지하수토양환경 Vol. 16(2), p. 6~11, 2011 ≪原著≫

Pachymeniopsis sp.의 폐수 내 가용성 비소 제거 가능성 평가 및 토양세척공법에의 적용

정현규[1,2] · 김유범[1,2] · 최상일[2] · 김선구[3] · 김휘중[4]*

[1](주)에코바이오, [2]광운대학교 사회환경시스템공학과, [3]고려대학교 환경의학연구소, [4]강원대학교 환경연구소

Removal of Arsenic in Waste Water using *Pachymeniopsis sp.* and Its Application to Soil Washing Process

Hyun-Gyu Jung[1,2] · Yu-Beom Kim[1,2] · Sang-Il Choi[2] · Sun-Gu Kim[3] · Hee-Jung Kim[4]*

[1]*Ecobio Co.,Ltd*

[2]*Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University*

[3]*Institute for Occup. & Envi. Health, Korea University*

[4]*Department of Environmental Science, Kangwon National University*

ABSTRACT

In this report, we provide experimental evidence that heavy metal ions could be removed using *Pachymeniopsis* sp., particularly soluble arsenic in leachate from soil contaminated by arsenic. We performed pilot scale of soil washing process based on our results. The adsorption of arsenic by *Pachymeniopsis* sp. indicated that it could be described with the Langmuir Model and the maximum adsorption capacity increased with decreasing pH (pH 3: 102.48 mg/g, pH 5: 98.32 mg/g, pH 7: 57.70 mg/g, pH 9: 43.34 mg/g) and increasing temperature (10°C : 60.38 mg/g, 20°C : 76.39 mg/g, 30°C : 112.12 mg/g). Our results revealed that soluble arsenic in leachate was removed from 24.03 mg/L to 0.6 ± 0.1 mg/L by *Pachymeniopsis* sp. for 48hours on pilot scale of soil washing process

Key words : Arsenic, *Pachymeniopsis* sp., Soil washing, Biosorbent, Langmuir model

1. 서 론

현재 전국적으로 휴·폐광산의 수는 1,000여개소가 넘는 것으로 알려져 있으며 광미나 폐석 등을 적절한 처리 과정을 거치지 않은 채 방치하고 있어 주변 하천, 지하수 및 농경지가 중금속, 특히 독성이 강한 비소로 이미 오염되어 있거나 오염의 위험성이 존재하는 상황이다(김명진 외, 2001).

비소는 맹독성의 발암성 물질이며 비소를 함유한 식수를 장기간 음용한 경우 피부 및 기타 조직에서 암 발생률이 높은 것으로 보고되었다. 또한 비소는 피부각질화, 색소침전, 흑발병(Blackfoot disease) 등 각종 피부질환, 심장질환 및 호흡기질환을 유발하는 것으로도 알려져 있다. 최근 들어 방글라데시를 비롯한 아시아의 일부 국가에서 지하수를 비롯한 음용수 중 비소오염이 보고됨에 따라 각 국가별로 이에 대한 대책 마련이 시급한 실정이다(Alam et al., 2001).

국내에서는 일부 폐금속 광산 지역의 환경오염 복구사업이 수행되었지만 주로 복토, 단순처리저장, 광미장 주변의 옹벽설치 및 매립기법 적용에 그치고 있어 복원효과가 매우 불확실한 실정이며, 이에 따른 결과로 주변수계로 유입되는 오염수의 양이 점점 증가하는 추세에 있다. 이러한 결과로 인해 최근에는 해조류나 미생물 등 생체물질의 표면이나 내부로 물리적, 화학적 및 생물학적 상호 작용에 의해 중금속을 흡착시켜 제거해내는 바이오메스를 사용한 제거법이 많은 관심을 모으고 있다(Ehrlich and

*Corresponding author : hjkim60@kangwon.ac.kr

원고접수일 : 2010. 3. 1 심사일 : 2011. 4. 12 게재승인일 : 2011. 4. 22
질의 및 토의 : 2011. 6. 30 까지

Brierley, 1990; Suh et al., 1998; Volsky, 1990).

