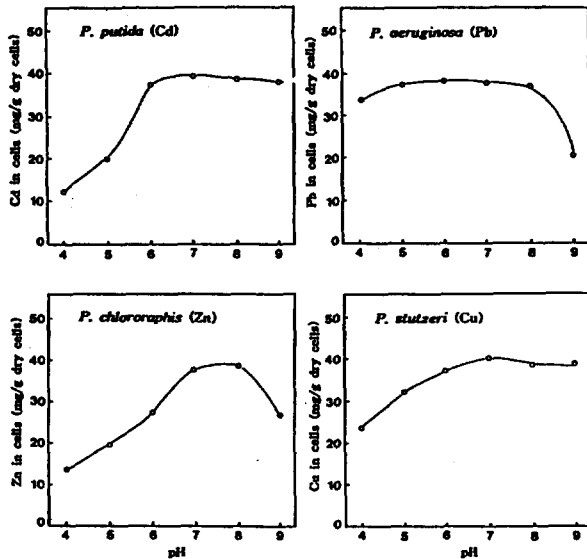


Fig. 2. Effect of pH on accumulation of heavy metals by heavy metal-tolerant microorganisms. The precultured microorganism cells (dry weight : *P. putida* 187mg, *P. aeruginosa* 135mg, *P. chlororaphis* 158mg or *P. stutzeri* 190mg) were suspended in 100ml of a solution treated with 100mg/l of each heavy metal.

중금속의 흡착에 있어서 pH는 매우 중요한 요인이며, Doyle 등²⁰⁾은 용액중의 수소이온 농도가 높아 질수록 *Bacillus subtilis*의 세포벽에 흡착하는 금속이온의 수가 감소하는 것은 수소이온과 금속이온이 같은 결합부위에 대한 흡착에서

경쟁적인 관계를 가지기 때문이라고 설명하였으며, Cutinelli 등²¹⁾은 *Staphylococcus aureus* 세포벽의 중금속 흡착에 대한 pH 효과를 조사한 결과 용액내 수소이온 농도가 높아질수록 세포벽에 결합되는 능력이 1가 금속 양이온보다 2가 금속 양이온에서 현저하게 감소되었다고 하였으며, Fristoe 등²²⁾은 pH는 중금속-미생물 결합, 수산화물 결합 또는 다른 용해성 ligand들의 양전하 전위변화등의 영향인자로서 작용하며 중금속처리 미생물의 주요한 중금속 흡착 site인 세포표면에 존재하는 functional group은 pH에 의해 양전하 전위가 변하는데 낮은 pH에서는 미생물의 surface functional group이 양전하를 띄며 높은 pH에서는 음전하를 띄므로 양이온인 중금속의 흡착은 높은 pH에서 잘 일어난다고 하였다.

본 실험에서도 용액내의 pH가 낮아질수록 중금속 축적량이 감소되었는데, 이러한 이유는 수소이온은 세포내에 존재하는 중금속 결합부위에 대한 친화력이 크기 때문에 수소이온과 금속이온이 같은 결합부위에 대하여 경쟁적인 관계에 있기 때문이며, 또한 수소이온은 세포내 결합부위에 결합되어 있는 중금속 이온을 탈착시키는 작용을 하므로 수소이온의 농도가 높을수록 중금속 흡착에 방해를 받았기 때문인 것으로 생각되었다. 그리고 Pb와 Zn의 경우에는 pH 9에서 축적량이 감소되었으며, 이것은 알칼리성 pH에서 Pb와 Zn 이온이 용액중의 OH-이온과 결합하여 Pb(OH)₂ 또는 Zn(OH)₂의 안정한 화합물 형태로되어¹¹⁾ 미생물체내로 흡수되지 못하였기 때문인 것으로 생각되었다.

