

폐광지역 비소오염 토양에 대한 피(*Echinochloa crus-galli*)를 이용한 보강된 식물상복원공법

박지연¹ · 김주용¹ · 이병태¹ · 김경웅^{1*} · 이진수²

¹광주과학기술원 환경공학과, ²한국광해관리공단 기술연구소

Enhanced Phytoremediation by *Echinochloa crus-galli* in Arsenic Contaminated Soil in the Vicinity of the Abandoned Mine

Ji-Yeon Park¹, Ju-Yong Kim¹, Byung-Tae Lee¹, Kyoung-Woong Kim^{1*} and Jin-Soo Lee²

¹Department of Environmental Science and Engineering, GIST, Gwangju 500-712, Korea

²Mine Reclamation Corp., Seoul 110-727, Korea

In order to deal with the problem that phytoremediation takes long time in achieving the practical effect, the enhanced phytoremediation by Barnyard grass (*Echinochloa crus-galli*) was conducted. In addition, we examined the synergistic effect by adding PSM (phosphate -solubilizing microbes) and EDTA (ethylenediaminetetraacetic acid) to the arsenic contaminated soil in the vicinity of the abandoned mine. The removal efficiency of arsenic in the site with PSM application increased about 16% when compared to control site, which was due to increase of plant biomass. The EDTA has been successfully utilized in respect of enhanced mobility and solubility of arsenic in the soil. As a result, BF (bioaccumulation factor) significantly increased but the inhibition of plant growth resulted in 20% reduction of arsenic removal efficiency. The application of PSM and EDTA may enhance the efficiency of phytoremediation. However, the time and method of EDTA application should be further examined to reach the maximum removal efficiency.

Key words : *Echinochloa crus-galli*, phytoremediation, arsenic, PSM, EDTA

폐광지역 비소오염 토양에 이용될 식물상복원공법으로서 논에서 쉽게 발견되는 피의 적용가능성을 알아보고자 하였다. 식물을 이용한 토양 정화 공법이 가지는 장기간의 처리시간이 소요된다는 단점을 해결하고자 PSM (phosphate-solubilizing microbes)과 EDTA (ethylenediaminetetraacetic acid)를 처리하여 그 상승효과를 관찰하였다. PSM을 처리한 시험구에서는 식물의 바이오매스가 증가하여 비교 시험구에 비하여 비소제거 효율이 약 16% 정도 증가하였다. EDTA 처리구에서는 토양 내 중금속의 이동성이 증가하여 BF (bioaccumulation factor)는 증가하였으나, EDTA가 식물의 성장을 저해해 오히려 제거 효율이 20% 정도 감소하는 결과를 가져왔다. 따라서 식물상복원공법에 PSM 및 EDTA의 처리는 식물의 비소 흡수를 어느 정도 증대시킬 수는 있으나, 특히 EDTA를 처리할 경우에는 처리 시기 및 처리량의 선택에 있어서 식물의 성장을 저해하지 않도록 해야 하며, 지속적인 모니터링이 요구된다는 결과를 얻었다.

주제어 : 피 (*Echinochloa crus-galli*), 식물상복원공법, 비소, PSM 및 EDTA

1. 서 론

최근 전 세계적인 토양환경 복원 동향은 그 기술이 친환경적이며, 인간의 건강과 환경의 질을 동시에 개선시킬 수 있는 쪽으로 관심이 모아지고 있다. 이러한

관점에서 토양환경 복원 분야에 있어서 각광받고 있는 것이 식생을 이용한 복원방법이다. 오염된 토양에 식물을 이용한 복원 방법은 식물의 성장을 기본으로 하기 때문에 생태적으로 매우 안정하다. 또한 토양의 생산력을 해치지 않으면서 오염물질을 제거할 수 있기

*Corresponding author: kwkim@gist.ac.kr

때문에 그 활용이 점점 확대되고 있는 추세이다.