바이오메스를 사용한 유해 중금속 제거법은 바이오메스 표면에 존재하는 carboxyl, amino, phosphate, sulfate 및 hydroxyl 등의 작용기에 중금속이 흡착되는 현상을 말하며, 생체물질 자체가 가지고 있는 Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, 등의 금속들과 중금속간의 이온교환에 의해서도 중금속은 제거된다(Kiefer et al., 1997; Kuyucak and Volsky, 1989). 또한 효모, 곰팡이, 조류 등의 세포벽 성분은 중금속과 선택적으로 결합을 하여 용액중의 중금속 제거 능력은 이온교환수지보다 높게 나타난다고 보고되고 있다(김용무와 이해익, 2003).

바이오메스를 사용한 중금속의 제거는 100 mg/L 이하의 저 농도로 존재하는 중금속의 제거 시 매우 효과적이며, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} 및 K^+ 등 무기염의 존재 시에도 중금속만을 선택적으로 제거할 수 있고, 넓은 범위의 pH에서도 사용할 수 있다(서근학 외, 1999). 강원도 동해안에서 서식하고 있는 갈조류 중 하나인 *Pachymeniopsis* sp.는 일명 되박이라고 불리우는 해조류로써 먹을 것이 부족했던 수십년전에는 일부 식용으로 사용되었으나, 현재는 그 재활용 방안이 무궁무진함에도 불구하고 해안의 미관을 해친다는 이유로 전량 수거, 폐기되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 *Pachymeniopsis* sp.를 사용하여 독성 중금속인 비소의 생체 흡착 실험을 수행하여, *Pachymeniopsis* sp.의 비소로 오염된 폐수 내 비소제거 가능성을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료

실험에 사용된 *Pachymeniopsis* sp.는 강원도 동해안(강릉, 공현진)에서 채취하였고, 채취와 동시에 실험실로 옮겨 멸균 증류수로 세척하여 재료 표면의 이물질들을 제거시켰으며 50°C에서 열풍건조한 뒤 분말상(50 mesh)으로 분쇄하여 재료로 사용하였다(김용무와 이해익, 2003).

비소로 오염된 공시 수용액은 $NaAsO_3$(Sigma, U.S.A)를 사용하여 초순수 증류수로 희석 조제하여 사용하였다(유경열 외, 2006).

2.2. 방법

2.2.1. *Pachymeniopsis* sp.의 비소 흡착량 평가

Pachymeniopsis sp.에 의한 pH 및 온도 변화에 따른 비소의 흡착량을 평가하기 위하여 100 mL 삼각플라스크에 농도별로 제조(0, 5, 10, 20, 40, 70, 100, 150, 200, 400 mg/L)된 비소 수용액 50 mL와 0.1 g의 기 제조된 *Pachymeniopsis* sp. 분말을 첨가하고 72시간 동안 150 rpm에서 진탕 시켰으며, 0.45 μm syringe filter를 이용하여 여과한 후 여액에 남아있는 비소의 함량을 Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer(ICP-OES, Vista-MPX, Varian, Australia)를 사용하여 분석하였다. 또한 수용액 중 pH는 비소의 존재형태의 중요한 영향을 미치므로, pH에 따른 *Pachymeniopsis* sp.의 비소 흡착능력을 평가하였다. 0.01 M HCl 또는 0.001 M HCl 및 0.01 M NaOH 또는 0.001 M NaOH 용액을 이용하여 용액의 pH를 3, 5, 7, 9로 조절하여 반응시킨 후 각 pH 별로 흡착된 비소의 최대 흡착량을 산출하였다. 현장 적용 시 현장의 온도 또한 반응성에 중요한 영향을 미친다. 따라서 반응온도가 비소의 흡착량에 미치는 영향을 알아보기 위하여 10°C, 20°C, 30°C로 온도를 조절하여 *Pachymeniopsis* sp.에 의한 비소의 흡착량을 조사하였다. *Pachymeniopsis* sp.에 의한 비소의 흡착은 다음의 식을 이용하여 계산하였다(Sparks, 1995).

$$q = V \times (C_i - C_e) / M \quad \text{식 (1)}$$

q : Mass of adsorbed As per unit weight of *Pachymeniopsis* sp. (mg/g)
V : Volume of solution (L)
C_i : Initial concentration of reaction solution (mg/L)
C_e : Equilibrium concentration of solution (mg/L)
M : Weight of *Pachymeniopsis* sp. (g)

