

토양 비소 오염원의 종류가 봉의꼬리의 생육 및 비소 축적에 미치는 영향

한지현^{1,2}, 권혁준¹, 이철희^{1,2*}

¹충북대학교 원예과학과, ²충북대학교 축산·원예·식품공학부 생물건강소재산업화사업단

Effect of Arsenic Types in Soil on Growth and Arsenic Accumulation of *Pteris multifida*

Ji Hyun Han^{1,2}, Hyuk Joon Kwon¹ and Cheol Hee Lee^{1,2*}

¹Department of Horticultural Science, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

²Brain Korea 21 Center for Bio-Resource Development, Division of Animal, Horticultural, and Food Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

Abstract - This study was carried out to analyze the effect of arsenic types on growth and arsenic accumulation ability of *Pteris multifida*. Among arsenic pollution sources, Sodium arsenate, Calcium arsenate, Sodium arsenite and Potassium arsenite were treated in horticultural compost contaminated with 500 mg·kg⁻¹. *P. multifida* was cultivated for 12 weeks. The results of study, Calcium arsenate treatment showed slightly decreased growth of *P. multifida*. But, growth of *P. multifida* cultivated in the remaining arsenic treatment was similar to untreated control plot. With only short-term cultivation of 4 weeks, aerial part of *P. multifida* in Sodium arsenate treatment showed high arsenic accumulation of 2,289.5 mg·kg⁻¹ DW. The arsenic accumulation (2,956.0 mg·kg⁻¹ DW) was the highest at 12 week. On the other hand, underground part showed the highest arsenic accumulation in Potassium arsenite treatment (2,470.2 mg·kg⁻¹ DW) and Calcium arsenate treatment accumulated 1,060.7 mg·kg⁻¹ DW of arsenic. Regardless of arsenic types, aerial part of *P. multifida* was absorbed more than 1000 mg·kg⁻¹ DW of arsenic. And removal of arsenic in soil was also higher. Therefore, *Pteris multida* is considered to be suitable phytoremediation material of various arsenic contaminated areas.

Key words - Sodium arsenate, Calcium arsenate, Sodium arsenite, Potassium arsenite

서 언

비소는 지구상에 20번째로 많이 존재하는 원소로 광물, 암석, 퇴적물을 비롯해 토양에 널리 분포하며, 토양의 pH 및 산화환원 조건에 따라 상이한 화학종으로 변하여 토양 내 이동성을 보이는 독성이 강한 원소 중의 하나이다(Ronald and William, 1982; Cullen and Reimer, 1989; Alloway, 1995). 비소는 피부암과 폐암 등을 유발시키는 1급 발암물질이며(Boffetta, 1993), 인체의 비소 노출은 폐, 간, 신장, 위장 등에 암의 발생과 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다(Tokudome and Kuratsune, 1976; Enterline and Marsh, 1982; Jarup and Pershagen, 1991).

우리나라는 각종 광산의 난개발로 인해 비소를 포함한 중금속의 축적에 의한 토양오염이 우려되고 있다. 특히 금속광산의 경우에

는 폐광산이 급증하여, 전국에 약 2,000개의 휴·폐광산이 산재되어 있는 것으로 알려져 있다(Park, 1994). 이들 광산에는 대부분 오염 방지시설이 설치되어 있지 않아, 주변 생태계를 위협하고 있는 실정이다.

또한, 비소는 수천 년 동안 인류에 의해 사용되어 왔으며, 현재에도 농약, 목재 방부제, 가축의 성장촉진제로 널리 쓰이고 있다. 표토와 지하수의 비소함량은 인류활동이 활발해 짐에 따라 계속 늘어나고 있는 추세이며, 금속광산, 농약의 사용, 화석연료의 연소 등에 의한 비소 오염은 다분히 국지적으로 나타나고 있다. 그러나 자연 부존량에 비하면 수천 배 이상의 고농도로 나타난다(Smedley and Kinniburgh, 2002).

비소 및 중금속 등의 무기 오염물에 대한 오염 조사 및 복원은 염소계 유기 오염물질 등의 처리와 비교하여 적게 다루어져 왔다. 그러나 최근에는 그 위해성이 휴·폐 금속광산 및 제련소 일

*교신저자(E-mail) : hallojuni@naver.com

© 본 학회지의 저작권은 (사)한국자원식물학회지에 있으며, 이의 무단전재나 복제를 금합니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

대의 자료를 바탕으로 다시 제시되고 있다(김경웅 등, 2006). 우리나라에서 비소의 오염 및 피해는 금속광산 및 제련소 인근의 토양에서 나타나는 경우가 많으며, 다양한 비소 오염원과 농도로 오염되어 있다(Kim and Kim, 2004). 비소에 의한 토양오염이 이슈화되면서 식물을 이용하여 자연환경을 복원하는 식물상정화기법(phytoremediation)이 각광받고 있다(USEPA, 2001; Lasat, 2002).

봉의꼬리(*Pteris multifida*)는 2009년 본 연구지와 동일한 J 제련소 주변에서 재배하여 중금속 축적능을 분석한 Ju (2011)의 연구 결과 1,121.68 mg·kg⁻¹ DW의 비소를 축적하여 현장적용이 가능한 식물로 분석되었으며, 비소의 축적능이 매우 우수한 고축적 식물로 보고되었다(Du *et al.*, 2005; Oh, 2006; Wang *et al.*, 2006, 2007; Wei *et al.*, 2007; Ju, 2011; Kwon *et al.*, 2013, 2014). 그러나 비소 오염원의 종류에 따른 봉의꼬리의 생육 반응 및 비소 축적에 관한 연구는 부족한 실정이다.