그러나 이러한 식물상 복원 공법의 가장 큰 단점은 다른 물리적, 화학적 방법에 비해 처리속도가 매우 느리다는 점으로 장기간의 처리시간이 필요하다. 최근 이러한 시간의 약점을 극복할 수 있는 수단으로 생물학적, 화학적 처리를 통해 식물상 복원 공법의 효율을 증대시키고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 예로 많이 적용되고 있는 것이 PGPR (Plant growth promoting rhizobacteria)과 EDTA이다 (Brown, 1974; Cunningham and Ow, 1996; Patten and Glick, 1996; Blaylock *et al.*, 1997; Glick *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 2004).

토양 내 금속의 용해도 또는 이동성은 토양의 특성, pH, 그리고 수용성 리간드와의 결합정도에 따라 강하게 영향을 받는다 (Kaschl *et al.*, 2002). 그 중 EDTA는 가장 효과가 좋아 많은 연구가 시도된 대표적 퀼레이트제이다 (Cunningham and Ow, 1996; Blaylock *et al.*, 1997; Chen *et al.*, 2004).

한편, 중금속으로 오염된 토양에서는 토착 미생물의 절대량 및 종 다양성의 감소가 일어날 수 있는데, 식물의 성장을 촉진하는 균권 미생물을 직접 주입하여 줌으로써 식물상 복원 공법의 효율을 증대시킬 수 있다 (Brown, 1974; Davison, 1988; Kloepper *et al.*, 1989; Lambert and Joos, 1989; Patten and Glick, 1996; Glick *et al.*, 1998). 이런 종류의 미생물을 Plant growth promoting bacteria (PGPR) 이라고 하는데, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Burkholderia*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Rhizobium*, *Erwinia*, *Serratia*, *Alcaligenes*,

Arthrobacter 등이 여기에 속한다.

식물정화 공법의 현장 적용 식물로는 널리 알려진 외국의 과축적종 보다는 국내 자생식물을 사용하는 것이 매우 중요하다. 따라서 국내의 기후조건에 알맞고, 경작하는 동안 별다른 조치를 필요로 하지 않아 관리가 수월한 피 (*Echinochloa crus-galli*)를 선택하였다. 피는 Aboulroos *et al.* (2006)의 연구에 의해 중금속의 축적 능력이 입증된 바 있다.

따라서 본 연구에서는 식물정화 공법의 시간이 오래 걸린다는 약점을 극복할 수 있는 수단으로 미생물과 EDTA의 첨가를 통해 많은 연구에서 그 효율이 입증된 내용을 현장적용함으로서 피의 비소 흡수가 어떻게 달라지는지를 파악하고 이를 통해 비소로 오염된 토양을 정화하기 위한 가능성을 살펴보려 하였다. 또한 위의 결과들이 선 연구에서 그 효율이 입증된 바 있으나, 본 연구에서는 특징적으로 이러한 내용을 현장실증 하였다는 점에서 그 의의가 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구지역

본 연구를 수행한 대상 부지는 전라남도 보성군에 위치한 산양광산 주변의 오염된 농경지이다 (Fig. 1). 산양광산은 1935년부터 1992년까지 금과 은의 채광을 위해 운영되었다. 현재 선광장의 형체는 남아있지 않으며, 폐석과 광물찌꺼기의 흔적은 남아있으나 적치되어 있는 상태는 아니다. 산양광산 주변의 농경지 토양은 비소 및 카드뮴에 의한 오염이 확인된 바 있으며,