2.2.2. 흡착모델

Pachymeniopsis sp.의 등온흡착곡선(sorption isotherm curve)은 Langmuir model을 따랐으며, 최대흡착량 또한 위 모델을 통하여 산출하였다. 적용된 Langmuir model은 식 (2)과 같이 표현된다. (Holan et al., 1993).

$$q = (kCb) / (1 + kC) \quad \text{식 (2)}$$

q : Mass of adsorbed As per unit weight of *Pachymeniopsis* sp.
C : Equilibrium concentration of solution (mg/L)
b : Maximum amount of As that can be adsorbed (mg/g)
k : Constant related to the binding strength

2.2.3. 토양세척 후 폐수에 적용

비소로 오염된 토양의 토양세척 공정 후에 발생되는 폐

Table 1. Chemical properties of contaminated-soil used in experiment

$pH_{1:1}$	$EC_{1:1}$	O.M.*	Available P_2O_5	C.E.C**
	dS/m	%	mg/kg	$cmol_{(+)}/kg$
7.26	4.2	0.67	964.82	21.3

Cu	Cd	Pb	As	Hg	Zn	Fe	Al
---------- mg/kg ----------							
6.8	0.6	88.7	213.5	N.D.***	267.3	9.2	5.6

* O.M. : Organic Matter. ** C.E.C : Cation Exchange Capacity, *** N.D : Not Detected

수는 원수의 비소가 용출된 상태의 가용성 비소가 존재하기 때문에 아무런 처리 없이 방출되면 생태계의 엄청난 악 영향을 미친다. 따라서 토양세척공정 중 한 공정인 폐수처리 공정에 *Pachymeniopsis* sp.를 사용하여 Pilot 규모의 폐수처리 실험을 진행하였다. 비소 오염토양은 강원도 정선군 동명광산 주변의 오염토를 약 10 ton 가량 채취하였으며 채취한 토양의 물리 · 화학적 특성 및 비소의 함량을 조사하였다(Table 1).

비소 오염토양의 세척공정 후에 발생된 폐수의 양은 약 5,000 L였으며, 약 200 m^3 용량의 집수조에 집수하였다. 등온흡착실험을 통해 산출된 최대 흡착량을 토대로 약 1 kg의 *Pachymeniopsis* sp.을 첨가한 후 포크레인을 사용하여 간헐적으로 교반을 시키면서 각각 30분, 1시간, 3시간, 6시간, 12시간, 24시간, 48시간 후에 집수조 중간 깊이에서 9구획으로 나누어 폐수를 채취한 다음 대표성을 두기 위하여 2 L 짜리 plastic bottle에 취하여 수회 교반시켰으며, 0.45 μm syringe filter를 이용하여 여과한 후 여액에 남아있는 비소의 함량을 Inductively Coupled Plasma-Optica l Emission Spectrometer(ICP-OES, Vista-MPX, Varian, Australia)를 사용하여 분석하였다.

3. 연구결과

3.1. 공시토양의 화학적 특성

Table 1은 현장 실험을 위해 채취한 광산 주변의 중금속 오염토양을 채취하여 화학적 특성 및 중금속 함량 조사를 나타낸 결과이다. 광산 주변 오염토양의 $pH_{1:1}$는 약 알칼리성이었고, $EC_{1:1}$는 4.2 dS/m로 염이 집적된 상태를 보이는 것으로 조사되었다. 이는 채취 지역이 농작물을 재배하고 있는 밭이었고, 농사에 사용되는 비료 및 퇴비 성분으로부터 기인한 수용성 양이온 및 음이온의 영향으로 판단된다. 유기물의 함량은 약 0.7%로 비옥하지는 않았지만, 유효태인산의 농도는 매우 높은 경향을 보였다. 이는 광산 주변 오염토양에 오랜 시간에 걸쳐 함유된 인산함유 광물질이나 밭에서 사용되는 비료 및 퇴비 성분에서 기인한 것으로 판단된다. 양이온 치환용량의 값들도 비교적 높게 나왔다. 결과적으로 오염토양의 일반적인 비옥도는 영양 불균형 상태를 보이는 것으로 나타났다. 중금속 분석 결과 '1지역'의 '토양오염우려기준'을 토대로 해석했을 때, 타 중금속은 기준치의 이내였으나, 비소의 농도가 약 8배 이상 높은 것으로 분석되어, 향후 이 지역의 비소오염으로 인한 피해가 예상된다(Table 1). As는 Fe과 Al의 산화물 또는 수산화물 입자에 의해 흡착될 수 있다. 이는 *Pachymeniopsis* sp.에 의한 흡착반응을 방해하는 요인이 될 수 있으므로, Al, Fe 분석을 추가로 실시한 결과, 10 mg/kg 미만의 적은양이 검출되었다. 따라서 앞으로 실시할 Pilot test에서 Al과 Fe의 흡착 방해 작용은 나타나지 않을 것으로 판단된다.