이에 농업 및 산업분야에서 널리 사용되고 있고 그 오염정도가 심각한 것으로 알려진 대표적인 As(III)인 Sodium arsenate (Na₂HAsO₄·7H₂O)와 Calcium arsenate (NaAsO₂) 및 As(V)인 Sodium arsenite (NaAsO₂)와 Potassium arsenite (K₂HAsO₄) 등 4종을 0, 500mg·kg⁻¹ 수준으로 오염시킨 토양에서 봉의꼬리의 생육 및 비소 축적능을 분석하여 비소 오염원의 종류에 따른 봉의꼬리의 식물상정화기법에 적용 가능성을 분석하기 위해 수행하였다.

재료 및 방법

실험 재료

본 실험에는 선행연구에서 비소 축적능이 우수한 것으로 밝혀진 봉의꼬리(*Pteris multifida*)를 소재로 사용하였다(Du *et*

al., 2005; Oh, 2006; Wang *et al.*, 2006, 2007; Wei *et al.*, 2007; Ju, 2011; Kwon *et al.*, 2013, 2014). 조직배양을 통해 번식하여, 충북 청주시 충북대학교 내의 무가온 비닐하우스에서 1년 동안 육묘한 다음 동일한 생육단계에 있는 것을 실험재료로 사용하였다(Table 1, 2).

실험 방법

실험에 사용한 토양은 원예용 상토(원조믹스, 농경)를 이용하였으며, 비소의 처리를 위해 토양수분이 미량이 되도록 풍건시켰다. 풍건이 완료된 토양은 3 kg씩 정량하여 비소를 처리하였다.

비소 종류별 실험은 대표적인 As(III)인 Sodium arsenate (Na₂HAsO₄·7H₂O)와 Calcium arsenate [Ca₃(AsO₄)₂] 및 As(V)인 Sodium arsenite (NaAsO₂)와 Potassium arsenite (K₂HAsO₄) 등의 4종류를 선정하여 0, 500 mg·kg⁻¹의 농도로 처리하였다.

비소의 종류를 달리하여 혼합된 토양을 110 mm 크기의 플라스틱 화분에 담은 후 봉의꼬리를 화분 당 1개씩 정식하였다. 모든 처리는 5개의 화분을 1반복으로 하여, 70% 차광을 씌운 무가온 비닐하우스에 완전임의배치 3반복으로 배치하였다. 관수는 미스트 장치를 이용하여 지상 1.5 m에서 2일 1회 20분씩 관수하였으며, 관수로 인한 토양 내 비소 유실량을 확인하기 위해 모든 처리에 봉의꼬리 무식재구를 두었다. 2012년 8월 11일부터 2012년 11월 4일까지 12주간 재배하여, 비소의 종류 및 농도에 따른 봉의꼬리의 생육 및 비소 축적능을 분석하였다.

조사 방법

생육조사는 봉의꼬리를 4주 간격으로 초장, 초폭, 엽장, 엽폭, 엽수, SPAD, 근장, 지상부와 지하부의 생체중 및 건물중 등을 각 처리당 5주씩 3반복으로 조사하였다. 비소의 종류 및 농도

Table 1. Growth state of *Pteris multifida* used for this study

Plant height (cm)	Plant width (cm)	No. of leaves /plant (ea)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	SPAD value	Root length (cm)
5.0 ± 0.47 ^z	11.4 ± 0.54	11.1 ± 0.54	6.0 ± 0.20	4.0 ± 0.17	24.7 ± 1.11	14.3 ± 0.55

^zValues are mean ± SE (n = 15).

Table 2. Fresh and dry weight of *Pteris multifida* used for this study

Fresh weight (g)			Dry weight (g)		
Aerial part	Underground part	Total	Aerial part	Underground part	Total
0.5 ± 0.04 ^z	1.0 ± 0.28	1.6 ± 0.42	0.2 ± 0.01	0.1 ± 0.01	0.3 ± 0.02

^zValues are mean ± SE (n = 15).

에 따른 내성 평가지수(IT)는 Wilkins (1978)의 방법을 이용하여 실시하였다.

$$\text{내성 평가지수(IT, \%)} = \frac{\text{비소 처리구의 뿌리 신장량}}{\text{무처리구의 뿌리 신장량}} \times 100$$

비소함량 분석을 위하여 봉의꼬리를 지상부와 지하부로 나누어 60°C의 건조기(Hanbaek Scientific Co., Korea)에서 72시간 건조시킨 다음 분쇄하여 습식분해법으로 전처리하였다. 토양은 음건하여 나무망치로 분쇄하여 0.15 mm (100 mesh)로 체 걸음 한 다음 시료를 각 200 g씩 취하여 사분법에 의해 균일하게 혼합하여 환경부의 토양오염공정시험법에 준하여 전처리하였다.

전처리한 토양 및 식물의 시료는 유도결합플라즈마분광도계(Perkin Elmer Optima 5300DV ICP-AES, Perkin Elmer)를 이용하여 유도결합플라즈마-원자발광분광법(환경부, 2012)으로 비소(As)의 함량을 측정하였다. 또한 식물에 축적된 중금속이 지하부에서 지상부로 이동되는 이동계수(Translocation ratio, TR)와 생물축적계수(Bioaccumulation factor, BF)는 아래의 식을 이용해 분석하였다.

$$\text{이동계수(TR)} = \frac{\text{지상부의 비소 축적능}}{\text{지상부와 지하부의 비소 축적능}}$$

$$\text{생물축적계수(BF)} = \frac{\text{지상부의 비소 축적능}}{\text{토양의 비소 함량}}$$

통계 처리

식물과 토양의 비소 함량은 3회 3반복으로 측정하였으며, 식물의 생육은 처리당 5개체씩 3반복으로 조사하였다. 통계처리는 SAS version 9.3 (SAS Institute Inc., Cary, NC USA)을 이용하여 평균과 표준오차를 구하였다. Tukey-Kramer의 다중검정방법(Tukey's multiple range test)을 이용하여 $p < 0.05$ 수준에서 처리구간의 유의성을 검정하였다.