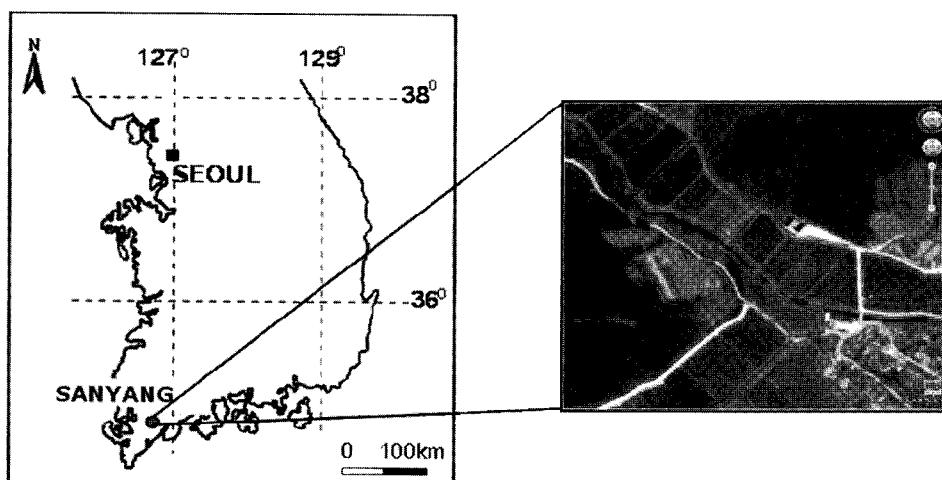


Fig. 1. Location map of the study area; Agricultural area near San-Yang mine, Boseong-gun, Jeonla province, South Korea.

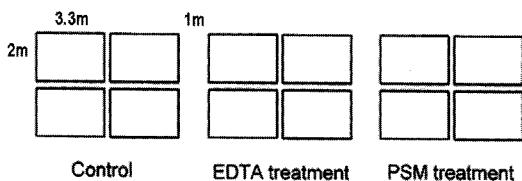


Fig. 2. Description of the experimental site.

필지에 따라 비소와 카드뮴에 대해 대책기준을 초과하는 높은 오염도를 나타낸 곳도 있었다. 식물상 복원의 현장적용을 위해 대상 필지 내에 구획을 설정하였으며, 파종과 재배를 위해 로터리 작업 및 배수로 작업을 수행하였다.

현장 실증을 위한 연구부지의 모식도는 Fig. 2에 나타내었는데 무처리 대조부지, EDTA 적용 부지 및 PGPR의 일종인 Phosphate solubilizing microbes (PSM) 적용 부지로 구성되어 있다.

2.2. 식물 및 토양시료

식물과 토양 시료는 파종 전 (부지 조성 직후), 파종 후 12주 경과 (PSM 및 EDTA 1차 처리 직전), 파종 후 16주 경과 (PSM 및 EDTA 2차 처리 직전), 파종 후 18주 경과 (수확 시기) 시점에서 각각 채취하였다 (Fig. 3). 식물시료의 채취는 각 시험구마다 3지점씩 토양시료와 동일한 위치에서 지점당 6개의 부시료를 채취하여 하나의 합성시료로 하였다. 채취 시 최대한 뿌리에 손상과 손실이 없게 하였으며 이삭의 손실에도 주의하였다. 채취된 식물 시료는 폴리에틸렌 백에 담아 실험실로 옮겨졌다. 토양 시료 채취는 핸드오거를 이용하였으며, 무처리 대조군, PSM 처리군, EDTA 처리군으로 나누어진 각 시험구마다 세 지점에서 토양을 구분하여 채취하고 폴리에틸렌 백에 넣어 실험실로 운반하였다. Fig. 3에서는 시간의 흐름에 따른 피의 생장 상태를 보여주고 있으며 채취된 토양의 특성은 Table 1에 나타냈다.