3.2. *Pachymeniopsis* sp.의 비소 흡착량 평가

3.2.1. 반응 pH의 영향

환경 중에서 비소는 As(III) 및 As(V)의 형태로 존재한다. 산화된 환경조건에서는 As(V)가 주된 화학종이고, 환원된 환경조건에서는 As(III)가 주된 화학종으로 존재한다. 폐광산 침출수는 대부분 산화 조건에 있으므로 침출수에서의 비소형태는 As(V) 형태가 대부분일 것으로 판단된다. 중성의 pH에서 As(V)는 H_3AsO_4, $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$의 형태가 대부분이며, 수계에서 비소는 크롬을 제외한 다른 중금속과 달리 (–)하전을 띄며 존재한다. 따라서 같은 (–)하전을 띄고 있는 토양과 쉽게 흡착하지 못하며 이동성이 커지기 때문에 인체에 노출될 위험성이 매우 커진다. 비소의 흡착은 pH조건에 따라 그 흡착특성이 영향을 받는다. 따라서 pH를 3, 5, 7, 9로 조절하여 As의 농도를 0~400 mg/L로 제조하였고, 25°C의 등온상태에서 이에 따른 흡착특성을 검토하였다. Fig. 1은 pH 3, 5, 7, 9에서의 비소 농도별 흡착을 나타내며 Langmuir type 의존성

Table 2. Langmuir equation for As adsorption onto *Pachymeniopsis* sp. with pH

pH	Regression equation	q_{max} (mg/g)	R^2
3	Y = 0.0098X + 0.1239	102.48	0.97***
5	Y = 0.0102X + 0.4108	98.32	0.94***
7	Y = 0.0173X + 0.4663	57.70	0.94***
9	Y = 0.0231X + 1.1730	43.34	0.83***

Y : Ce/q
X : Ce ; equlibrium As concentration (mg/L)
q : mass of adsorbed As per unit weight of *Pachymeniopsis* sp.
q_{max} : maximum amount of As that can be adsorbed (mg/g)
*** : Significant at $P < 0.001$

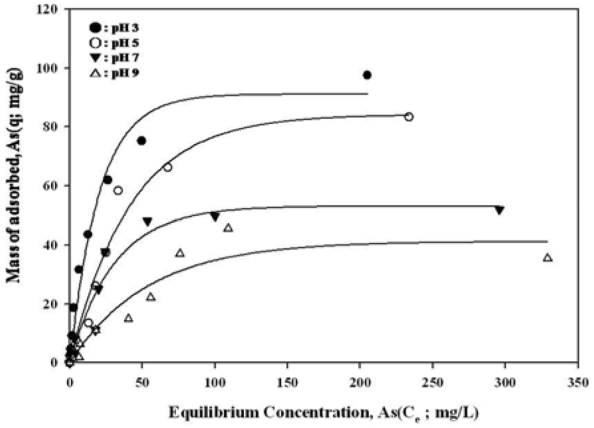

Fig. 1. Biosorption isotherm of As by *Pachymeniopsis* sp. with pH (at, 25°C).