결과 및 고찰

생육 반응

비소의 종류에 따른 봉의꼬리의 생육은 재배 기간이 경과됨에 따라 다르게 나타났다(Table 3). 재배 4주차까지는 비소의 종

류에 관계없이 모든 생육 반응이 무처리구와 비슷하였으나, 재배 8주차부터 As(III)인 $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ 처리구는 무처리구에 비해 생육이 다소 저조하였다. 그러나 나머지 비소 처리구는 생육이 전반적으로 양호하였다. As(III)인 $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 처리구에서는 봉의꼬리의 전반적인 생육반응이 비소 무처리구와 비슷하거나, 통계적으로 유의하지는 않지만 평균적으로 더 양호하였다. 또한, As(V)인 NaAsO_2 와 K_2HAsO_4 처리구에서도 엽폭을 제외한 모든 생육지표가 무처리구와 비슷하였다.

봉의꼬리의 생육이 다소 불량하였던 $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ 처리구의 경우 근장이 크게 감소한 것으로 분석되었다. 일반적으로 식물의 증금속 내성은 뿌리의 신장과 관련이 있는데, 봉의꼬리의 경우에도 비소종류에 따른 내성이 뿌리의 신장과 깊은 관련이 있는 것으로 생각된다(Wilkins, 1978). $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ 처리구의 엽록소의 함량(39.5)도 무처리구(48.6)에 비해 크게 감소하였는데, 이는 일반적으로 증금속으로 오염된 식물에서 나타나는 엽록소 생합성 억제에 따른 잎의 황화 증상에 기인한 것으로 생각된다(Nriagu, 1980; Yang and Lee, 1990).

식물의 증금속 과다장에는 생장량 및 수량을 감소시키고, 심할 경우 식물이 고사하는 것으로 알려져 있다(Jeon and Choi, 2006). 봉의꼬리는 $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ 처리구를 제외한 모든 종류의 비소 오염토양에서 양호한 생육을 보여, 다양한 종류의 비소 오염 지역에 식물정화공법 소재로 적용이 가능할 것으로 생각된다.

비소의 종류에 따른 봉의꼬리의 내성은 비소의 종류와 재배 기간에 따라 다르게 나타났다(Table 4). 재배 초기인 4주차에는 무처리구에 비해 대체로 우수하였으나, 재배기간이 증가할수록 무처리구와 비슷해지는 경향을 보였다.

생육이 우수하였던 $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 와 NaAsO_2 , K_2HAsO_4 처리구의 봉의꼬리는 무처리구(100%) 대비 82.6~191.3%의 내성을 보였으나, 생육이 저조했던 $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ 처리구는 재배 12주차에 내성 평가지수가 15.4%로 매우 낮았다.

전반적으로 생육이 가장 우수하였던 $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 처리구는 내성평가에서도 다른 비소 처리구에 비해 내성이 높은 경향을 보였으며, 봉의꼬리의 생육과 내성 평가지수가 비례하는 경향이였다. 이는 Wilkins (1978)가 보고한 낫에 대한 *Agropyron repens*의 내성평가와 비슷한 결과로 비소 종류에 따른 봉의꼬리의 근장 신장률이 지상부의 생육과 밀접한 관계가 있는 것으로 해석된다. 따라서 봉의꼬리의 생육이 다소 저조했던 $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ 오염구의 근장을 증가시켜 내성을 올린다면, $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ 로 오염된 토양에서 봉의꼬리의 비소 정화효과도 크게 증가시킬 수 있을 것으로 생각된다.