2.3. 식물 및 토양의 분석

토양 내 비소의 함량을 살펴보기 위해 채취된 토양

에 대해 1N HCl을 이용한 가용성 함량분석, 왕수추출법을 이용한 전합량 분석을 토양오염공정 시험법에 따라 실시하였다. 비소의 정량분석은 GF-AAS (Graphite furnace atomic absorption spectroscopy; PerkinElmer, ZL5100)를 사용하여 수행하였다. 채취해 온 식물은 3차 중류수로 세 번 이상 세척하고, 동결건조기(freeze-dryer)를 이용하여 건조시켰다. 건조된 식물은 뿌리, 줄기 및 잎, 이삭 세 부분으로 나누어 막서기를 이용하여 제분하였다. 제분된 시료 0.1 g에 37% HNO₃ 2 mL을 첨가하여 12시간~24시간 진탕한 후 1 mL의 H₂O₂를 첨가하고 1 시간 동안 100°C에서 진탕하였다. 1 mL의 H₂O₂를 한번 더 첨가하고 충분히 식힌 후 원심분리하여 Whatman filter paper No. 44로 여과하고 분석을 위한 최종시료로 사용하였다. 식물시료 내의 비소농도는 ICP-MS (Inductively coupled plasma mass spectrometer; Agilent 7500ce series)로 측정하였다.

2.4. PSM과 EDTA의 첨가

식물의 성장기에 생물학적 복합기술이 미치는 영향을 평가하기 미생물을 주입하였다. 실험에 사용된 미생물은 PSM으로 종명은 *Enterobacter intermedium*이다. 멸균된 National Botanical Research Institute's Phosphate (NBRIP) 액체 배지에서 약 6일간 배양하였다. NBRIP 액체 배지의 조성은 다음과 같다. Glucose 30 g/L, Ca₃(PO₄)₂ 1 g/L, MgCl₂·6H₂O 0.5 g/L, MgSO₄·7H₂O 0.05 g/L, KCl 0.025 g/L, (NH₄)₂SO₄ 0.01 g/L이다. 배양액은 시험구 100 m² 당 20 L의 비율로 물로 희석하여 식물의 근권을 중심으로 토양 표면에 처리하였다. 주입된 총 미생물 배양액의 양은 2.58 L, 집락수 측정결과 1.0×10¹¹ CFUs였다. PSM 처리는 파종 후 12주 경과시점에서 1차, 16주 경과 후 2차로 수행되었다.

연구대상 지역에 적용된 EDTA의 영문명은 Ethyene-diaminetetraacetic acid tripotassium salt 50% Solution (50%-EDTA-3K)이며, 화학식은 C₁₀H₁₃K₃N₂O₈, 분자량은 406.51 g이다. 처리양은 대상 부지의 As 오염량과 동일한 몰 비율로 주입하였다. 처리방법으로는 EDTA 500 mL: 물 20 L의 비율로 희석하여 물뿌리개

Table 1. Physical-chemical characteristics of soils used in this study(min.-max.)

pH	Cation exchange capacity (cmol/kg)	Organic matter contents (%)	Total As conc. (μg/g)	Soluble As conc. (μg/g)
6.1-6.62	6.6-10.56	2.8-4.89	45.3-110.3	13.5-29.8
Total As conc.: Aqua regia extracted As, Soluble As: 1N HCl extracted As				