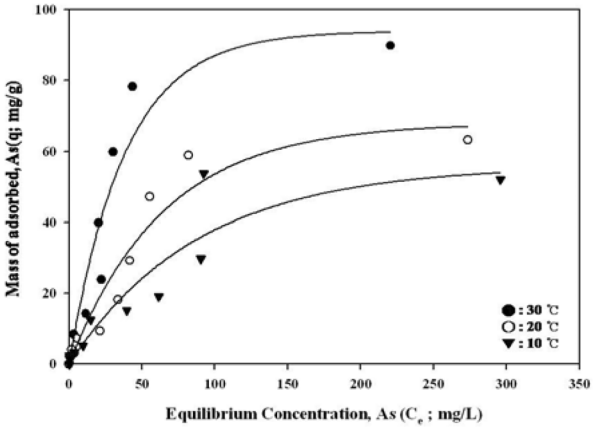

Fig. 2. Biosorption Isotherm of As by *Pachymeniopsis* sp. with Temperature (at, pH 3).

의 흡착 특성을 나타내주고 있음을 알 수 있다. 위 결과를 토대로 Langmuir model을 적용하여 최대흡착량(q_{max})를 산출하였다(Fig. 1, Table 2).

Fig. 1과 Table 2는 비소 흡착량을 Langmuir model에 적용하여 도시한 흡착량(q) 그래프와 반응 후 평형농도와의 회귀방정식 및 결정계수(R^2)를 보여주고 있다. 최대 흡착량(q_{max})은 회귀방정식 기울기의 역수로서 기울기 값이 작을수록 흡착량이 커지는 경향을 보였다(양재의 외, 2006). 본 연구에서 *Pachymeniopsis* sp.의 비소에 대한 최대 흡착량은 25°C 조건 pH 3일 때 102.48 mg/g, pH 5일 때 98.32 mg/g, pH 7일 때 57.7 mg/g, pH 9일 때 43.34 mg/g의 최대 흡착량을 보여 pH가 낮을수록 증가하는 결과를 나타냈으며, 상관계수(R^2)는 pH 9의 경우를 제외하고 0.94 이상으로 매우 유의성 있게 나타났으며 pH 9의 경우에도 0.83으로 대체적으로 유의성 있게 나타났다. 위 결과는 pH가 낮아질수록 생기는 수소 이온이 흡착제 표면에 형성되어 있는 carboylate group, hydroxyl group 등 (–) 형태의 작용기와 전기적으로 결합하여 Zero-charge의 형태를 띄어, 음이온인 비소 화합물과 전기적 반발력을 감소시키는 동시에 흡착제 표면에 형성되어 있는 $C_6H_5^+$, NH^+, SH^+ 등의 양이온 작용기가 음이온형태의 비소화합물과 전기적 결합을 한 것으로 판단된다.

3.2.2. 반응온도의 영향

반응온도가 *Pachymeniopsis* sp.에 의한 비소 흡착량에 미치는 영향을 알아보기 위하여 반응온도를 10°C, 20°C, 30°C로 조절하여 비소의 농도변화를 조사하였다. Fig. 2는 온도에 다른 *Pachymeniopsis* sp.에 대한 흡착량을 나타낸 것으로 *Pachymeniopsis* sp.의 흡착량은 30°C > 20°C > 10°C의 순으로 평가되어 온도가 높을수록 흡착량이 큰 것을 알 수 있었다. 위 결과를 등온 흡착식에 적용한 결과 pH와 마찬가지로 Langmuir type의 흡착형태를 따랐으며, 이를 토대로 최대 흡착량을 산출하였다(Fig 2, Table 3). 최대 흡착량은 30°C, 20°C, 10°C에서 각각 112.12 mg/g, 76.39 mg/g, 60.39 mg/g으로 온도가 높을수록 최대 흡착량이 커지는 경향을 보였다. 상관계수는 0.84이상으로 대체적으로 유의성 있게 나타났다. 이는 ZVI(Zero-valent iron) 및 다른 흡착제를 이용한 유기화합물(TCE 등)의 분

Table 3. Langmuir equation for As adsorption onto *Pachymeniopsis* sp. with Temperature

Temperature (°C)	Regression equation	q_{max} (mg/g)	R^2
30	Y = 0.0089X + 0.4477	112.12	0.84**
20	Y = 0.0130X + 0.7501	76.39	0.87**
10	Y = 0.0166X + 1.0432	60.39	0.87**

Y : Ce/q
X : Ce ; equlibrium As concentration (mg/L)
q : mass of adsorbed As per unit weight of *Pachymeniopsis* sp.
q_{max} : maximum amount of As that can be adsorbed (mg/g)
**: Significant at $P < 0.01$