Table 3. Effect of arsenic types on growth of *Pteris multifida*

Cultivation period (weeks)	Types of arsenic	Plant height (cm)	Plant width (cm)	No. of leaves/plant (ea)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	SPAD value	Root length (cm)
4	Non-treatment	6.8 ± 0.27 ^a ^y	17.2 ± 1.38a	16.9 ± 0.86a	9.1 ± 0.60a	5.8 ± 0.26a	44.3 ± 0.99a	15.8 ± 0.47a
	Na ₂ HAsO ₄ ·7H ₂ O	7.6 ± 0.33a	17.8 ± 0.51a	15.4 ± 0.68a	9.6 ± 0.54a	6.4 ± 0.33a	45.3 ± 1.14a	17.3 ± 0.42a
	Ca ₃ (AsO ₄) ₂	8.2 ± 0.52a	17.8 ± 0.83a	14.6 ± 0.64a	9.2 ± 0.46a	5.8 ± 0.31a	41.2 ± 1.16a	17.3 ± 0.84a
	NaAsO ₂	8.7 ± 0.44a	19.2 ± 1.32a	14.3 ± 0.83a	10.7 ± 0.53a	7.1 ± 0.41a	45.3 ± 1.25a	18.0 ± 0.71a
	K ₂ HAsO ₄	9.5 ± 0.65a	19.9 ± 1.00a	16.5 ± 0.92a	12.0 ± 0.51a	6.7 ± 0.28a	42.1 ± 1.28a	17.3 ± 0.50a
8	Non-treatment	15.9 ± 1.12a	33.5 ± 0.86a	18.7 ± 0.61a	16.7 ± 0.59a	13.2 ± 0.54a	49.4 ± 1.09a	22.8 ± 0.96ab
	Na ₂ HAsO ₄ ·7H ₂ O	13.0 ± 0.97a	30.9 ± 0.83ab	21.6 ± 0.90a	15.1 ± 0.84ab	11.7 ± 0.67a	47.7 ± 0.92a	25.4 ± 0.87a
	Ca ₃ (AsO ₄) ₂	8.1 ± 0.41b	21.6 ± 1.23c	14.9 ± 0.77b	9.6 ± 0.69c	6.5 ± 0.35b	43.4 ± 1.88a	16.7 ± 0.66c
	NaAsO ₂	10.8 ± 0.73ab	27.4 ± 0.94b	19.5 ± 0.77ab	12.8 ± 0.43b	8.9 ± 0.56b	50.0 ± 0.68a	23.0 ± 0.68ab
	K ₂ HAsO ₄	10.1 ± 0.72ab	25.4 ± 0.81b	17.1 ± 0.86ab	10.9 ± 0.74bc	8.0 ± 0.49b	47.5 ± 1.38a	20.3 ± 0.57bc
12	Non-treatment	19.8 ± 1.31a	35.5 ± 1.15a	19.3 ± 1.19bc	14.8 ± 0.60a	11.3 ± 0.75a	45.5 ± 1.39ab	22.6 ± 0.73a
	Na ₂ HAsO ₄ ·7H ₂ O	19.1 ± 1.13ab	33.1 ± 0.96a	21.6 ± 0.72ab	14.0 ± 0.93a	13.0 ± 0.59a	48.6 ± 1.00a	23.9 ± 0.99a
	Ca ₃ (AsO ₄) ₂	5.6 ± 0.40c	19.0 ± 1.09b	16.3 ± 1.54c	7.7 ± 0.63b	6.3 ± 0.50c	39.5 ± 2.51b	15.5 ± 1.17b
	NaAsO ₂	18.5 ± 0.84a	32.2 ± 0.67a	26.1 ± 1.27a	13.8 ± 0.47a	10.3 ± 0.73b	50.9 ± 1.43a	24.3 ± 0.74a
	K ₂ HAsO ₄	15.7 ± 0.91b	31.3 ± 0.88a	21.6 ± 1.15ab	12.1 ± 0.53a	9.3 ± 0.74b	50.5 ± 1.09a	23.2 ± 0.65a
Cultivation period (CP)		***	***	***	***	***	***	***
Types of arsenic (TA)		***	***	***	***	***	***	***
CP × TA		***	***	***	***	***	***	***

^xValues are mean ± SE (n = 15).

^yMean values followed by different letters within a column are significantly different according to Tukey's multiple range test at *P* = 0.05 level. ns, *, *** nonsignificant or significant at *P* < 0.05 or 0.001, respectively.

Table 4. Effect of arsenic types on indices tolerance (IT) of *Pteris multifida*

Cultivation period (weeks)	Types of arsenic	IT (%)
4	Na ₂ HAsO ₄ ·7H ₂ O	191.3 ± 33.64 ^z a ^y
	Ca ₃ (AsO ₄) ₂	110.1 ± 48.84a
	NaAsO ₂	190.5 ± 51.48a
	K ₂ HAsO ₄	158.9 ± 43.40a
8	Na ₂ HAsO ₄ ·7H ₂ O	136.0 ± 13.07a
	Ca ₃ (AsO ₄) ₂	29.1 ± 9.97b
	NaAsO ₂	109.9 ± 29.02ab
	K ₂ HAsO ₄	82.6 ± 8.48ab
12	Na ₂ HAsO ₄ ·7H ₂ O	128.3 ± 16.15a
	Ca ₃ (AsO ₄) ₂	15.4 ± 17.74b
	NaAsO ₂	112.4 ± 7.89a
	K ₂ HAsO ₄	101.0 ± 9.25a
Cultivation period (CP)		***
Types of arsenic (TA)		***
CP × TA		***

^zValues are mean ± SE (n = 9).

^yMean values followed by different letters within a column are significantly different according to Tukey's multiple range test at *P* = 0.05 level.

ns, *, *** nonsignificant or significant at *P* < 0.05 or 0.001, respectively.