균체량에 따른 중금속 축적 변화

중금속 내성균주들의 균체량을 각각 달리하여 중금속이 100mg/l 농도로 처리된 용액 (pH 6.0) 100ml에 처리하여

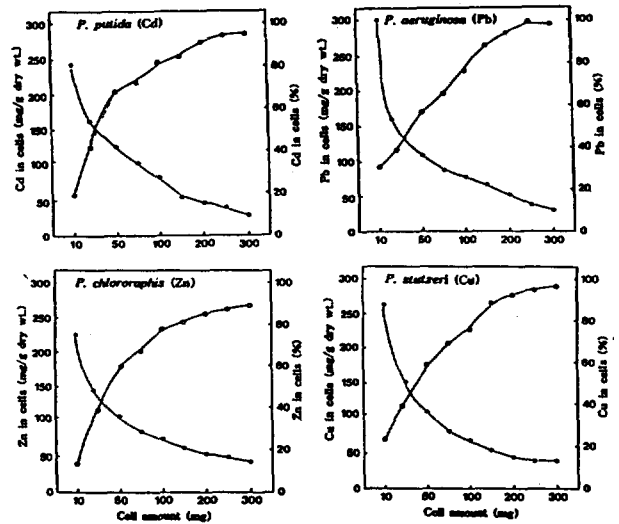


Fig. 3. Effect of the cell amount on accumulation of each heavy metal by each heavy metal-tolerant microorganism. The experiments were carried out by suspending the cells in 100ml of solution (pH 6.0) treated with 100mg/l of each heavy metal for 48 hours. ○ : Heavy metal in cells (%) ● : Heavy metal in cells (mg/g dry weight)

균체내 중금속 축적율과 균체 단위 g당 축적량을 조사한 결과, Fig. 3에서 보는바와 같이 동일한 반응용액 용적에서 균체량이 증가할수록 균체내에 축적된 중금속의 총량은 증가되었으나, 균체 단위 g당 중금속 축적량은 감소되어 균체량의 증가에 비례하여 축적량이 증가되지는 않는 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 Horikoshi 등¹⁴⁾이 *Actinomyces levoris*와 *Streptomyces viridochromogenes*를 이용하여 균체량에 따른 uranium 축적량을 조사한 결과 균체량이 증가할수록 uranium의 총 축적량은 증가하지만 세포 단위 중금속 축적되는 양은 감소되었다는 보고와 유사한 경향이 있었다.

적 요

중금속오염폐수처리에 미생물 이용 가능성을 검토하기 위하여 중금속에 강한 내성을 지닌과 동시에 균체내 중금속 축적능력이 우수한 중금속 내성균을 분리하여 온도, pH, 및 균체 전배양시간 등과 같은 외부 요인에 따른 균체내 중금속 축적변화를 조사한 결과는 다음과 같다.

중금속화합물 종류에 따른 균체내 중금속 축적량은 -nitrate(NO₃) group을 가진 중금속화합물에서 약간 높았으나 화합물 종류에 따라서 큰 차이는 없었다.

균체 전배양시간에 따른 중금속 축적은 24시간 전배양한 균체에서 높게 나타났으나 전반적으로 전배양시간에 따라서 큰 차이는 없었다.

중금속 내성균의 균체내 중금속 축적은 온도, pH등 외부 환경요인에 영향을 받았으며, 중금속 내성균의 중금속 최적 축적 온도는 전반적으로 20~37°C 범위였고, 중금속 최적 축적 pH는 전반적으로 6~8 범위였다.

중금속을 처리한 용액중 중금속 내성균의 균체량을 증가시킬수록 균체내 축적된 총 중금속량은 증가되었으나 균체 단위 g당 중금속 축적량은 감소되었으며, 균체량의 증가에 비례해서 중금속 축적량이 증가되지는 않았다.