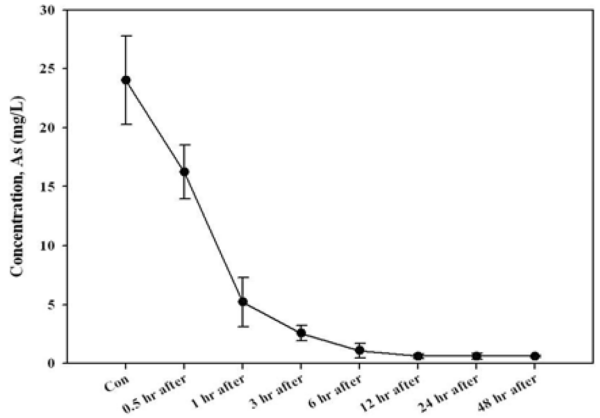

Fig. 3. Effect of Removal As by *Pachymeniopsis* sp. in Contaminated As Waste Water.

해실험결과 및 다른 중금속(Cr[IV])의 흡착결과에서 나타나는 경향과 일치하는 결과로서 반응온도가 증가함에 따라 As의 흡착률이 증가하는 것을 알 수 있었다(유경열, 2003). 따라서 위 결과의 현장 적용 시 비소로 오염된 폐수의 온도에 따라 흡착량을 결정하는데 중요한 자료가 될 것으로 판단된다.

3.3. 토양세척공법에의 응용

실내실험결과를 바탕으로 토양세척공정 중 하나인 폐수처리공정에 *Pachymeniopsis* sp.를 첨가함으로써 실질적으로 폐수에 용존 되어 있는 가용성 비소화합물의 처리효과를 알아보기 위해 Pilot scale의 토양세척공정에 적용시켰다(Fig. 3). 오염폐수의 비소 농도는 24.03 ± 3.76 mg/L의 농도를 보여 매우 높은 값을 나타내었으나, *Pachymeniopsis* sp.를 처리한 후 30분 및 1시간 경과 후 급격히 농도가 감소하여, 48시간 후의 농도 측정값은 0.6 ± 0.1 mg/L의 농도를 보였다. 이는 실질적으로 *Pachymeniopsis* sp.를 현장에 적용시켰을 때 상당량의 가용성비소가 *Pachymeniopsis* sp.에 의해 흡착되었음을 알 수 있었다(Fig. 3). 이는 실내실험의 결과와 마찬가지로 현장에 적용했을 때도 *Pachymeniopsis* sp. 비소 흡착능력을 보여주는 결과로 향후 보완을 통한 현장 적용의 가능성을 보여준 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

강원도 동해안에서 서식하고 있는 갈조류 중 하나인 *Pachymeniopsis* sp.를 사용하여 독성 중금속인 비소의 생체 흡착 실험을 수행하였다. 먼저 등온흡착실험을 실시하여 *Pachymeniopsis* sp.의 최대 흡착량을 산출하고, 위 결과를 토대로 토양세척공법에서 발생되는 폐수에 적용시킴으로써 *Pachymeniopsis* sp.의 비소로 오염된 폐수 내 가용성 비소제거 가능성을 평가하였다.

1) 공시 토양의 비소함량은 약 213.5 mg/kg으로 '1지역'의 '토양오염우려기준'을 토대로 해석했을 때, 비소의 농도가 약 8배 이상 높은 것으로 분석되어, 향후 이 지역의 비소오염으로 인한 피해가 예상 된다.