Table 5. Effect of arsenic types on fresh and dry weight of *Pteris multifida*

Cultivation period (weeks)	Types of arsenic	Fresh weight (g)			Dry weight (g)		
		A ^z	U	T	A	U	T
4	Non-treatment	1.9 ± 0.11 ^{ya} x	1.0 ± 0.08c	2.9 ± 0.76a	0.5 ± 0.02b	0.2 ± 0.01a	0.7 ± 0.17a
	Na ₂ HAsO ₄ ·7H ₂ O	2.0 ± 0.12a	1.4 ± 0.09b	3.4 ± 0.21a	0.5 ± 0.03b	0.2 ± 0.01a	0.7 ± 0.04a
	Ca ₃ (AsO ₄) ₂	1.7 ± 0.11b	1.4 ± 0.07b	3.1 ± 0.17a	0.4 ± 0.03c	0.2 ± 0.02a	0.7 ± 0.05a
	NaAsO ₂	1.8 ± 0.10b	1.4 ± 0.08b	3.2 ± 0.16a	0.4 ± 0.03c	0.2 ± 0.01a	0.6 ± 0.04a
	K ₂ HAsO ₄	2.0 ± 0.14a	1.8 ± 0.11a	3.8 ± 0.23a	0.6 ± 0.05a	0.3 ± 0.02a	0.8 ± 0.07a
8	Non-treatment	5.2 ± 0.24b	3.9 ± 0.26b	9.1 ± 2.46b	1.3 ± 0.07a	0.5 ± 0.03b	1.8 ± 0.48a
	Na ₂ HAsO ₄ ·7H ₂ O	6.0 ± 0.18a	4.7 ± 0.27a	10.6 ± 0.42a	1.4 ± 0.08a	0.6 ± 0.03a	2.0 ± 0.08a
	Ca ₃ (AsO ₄) ₂	2.4 ± 0.28e	1.4 ± 0.15e	3.9 ± 0.39e	0.7 ± 0.07c	0.3 ± 0.03c	1.0 ± 0.09c
	NaAsO ₂	4.0 ± 0.19c	3.1 ± 0.20c	7.1 ± 0.26c	1.1 ± 0.05b	0.5 ± 0.03b	1.6 ± 0.06b
	K ₂ HAsO ₄	3.1 ± 0.24d	2.2 ± 0.21d	5.3 ± 0.43d	0.8 ± 0.05c	0.3 ± 0.02c	1.1 ± 0.07bc
12	Non-treatment	10.5 ± 0.49a	12.6 ± 0.68a	23.2 ± 6.14a	1.9 ± 0.14a	0.9 ± 0.06ab	2.8 ± 0.74a
	Na ₂ HAsO ₄ ·7H ₂ O	8.4 ± 0.46b	10.2 ± 0.98b	18.5 ± 0.94c	2.0 ± 0.13a	1.0 ± 0.06a	3.0 ± 0.16a
	Ca ₃ (AsO ₄) ₂	6.4 ± 0.51c	6.4 ± 0.34c	12.9 ± 0.60d	0.7 ± 0.10c	0.4 ± 0.03c	1.1 ± 0.11c
	NaAsO ₂	8.7 ± 0.69b	10.6 ± 0.84b	19.4 ± 1.17b	2.0 ± 0.13a	1.0 ± 0.07a	3.0 ± 0.15a
	K ₂ HAsO ₄	10.8 ± 0.57a	11.9 ± 0.53a	22.7 ± 0.90a	1.6 ± 0.10b	0.8 ± 0.04b	2.4 ± 0.09ab
Cultivation period (CP)		***	***	***	***	***	***
Types of arsenic (TA)		***	***	***	***	***	***
CP × TA		***	***	***	***	***	***

^zA: aerial part, U: underground part, T: total(aerial part + underground part).

^yValues are mean ± SE (n = 15).

^xMean values followed by different letters within a column are significantly different according to Tukey's multiple range test at *P* = 0.05 level.

^{ns}, *, *** nonsignificant or significant at *P* < 0.05 or 0.001, respectively.

봉의꼬리의 생체중 및 건물중은 비소 오염원의 종류에 관계 없이 재배기간이 증가할수록 많아지는 경향을 보였다(Table 5). 봉의꼬리 재배 4주차의 지상부 생체중은 Na₂HAsO₄·7H₂O와 K₂HAsO₄ 처리구에서는 무처리구와 비슷하였으나, NaAsO₂와 Ca₃(AsO₄)₂ 처리구에서는 무처리구(1.9 g)에 비해 다소 적은 1.7, 1.8 g으로 조사되었다. 비소 종류에 따른 봉의꼬리의 내성 평가지수가 가장 적었던 Ca₃(AsO₄)₂ 처리구의 지상부 생체중은 8주차에 2.4 g으로 4주차에 비해 0.7 g만 증가되었다. 그러나 Na₂HAsO₄·7H₂O 처리구에서는 6.0 g으로 가장 양호하였다.

8주차 대비 12주차의 비소의 종류에 따른 지상부 생체중의 증가량은 2.4 (Na₂HAsO₄·7H₂O)~7.7 g (K₂HAsO₄)으로 다양하게 나타났다. 지상부의 생체중이 8주차까지 가장 무거웠던 Na₂HAsO₄·7H₂O 처리구는 재배기간이 경과함에 따라 생체중의 증가량이 다소 감소한 반면, K₂HAsO₄ 처리구는 재배기간이 증가할수록 증가하여 12주차에는 10.8 g으로 가장 많았다. 지상부

의 생체중이 가장 낮았던 Ca₃(AsO₄)₂ 처리구는 12주차에 8주차 대비 4.0 g 증가하여 재배기간이 증가할수록 성장량도 많아졌다. 따라서, Ca₃(AsO₄)₂로 오염된 토양에서의 봉의꼬리 생육도 장기간 재배하면 향상될 것으로 기대된다. 지하부의 생체중 또한 지상부와 비슷한 경향을 보였다. K₂HAsO₄ 처리구의 12주차 봉의꼬리의 지하부 생체중(10.8 g)은 비소 무처리구(10.5 g)와 유사하였다.

식물정화기법에서 토양의 정화효과는 식재한 식물의 생육과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 특히 지상부의 건물중이 많을수록 토양정화에 효과적인 것으로 알려져 있다(Park *et al*, 2003). 비소 오염원을 달리하여 12주 동안 재배한 봉의꼬리 지상부의 건물중은 오염정도 및 범위가 가장 넓은 것으로 알려진 Na₂HAsO₄·7H₂O와 NaAsO₂ 처리구에서 동일하게 2.0 g으로 유의하지는 않으나 무처리구에 비해 생산량이 더 많았다. 또한 K₂HAsO₄ 처리구에서도 1.6 g의 양호한 건물중을 보였다.