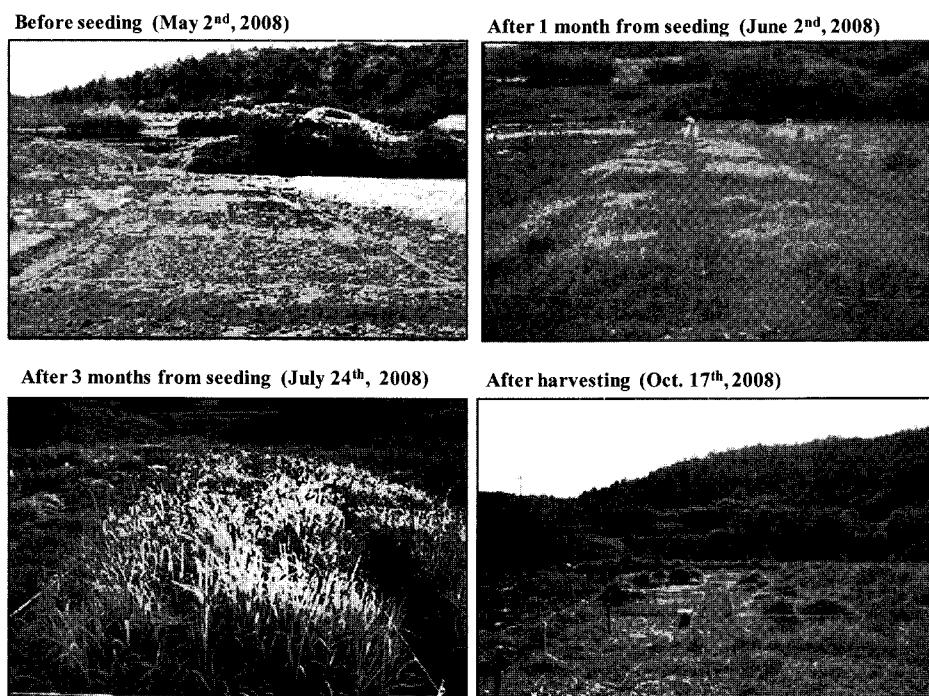


Fig. 3. The status of plant growth during the field experiment.

를 이용하여 최대한 식물에 닿지 않게 주입하였다. EDTA 처리는 PSM 처리와 동일하게 파종 후 12주 경과 시점에서 1차, 16주 경과 시점에서 2차로 수행되었다.

2.5. 미생물 활성도 측정

토양의 미생물 활성도는 털수소효소 활성 (Dehydrogenase activity)을 통해 평가 하였다. 토양 내 미생물

활성도를 측정하기 위해 널리 사용되는 방법으로서, INT assay를 사용하였다. 15 ml 투브에 CaCO_3 를 0.03 g씩 담은 후 멸균 처리한다. CaCO_3 가 담긴 투브에 풍선된 토양 3 g, 0.1% INT (2-[4-iodophenyl]-3-[4-nitrophenyl]-5-phenyltetrazolium chloride) solution 1 mL과 멸균수 1.5 mL을 clean bench에서 무균조작으로 첨가하고 37°C에서 24시간 동안 진탕 배양한 한다. 그 후 에탄올 10 mL을 첨가하여 발색이 될 때까

Table 2. Arsenic concentration in *Echinochloa crus-galli* depending on status of growth (n=3, average \pm standard deviation)

Plant part	As conc. ($\mu\text{g g}^{-1}$)		
	Control	PSM treatment	EDTA treatment
After 12 weeks from seeding	Root	10.52 \pm 4.48	7.04 \pm 1.70
	Stem+Leaf	1.15 \pm 0.26	1.77 \pm 1.70
	Ear	n.s. ^a	2.51 \pm 1.89
After 16 weeks from seeding	Root	9.83 \pm 2.82	8.44 \pm 1.39
	Stem+Leaf	1.12 \pm 0.13	1.45 \pm 0.63
	Ear	1.41 \pm 0.58	1.42 \pm 0.53
After 18 weeks from seeding	Root	11.21 \pm 4.8	10.71 \pm 2.63
	Stem+Leaf	1.35 \pm 0.64	2.37 \pm 1.45
	Ear	1.55 \pm 0.42	0.93 \pm 0.23

^an.s.: no sample

지 몇 분 두었다가 50 mL 투브에 INT-Formazon추출하는데 이 과정은 붉은 색이 없어질 때까지 반복한다. 추출한 INT-formazon은 UV-vis spectrophotometer을 사용하여 파장 485 nm에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양 내 비소의 함량과 피의 비소 흡수 능력

평균적으로 피는 식물체 내에 약 10 µg/g 내외의 농도로 비소를 축적하고 있었다. 시간이 흐름에 따라 그 양이 증가하는 추세를 보이기는 하였으나, 주목할 만한 양은 아니었다. 대부분의 비소는 식물의 뿌리에 집중되어 있었고, 바이오매스의 대부분을 차지하는 줄기 및 잎의 지상부에서는 약 2 µg/g의 농도로 축적되어 있었다 (Table 2). 식물체 내 비소 농도를 통해서는 각 처리구별로 뚜렷한 차이점은 발견할 수는 없었다. 식물의 성장에 따라 토양 내 비소의 농도가 감소할 것으로 기대 했으나 그런 경향성은 확인할 수 없었다 (Table 3). 이러한 결과는 토양 시료 채취 지점이 매 시기마다 동일할 수 없었다는 점, 토양 내 비소분포가 균일하지 않은 점으로부터 기인한 것으로 사료된다.