2) 동결건조 시킨 *Pachymeniopsis* sp. 분말을 이용하여 pH를 3, 5, 7, 9로 조절하여 25°C의 등온 상태에서 비소의 농도를 5~400 mg/L로 제조하였고, 이에 따른 흡착특성을 검토하였다. 흡착특성은 Langmuir type 의존성의 흡착특성을 나타내 주고 있음을 알 수 있었으며, 위 결과를 토대로 계산한 최대 흡착량은 각각 pH 3 일 때 102.48 mg/g, pH 5 일 때 98.32 mg/g, pH 7 일 때 57.70 mg/g, pH 9 일 때 43.34 mg/g의 최대 흡착량을 보여 *Pachymeniopsis* sp.의 비소흡착능력이 매우 우수한 것으로 판단되었다. 상관계수(R^2)는 0.83*** 이상으로 대체적으로 유의성 있는 결과를 나타냈다. 향후 현장 적용 시 변수인 온도에 따른 흡착특성은 pH에 따른 흡착특성과 마찬가지로 Langmuir type 의존성의 흡착특성을 나타내었고, 최대 흡착량은 30°C, 20°C, 10°C에서 각각 112.12 mg/g, 76.39 mg/g, 60.39 mg/g으로 온도가 높을수록 최대 흡착량이 커지는 경향을 보였다. 상관계수(R^2)는 0.84 이

상으로 대체적으로 유의성 있게 나타났다.

3) 토양세척공정을 거쳐 발생된 폐수에 동결건조 시킨 *Pachymeniopsis* sp.를 투입하여 폐수에 함유된 가용성 비소를 제거하는 실험을 실시하였다. 폐수의 비소 농도는 24.03 mg/L로 분석되었다. *Pachymeniopsis* sp.를 처리하여 시간별 비소의 함량을 측정한 결과 처리 후 약 1시간까지 비소의 농도가 급격히 감소하였으며, 처리 후 약 48시간 후 비소 농도는 0.6 ± 0.1 mg/L로 분석되어 상당량의 가용성비소가 *Pachymeniopsis* sp.에 의해 흡착되었음을 알 수 있었다.

4) 실내 실험 및 현장 실험을 통하여 *Pachymeniopsis* sp.의 가용성 비소 제거 효과를 확인할 수 있었다. 앞으로 *Pachymeniopsis* sp.를 사용한 중금속, 특히 비소로 오염된 토양 세척공정의 폐수처리 및 기타 여러 분야의 공정에 탁월한 효과를 나타낼 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부의 "토양지하수복원관리환경기술교육혁신지원사업단"의 지원을 받은 연구이며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김명진, 2002, 지질 환경재해 및 복원기술: 중금속 오염토양의 정화 및 복원, 한국자원공학회 · 한국지하수토양환경학회 · 대한광업진흥공사 공동 학술 심포지엄 논문집, 대한광업진흥공사, 서울, p. 117-141.

김용무, 이해익, 2003, 해조류로부터 6가 크롬 흡착 제거제의 선발, 강원대학교 농업과학연구소 논문집, **14**, 97-103.

서근학, 안갑환, 공인수, 1999, 해조류 Sargassum sagamlanum을 이용한 Pb흡착 및 탈착, 한국생물공학회지, **14**(5), 611-615.

유경열, 2003, Zero-Valent Iron(ZVI)에 의한 As의 불용화기작, 강원대학교 농학석사논문, p. 25-27.

유경열, 옥용식, 양재의, 2006, 수용액 중 영가 철의 비소흡착 및 반응기작 구명, 한국토양비료학회지, **39**(3), 157-162.

Alam, M.G.M., Tokunaga, S., and Aekawa, T.M., 2001, Extraction of arsenic in a synthetic arsenic-contaminated soil using phosphate. *Chemospere*, **43**, 1035-1041.

Ehrlich, H.L. and Brierley, C., 1990, Microbial mineral recovery, McGraw-Hill Publishing Com, p. 27-29.

Holan, Z.R., Volesky, B., and Prasetyo, I., 1993, Biosorption od cadmium by biomass of marine algae, *Biotech. Bioeng*, **41**, 819-825.

Kiefer, E., Sigg, L., and Schosseler, P., 1997, Chemical and spectroscopic chracterization of algae surfaces, *Environ. Sci. & Technol*, **31**, 759-764.

Kuyucak, N. and Volesky, B., 1989, Accumulation of cobalt by marine algae, *Biotechnology and Bioengineering*, **33**, 809-814.

Sparks, D.L., 1995, Environmental soil chemistry, Academics Press, USA, p. 99-185.

Suh, K.H., Ahn, K.H., and Cho, M.C., 1998, biosorption of Pb and Cu by marine algae, *Korean J. Biotechnol. Bioeng*., **13**, 444-448.

Volesky, B., 1990, Biosorption of heavy metals, CRC Press, p. 132-138.