붕의꼬리는 $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, NaAsO_2 , K_2HAsO_4 등의 다양한 비소로 오염된 토양에서 생육이 매우 양호하였으며, $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ 처리구에서는 생육이 다소 저조하였다. 인산과 유기물질이 풍부한 토양개량제 처리는 식물의 생육 및 중금속 축적량을 향상시키는 것으로 알려져 있다(Choi, *et al.*, 2002; Kim, 2002; Choi and Chiang, 2003). 썩의 경우에는 유험과 퇴비의 혼용(Kim, 2002), 해바라기는 돌로마이트 처리(Choi *et al.*, 2002)를 통해 생육과 중금속 축적능을 향상시킨 것으로 알려져 있다. 따라서 붕의꼬리의 생육 및 비소 축적능 향상을 위한 토양개량제 연구를 통해 생육이 다소 저조했던 $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ 처리구를 비롯하여 다양한 비소 오염원에서의 붕의꼬리 생육 및 비소 축적능을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

비소 축적

비소의 고축적 식물은 지상부의 비소 축적능이 $1,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

DW 이상이거나, 지상부의 건물중 당 비소의 함량이 0.1% 이상인 식물로 정의한다(Baker and Books, 1989; Watanabe, 1997). 비소 오염원의 종류를 달리하여 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 로 오염시킨 토양에서 재배한 붕의꼬리의 지상부 비소 축적능은 비소 종류에 관계없이 4주차에 $1,400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW 이상, 12주차는 $2,100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW 이상으로 매우 우수하였다(Table 6).

비소 축적능이 우수한 식물로 알려진 *Pteris vitata*는 본 연구와 동일한 비소 오염정도에서 $2,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW 이상의 비소를 축적하는 것으로 보고되었다(Cao *et al.*, 2004), 본 연구의 붕의꼬리도 비소의 축적능이 $2,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW 이상으로 매우 우수하였다. 외국식물종의 국내 적용은 기후, 생태, 토양 등 식물의 생육조건 차이 때문에 어려운 점들이 발생할 가능성이 높고, 생태교란이 우려된다(Kim *et al.*, 1999). 그러므로 국내 자생종인 붕의꼬리는 식물정화기법 식물소재로써 가치가 매우 높다고 할 수 있다.

Table 6. Effect of arsenic types on arsenic accumulation of *Pteris multifida*

Cultivation period (weeks)	Types of arsenic	Arsenic accumulation ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW)	
		Aerial part	Underground part
4	Non-treatment	$71.8 \pm 4.80^{\text{d}^{\text{y}}}$	$59.9 \pm 1.72\text{d}$
	$\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$2,289.5 \pm 49.80\text{a}$	$731.1 \pm 3.68\text{b}$
	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$	$1,939.3 \pm 44.85\text{b}$	$737.0 \pm 13.47\text{b}$
	NaAsO_2	$2,261.4 \pm 6.05\text{a}$	$1,046.1 \pm 50.71\text{a}$
	K_2HAsO_4	$1,431.9 \pm 51.73\text{c}$	$673.3 \pm 16.24\text{b}$
8	Non-treatment	$264.3 \pm 7.18\text{c}$	$71.4 \pm 2.96\text{b}$
	$\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$2,364.1 \pm 12.96\text{a}$	$1,061.9 \pm 17.27\text{a}$
	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$	$2,089.5 \pm 49.19\text{b}$	$944.1 \pm 14.01\text{a}$
	NaAsO_2	$2,375.6 \pm 82.35\text{a}$	$1,019.2 \pm 20.03\text{a}$
	K_2HAsO_4	$2,042.9 \pm 62.59\text{b}$	$1,035.3 \pm 5.63\text{a}$
12	Non-treatment	$438.0 \pm 14.03\text{c}$	$125.2 \pm 12.24\text{e}$
	$\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$2,956.0 \pm 74.38\text{a}$	$1,623.1 \pm 32.20\text{b}$
	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$	$2,146.2 \pm 22.69\text{b}$	$1,060.7 \pm 36.12\text{d}$
	NaAsO_2	$2,841.1 \pm 41.44\text{a}$	$1,303.0 \pm 17.94\text{c}$
	K_2HAsO_4	$2,752.4 \pm 11.09\text{a}$	$2,470.2 \pm 30.13\text{a}$
Cultivation period (CP)		***	***
Types of arsenic (TA)		***	***
CP × TA		***	***

^zValues are mean±SE (n=3).

^yMean values followed by different letters within a column are significantly different according to Tukey's multiple range test at $P = 0.05$ level.

^{ns}, *, *** nonsignificant or significant at $P < 0.05$ or 0.001 , respectively.

Table 7. Effect of arsenic types on bioaccumulation factor (BF) and translocation ratio (TR) of *Pteris multifida*

Cultivation period (weeks)	Types of arsenic	BF	TR
4	Na ₂ HAsO ₄ ·7H ₂ O	2.9 ± 0.02zay	0.76 ± 0.002a
	Ca ₃ (AsO ₄) ₂	2.5 ± 0.02b	0.72 ± 0.003b
	NaAsO ₂	2.9 ± 0.02a	0.68 ± 0.005b
	K ₂ HAsO ₄	1.8 ± 0.01c	0.68 ± 0.005c
8	Na ₂ HAsO ₄ ·7H ₂ O	3.0 ± 0.02a	0.69 ± 0.002bc
	Ca ₃ (AsO ₄) ₂	2.7 ± 0.02b	0.69 ± 0.003b
	NaAsO ₂	3.0 ± 0.02a	0.70 ± 0.004b
	K ₂ HAsO ₄	2.6 ± 0.02b	0.66 ± 0.004c
12	Na ₂ HAsO ₄ ·7H ₂ O	3.8 ± 0.03a	0.65 ± 0.004c
	Ca ₃ (AsO ₄) ₂	2.8 ± 0.02c	0.67 ± 0.004b
	NaAsO ₂	3.6 ± 0.02a	0.69 ± 0.002b
	K ₂ HAsO ₄	3.5 ± 0.02b	0.53 ± 0.002d
Cultivation period (CP)		***	***
Types of arsenic (TA)		***	***
CP × TA		***	***

^zValues are mean ± SE (n = 9).