3.2. PSM에 의한 피의 생장 촉진과 비소의 처리 증가

본 연구에서 사용한 미생물은 Phosphate solubilizing microbes (PSM)에 속하는 *Enterobacter intermedium*로 PGPR의 한 종류이다. PGPR은 직접적, 간접적인 방법을 통해 식물의 성장을 촉진할 수 있다. 간접적으로는 항생물질이나 Siderophores를 생성하여 병원성균을 감소시키거나 방어함으로써 식물의 생장을 도울 수 있다. 직접적으로는 질소를 고정하거나 또는 식물 호르몬을 합성하기도 하며 무기 인산염의 용해 또는 유기 인산염의 무기질화를 통해 식물이 이용 가능한 인의 생산을 유도한다(Rodriguez and Fraga, 1999).

본 연구의 결과에서도 PSM은 식물의 생장을 촉진하는 역할을 하였음을 확인하였다. 최종 수확시기에 각 처

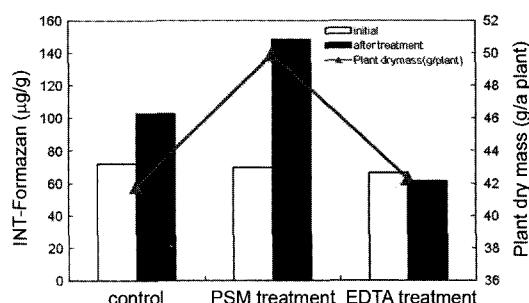


Fig. 4. Dehydrogenase activity (average \pm standard deviation) and plant drymass. Initial concentration of INT-Formazon shows almost similar value. After treatment of PSM and EDTA, there were significant changes. The plot which is treated by PSM shows the highest value of INT-Formazon compare to control and EDTA treatment. It also implies that plant dry mass can be strongly affected by PSM treatment.

리구별 식물 한 개체의 건중량을 측정한 결과, 비교 시험구에서는 41.83 g, EDTA 처리구에서는 42.31 g에 비해 PSM 처리구에서는 49.94 g으로 가장 높았다(Fig. 4). 이것은 토양 내 미생물 활성도에 따르는 필연적인 결과라고 할 수 있겠다. Dehydrogenase activity(DHA)의 농도를 통해 각 처리구별 미생물 활성도를 측정한 결과, 미생물을 처리한 시험구에서 EDTA 처리구보다 약 2배 이상 높았다. 비교 시험구보다 EDTA를 처리한 시험구에서 미생물 활성도가 더 낮게 나온 점, 또 EDTA 처리구 미생물 활성도의 초기값보다 EDTA를 처리한 후에 DHA의 농도가 낮아진 점으로 미루어 보아 EDTA의 독성으로 인해 토양미생물의 활성이 저해되었음을 확인하였다.

피의 성장시기에 따라 As의 식물체 내의 농도와 토양 내의 농도를 비교하여 BF (Bioaccumulation factor; Total As concentration in plant/Total As concentration in soil)를 계산한 결과 모든 시기에 PSM을 처리한 시험구에서 가장 낮게 관찰되었다 (Table 4). 이것은 식물체로 흡수되는 As 양에 비해 식물의 성장량이 더 커졌기 때문으로 생각된다.