참고문헌

1. Friis, N. and P. Myers-Keith. 1986. Biosorption of uranium and lead by *Streptomyces longwoodensis*. *Biotechnol. Bioeng.*, 28 : 21~28.
2. Heo, J.S. and J.S. Cho, 1994. Utilization of microorganisms for treating wastewater polluted with heavy metals. *Kor. J. Environ. Agric.*, 13 : 386~395.
3. Mitchell, R., 1993. *Environmental microbiology*. p. 83~101. John Wiley and Sons, New York.
4. Bucheder, F. and E. Broda, 1974. Energy-dependent zinc transport by *Escherichia coli*, *Eur. J. Biochem.*, 45 : 555~559.
5. Angerer, A., B. Klipp, and V. Braun, 1992. Iron transport systems of *Serratia marcescens*, *J. Bacteriol.*, 174 (4) : 1378~1387.
6. Kao, J.F., L.P. Hsieh, S.S. Cheng and C.P. Haung, 1982. Effect of EDTA on cadmium in activated sludge system. *J. Water Poll. Control Fed.*, 54(7) : 1118~1126.
7. Rudd, T., R.M. Sterritt and J.N. Lester, 1984. Formation and conditional stability constants of complexes formed between heavy metals and bacterial extracellular polymers. *Water Res.*, 18 : 379~384.
8. Hartz, K.E., A.T. Zane and S.K. Bhagat, 1985. The effect of selected metals and water hardness on the oxygen uptake of activated sludge. *J. Water Poll. Control Fed.*, 57(9) : 942~947.
9. Cho, J.S., M.G. Han, H.J. Lee and J.S. Heo, (1996). Zinc accumulation in the cell of zinc-tolerant bacteria, *Pseudomonas chlororaphis*, *J. Korean Environ. Sci. Soc.*, 5(3) : 317~327.
10. De Rome, and G. M. Gadd. 1987. Copper adsorption by *Rhizopus arrhizus*, *Cladosporium resinae* and *Penicillium italicum*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 26 : 84~90.
11. Nakajima, A., T. Horikoshi, and T. Sakaguchi. 1981. Studies on the accumulation of heavy metal elements in biological systems. XVII. Selective accumulation of heavy metal ions by *Chlorella regularis*. *Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 12 : 76~83.
12. Scott, J.A. and S.J. Palmer, 1990. Sites of cadmium uptake in bacteria used for biosorption. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 33 : 221~225.
13. Pelczar, M.J. and E.C.S. Chan, 1981. Elements of microbiology. p. 79-80. McGraw-Hill, Inc., Tokyo.
14. Horikoshi, T., A. Nakajima and T. Sakaguchi. 1981. Studies on the accumulation of heavy metal elements in biological systems. XIX. Accumulation of uranium by microorganisms. *Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 12 : 90~96.
15. Sterritt, R.M. and J.N. Lester, 1981. The influence of sludge age on heavy metal in the activated sludge process. *Water Res.*, 15 : 59~65.
16. Kuyucak, N. and B. Volesky, 1988. Biosorbents for recovery of metals from industrial solutions. *Biotechnol. Lett.*, 10(2) : 137~142.
17. Standberg, G.W., S.E. Shumate II and J.R. Parrott, JR. 1981. Microbial cell as biosorbents for heavy metals : Accumulation of uranium by *Saccharomyces cerevisiae* and *Pseudomonas aeruginosa*. *Appl. Environ. Microbiol.*, 41(1) : 237~245.
18. Scott, J.A. and S.J. Palmer, 1988. Cadmium bio-sorption

- by bacterial exopolysaccharide. *Biotechnol. Lett.*, 10(1) : 21~24.
19. 허종수 외. 1992. 난분해성 독성 오염물질 분해 미생물의 수처리 이용에 관한 연구(I). 농촌진흥청 보고서.
20. Doyle, R.J., T.H. Matthews, and U.N. Streips. 1980. Chemical basis for selectivity of metal ions by the *Bacillus subtilis* cell wall. *J. Bacteriol.*, 143(1) : 471~480.
21. Cutinelli, C. and F. Galdiero, 1967. Ion-binding properties of the cell wall of *Staphylococcus aureus*. *J. Bacteriol.*, 93(6) : 2022~2023.
22. Fristoe, B.R. and P.O. Nelson, 1983. Equilibrium chemical modeling of heavy metals in activated sludge. *Water Res.*, 17(7) : 771~778.