^yMean values followed by different letters within a column are significantly different according to Tukey's multiple range test at *P* = 0.05 level.

^{ns}, *, *** nonsignificant or significant at *P* < 0.05 or 0.001, respectively.

특히, 비소의 오염이 가장 심각한 것으로 알려진 Na₂HAsO₄·7H₂O와 NaAsO₂로 오염된 토양에서 4주의 단기간 재배만으로도 봉의꼬리의 지상부에 각 2,289.5, 2,261.4 mg·kg⁻¹ DW의 매우 많은 비소를 축적하였다. 또한, 재배기간이 경과함에 따라 비소 축적량이 증가하여 12주차에는 각 2,956.0, 2,841.1 mg·kg⁻¹ DW의 비소 축적능을 나타냈다. 그리고 K₂HAsO₄ 처리구에서도 12주차에 지상부의 비소 축적능이 2,752.4 mg·kg⁻¹ DW로 매우 높았으며, 지하부 비소 축적능은 2,470.2 mg·kg⁻¹ DW로 모든 처리구 중에서 가장 우수하였다.

식물은 근권부를 이용하여 중금속을 체내로 흡수한다. 지하부에서 흡수한 중금속이 지상부로 이동하지 않고 지하부에 남아있는 경우에는 차단종으로 분류하고, 지상부로 전이가 빠른 종을 축적종으로 분류하는데 이를 이동계수(TR)로 나타낸다. 식물의 중금속 이동계수는 종의 유전적 특성뿐만 아니라 환경 조건에 따라서도 달라지며, 축적종은 지상부의 축적량이 식물의 총 중금속 축적량의 50% 이상이고, 차단종은 50% 미만으로 알려져 있다(Baker 1981, Jeong, 2011).

봉의꼬리는 본 연구에 사용한 모든 비소의 종류에서 0.5 이상의 이동계수를 보여, 종류에 관계없이 흡수한 비소의 지상부로의 전이가 매우 높았다(Table 7). K₂HAsO₄ 처리구의 봉의꼬리는 재배 8주차에 0.66의 매우 우수한 이동계수를 보였으나, 12

주차에 지하부의 축적능이 2,470.2 mg·kg⁻¹ DW로 크게 증가하여 이동계수가 0.53으로 다소 감소하는 경향을 보였다. 그럼에도 불구하고 흡수한 비소의 50% 이상을 지상부에 축적하였다.

생물축적계수(BF)는 토양의 오염 정도에 대한 식물 지상부의 축적능으로 1 이상일 때 식물정화기법의 소재로 활용 가치가 높다고 알려져 있다(Watanabe, 1997). 봉의꼬리는 비소의 종류에 관계없이 BF가 1 이상으로 매우 높았으며, 12주차에는 2.8~3.8로 토양의 오염 정도에 비해 매우 높은 비소 축적능을 보였다(Table 7).

따라서, 봉의꼬리는 비소의 종류에 관계없이 비소 축적능이 1,000 mg·kg⁻¹ DW 이상으로 매우 우수하며, 흡수한 비소의 지상부로의 전이가 매우 빠르고, BF 또한 1 이상으로 나타나 Watanabe (1997)가 정의하는 비소 고축적 식물로 판단된다.

토양의 비소 변화량

대표적인 As(III)인 Na₂HAsO₄·7H₂O와 Ca₃(AsO₄)₂, As(V)인 NaAsO₂와 K₂HAsO₄를 500 mg·kg⁻¹의 농도로 오염시킨 토양에 봉의꼬리를 식재하여 4주 간격으로 토양의 비소 변화량을 분석하였다.

봉의꼬리를 4주 동안 재배한 토양 내의 비소 변화량은 비소의 종류에 따라 다르게 조사되었다(Table 8). 식물의 뿌리에서 방

Table 8. Effect of arsenic types on arsenic content changes of soil used for cultivation of *Pteris multifida*

Cultivation period (weeks)	Types of arsenic	Changing amount of arsenic contents in soil (mg·kg ⁻¹ DW)
4	Non-treatment	-12.4 ± 1.44 ^z c ^y
	Na ₂ HAsO ₄ ·7H ₂ O	-174.7 ± 5.58a
	Ca ₃ (AsO ₄) ₂	-2.6 ± 6.69b
	NaAsO ₂	-180.8 ± 9.07a
	K ₂ HAsO ₄	-100.5 ± 9.05b
8	Non-treatment	-6.8 ± 1.92c
	Na ₂ HAsO ₄ ·7H ₂ O	-153.0 ± 4.28a
	Ca ₃ (AsO ₄) ₂	-29.0 ± 7.09c
	NaAsO ₂	-92.9 ± 20.07b
	K ₂ HAsO ₄	-38.4 ± 6.46c
12	Non-treatment	-7.5 ± 0.95b
	Na ₂ HAsO ₄ ·7H ₂ O	-105.2 ± 8.21a
	Ca ₃ (AsO ₄) ₂	-15.4 ± 5.11b
	NaAsO ₂	-52.3 ± 6.64ab
	K ₂ HAsO ₄	-37.4 ± 5.17b
Cultivation period (CP)		***
Types of arsenic (TA)		***
CP × TA		***

^zValues are mean ± SE (n = 9).