Table 3. Total arsenic concentration in soil (n=3, average \pm standard deviation)

	Arsenic conc. (mg kg^{-1})		
	Control	PSM treatment	EDTA treatment
After 12 weeks from seeding	38.31 \pm 5.04	45.78 \pm 1.26	43.86 \pm 6.92
After 16 weeks from seeding	68.38 \pm 6.93	64.65 \pm 6.61	68.37 \pm 6.90
After 18 weeks from seeding	65.68 \pm 12.32	58.56 \pm 5.62	26.92 \pm 5.53

Table 4. Bioaccumulation of each treatment over time

	Bioaccumulation Factor (BF) ^a		
	Control	PSM treatment	EDTA treatment
After 12 weeks from seeding	0.31	0.25	0.32
After 16 weeks from seeding	0.18	0.17	0.20
After 18 weeks from seeding	0.21	0.18	0.41

^aBioaccumulation factor: Total arsenic conc. in plant/Total arsenic conc. in soil

3.3. EDTA 처리로 인한 As의 이동성 및 식물에 의한 처리 증가

Table 4는 다른 두 시험구에 비해 EDTA를 처리한 곳에서 BF가 가장 높음을 보여준다. 과종시점으로부터 12주 후와 16주 후의 결과를 보면 비교 시험구와 EDTA 처리구의 BF가 거의 유사하였으나, 18주 후에 채취한 식물 시료에서는 EDTA 처리구의 BF가 비교 시험구보다는 약 2배, PSM 처리구보다는 2배 이상이 높음을 확인하였다 (Table 4). 즉, EDTA의 처리로 인해 토양 내 As의 이동성과 용해도가 높아져 식물로 흡수된 양이 확연히 증가하였음을 알 수 있었다. 그러나, EDTA를 처리한 후 토양 내 미생물의 활성도가 낮아진 점으로 볼 때 EDTA의 독성을 처리시 신중하게 고려되어야 할 조건이다 (Fig. 4). 또한 한번 처리된 EDTA는 분자량이 높은 안정된 구조를 가지고 있어서 토양 내 잔류 시 분해되는데 오래 기간이 걸리고, 지하수로 침투하여 이차적인 오염 문제를 초래할 우려가 있다 (Elliott and Herzig, 1999; Elliott and Shastri, 1999).

3.4. 오염토양으로부터 식물체로 비소의 축적

Table 5에 최종적으로 피에 축적된 비소의 양을 수치로 나타내었다. 비교 시험구에서는 총 476 g, PSM 처리구에서는 554 g, EDTA 처리구에서는 379 g의 비소를 축적하였다. PSM 처리구에서는 피의 비소축적 효율이 약 16% 증가하였고, EDTA 처리구에서는 오히려 약 20%의 감소를 보였다. EDTA를 처리한 시험구에서는 BF는 높았을지라도 식물의 성장에 저해를 받아 최종적으로는 비교 시험구보다 더 좋지 않은 결과를 보여준다. 따라서 EDTA의 처리 시기 및 양을 식

물의 성장을 저해하지 않도록 적용한다면 피의 비소 축적 효율을 증가시킬 수 있을 것으로 생각되며, 이는 식물정화 공법을 적용하는 데 있어서 식물의 바이오매스가 중요한 요인임을 다시 한번 확인할 수 있음을 보여준다.

4. 결 론

본 연구는 토양 내의 중금속, 미생물, 수용성 리간드 그리고 식물의 상호작용을 이용하여 식물정화 공법의 효율을 높이고자 수행하였다. 국내에서 흔히 볼 수 있는 식물인 피를 이용하여 PSM과 EDTA의 처리에 따라 식물체로 비소의 흡수효율이 어떻게 변화하는지 확인하였다. EDTA를 처리한 시험구에서는 비교 시험구와 PSM을 처리한 시험구에 비해 2배 이상 BF가 증가하는 것을 확인하였다. 또 PSM을 처리한 시험구에서는 가장 낮은 BF가 계산되었는데, 이것은 중금속의 흡수량이 식물의 성장량에 못 미쳤던 결과이다. 최종적으로 실험부지에서 제거된 비소의 양은 PSM을 처리한 시험구에서 약 16%의 상승효과가 있었으나, EDTA를 처리한 시험구에서는 오히려 20%정도가 감소한 것을 확인하였다. 이것은 EDTA의 독성으로 인해 식물의 성장이 저해된 결과이다.

결론적으로, 피와 같이 어느 정도 비소 흡수 능력이 있는 식물을 정화공법에 적용할 때, 미생물이나 EDTA와 같은 생물학적, 혹은 화학적인 처리를 해주면 공법의 효과는 중대 혹은 촉진 될 수 있으나 식물성장의 저해 가능성에 따라 적용 시기와 처리량에 대한 체계적인 조사 및 지속적인 모니터링이 요구된다고 할 것이다.

Table 5. Total accumulated arsenic from each treatment

	Control	PSM treatment	EDTA treatment
As conc. in plant ($\mu\text{g/g}$)	14.1	14.0	10.9
Total plant drymass (kg)	33.7	39.5	34.7
Total accumulated arsenic (mg)	476	554	379

사 사

본 연구는 2006년부터 2008년까지 수행된 한국광해관리공단의 “식생을 이용한 중금속 오염토양 정화기술 개발” 과제의 연구결과이며, 한국광해관리공단의 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- Aboulroos, S.A., Helal, M.I.D. and Kamel, M.M. (2006) Remediation of Pb and Cd Polluted Soils Using in situ Immobilization and Phytoextraction Techniques. *Soil & Sediment Contamination*, v.15, p.199-215.
- Blaylock, M.J., Salt, D.E., Dushenkov, S., Zakharchova, O. and Gussman. C. (1997) Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil applied chelating agents. *Environ. Sci. Technol.*, v.31, p.860-865.
- Brown, M. (1974) Seed and root bacterization. *Ann. Rev. Phytopathol.*, v.12, p.181-197.
- Cunningham, S.D. and Ow, D.W. (1996) Promises and prospects of phytoremediation. *Plant Physiology*, v.110, p.715-719.
- Chen, Y., Li, X.D. and Shen, Z.G. (2004) Leaching and uptake of heavy metals by ten different species of plants during an EDTA-assisted phytoextraction process. *Chemosphere*, v.57, p.187-196.
- Davison, J. (1988) Plant beneficial bacteria. *Nature Biotechnology*, v.6, p.282-286.
- Elliott, H.A. and Herzig, L.M. (1999) Oxalate extraction of Pb and Zn from polluted soils: solubility limitations. *J. Soil. Contam.*, v.8(1), p.105-116.
- Elliott, H.A. and Shastri, N.L. (1999) Extraction decontamination of metal-polluted soils using oxalate. *Water, Air, and Soil Pollut.*, v.110, p.335-346.
- Glick, B.R., Penrose, D.M. and Li, J. (1998) A model for the lowering of plant ethylene concentrations by plant growth promoting bacteria. *J. Theor. Biol.*, v.190, p.63-68.
- Kaschl, A., Romheld, V. and Chen, Y. (2002) Cadmium binding by fractions of dissolved organic matter and humic substances from municipal solid waste compost. *J. of Environmental Quality*, v.31, p.1885-1892.
- Kloepper, J.W., Lifshitz, R. and Zablotowicz, R.M. (1989) Free-living bacterial inocula for enhancing crop productivity. *Trends Biotechnol.*, v.7, p.39-43.
- Lambert, B. and Joos, H. (1989) Fundamental aspects of rhizobacterial plant growth promotion research. *Trends Biotechnol.*, v. 7, p.215-219.
- Patten, C.L. and Glick, B.R. (1996) Bacterial biosynthesis of indole-3-acetic acid. *Can. J. Microbiol.*, v.42, p.207-220.
- Rodriguez, H. and Fraga, R. (1999) Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion, *Bio-technology Advances*. v.17, p.319-339.

2009년 11월 18일 원고접수, 2010년 3월 10일 게재승인