^yMean values followed by different letters within a column are significantly different according to Tukey's multiple range test at *P* = 0.05 level.

^{ns}, *, ***nonsignificant or significant at *P* < 0.05 or 0.001, respectively.

출되는 유기, 무기 화합물에 의하여 근권부의 환경 및 미생물이 크게 영향을 받으며, 이 때 토양의 양분이나 기타 물질들이 전환되어 식물에 대한 유효도에 영향을 미치게 된다(Suh, 2003). 따라서 비소의 종류에 따라 식물에 대한 유효도가 다르게 적용되어, 봉의꼬리에 의해 제거되는 비소의 함량이 다르게 나타난 것으로 생각된다. 특히 식물은 토양과 물로부터 금속과 유기화합물을 흡수하는데, 이 때 유기화합물은 적절한 수용성을 가져야 하는 것으로 알려져 있다(Suh, 2003). 본 연구에서 비소의 제거량이 가장 적었던 Ca₃(AsO₄)₂ 처리구는 물에 녹지 않고, 염산에 녹는 성질을 가지고 있어 다른 비소 처리구에 비해 비소 변화량이 다소 저조한 것으로 분석된다.

반면, 대표적인 As(III)인 Na₂HAsO₄·7H₂O 처리구는 0~4주에 174.7 mg, 4~8주에 153.0 mg, 8~12주에 105.2 mg의 가장 많은 비소가 제거된 것으로 분석되어, Na₂HAsO₄·7H₂O에 대한 봉

의꼬리의 비소 제거능이 매우 탁월한 것으로 생각된다. 일반적으로 As(III)가 As(V)에 비해 독성이 높은 화학종으로 토양 중 용해도가 높고, 이동성이 큰 것으로 알려져 있다(WHO, 1981; Deuel and Swoboda, 1972). 따라서 중독현상 및 발암물질로 위험한 As(III)인 Na₂HAsO₄·7H₂O에 대한 봉의꼬리의 우수한 비소 축적능 및 토양 제거능은 식물정화기법의 소재로서 활용도가 매우 높을 것으로 기대된다.

또한 NaAsO₂와 K₂HAsO₄ 처리구에서도 0~4주에 각 180.8, 100.5 mg, 4~8주에 92.9, 38.4 mg, 8~12주에 52.3, 37.4 mg이 감소하여, 봉의꼬리를 이용한 토양정화 효과가 매우 높은 것으로 확인되었다.

오염된 토양의 토착 박테리아를 이용하여 카드뮴, 납, 아연, 비소 등의 중금속을 침전시켜 고정화 시키는 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Song *et al.*, 2007). 비소의 경우 황산염과 탄소원의 주입을 통해 토착 미생물을 활성화시켜 비소의 생물권 내 유입을 방지할 수 있으며, 황산염이 결핍된 상태에서 탄소원을 주입하여 미생물을 활성화하면 오히려 토양 내 비소의 이동성이 증가하는 것으로 알려져 있다(Song *et al.*, 2007). 따라서 향후 토양의 미생물 활성화를 통해 봉의꼬리의 비소 축적능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대되는 다양한 황산염과 탄소원의 적용 연구가 필요할 것으로 판단된다.

적 요

비소의 종류에 따른 봉의꼬리의 생육 반응 및 비소 축적능을 분석하기 위해 sodium arsenate, calcium arsenate, sodium arsenite 및 potassium arsenite 등의 4종류를 선정하여 500 mg·kg⁻¹의 농도로 토양에 처리하여 봉의꼬리를 12주간 재배하였다. 그 결과, calcium arsenate 처리구의 봉의꼬리 생육은 다소 감소하였으나, 나머지 비소 처리구에서는 무처리구에서 재배한 생육과 비슷하였다. Sodium arsenate 처리구의 봉의꼬리 지상부는 4주의 단기간 재배만으로 2,289.5 mg·kg⁻¹DW의 높은 비소 축적능을 보였으며, 12주에는 비소 축적능이 2,956.0 mg·kg⁻¹DW로 더욱 증가하였다. 반면, 지하부는 potassium arsenite 처리구에서 2,470.2 mg·kg⁻¹ DW로 가장 높았으며, calcium arsenate 처리구는 1,060.7 mg·kg⁻¹DW의 비소를 축적하였다. 봉의꼬리 지상부의 비소 축적능은 비소의 종류에 관계없이 1,000 mg·kg⁻¹DW 이상으로 매우 우수하였다. 그리고 토양의 비소 제거량도 높았다. 따라서 봉의꼬리는 다양한 비소 오염 지역의 식물상 정화기법 소재로 활용이 가능할 것으로 생각된다.

사 사

이 논문은 2012년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 수행된 연구결과로 이에 감사드립니다.

References

- Alloway, B.J. 1995. Heavy metals in soils. Blackie Academic and Professional, London, UK. p. 354.
- Baker, A.J.M. 1981. Accumulators and excluders- strategies in the response of plants to heavy metals. *J. Plant Nutr.* 3:643-654.
- Baker, A.J.M. and P.R. Brooks. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic element-a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery* 1:81-126.
- Boffetta, P. 1993. Carcinogenicity of trace elements with reference to evaluations made by the international agency for research on cancer. *Scand. J. Work Environ. Health* 19:67-70.
- Cao, X., L.Q. Ma and C. Tu. 2004. Antioxidative responses to arsenic in the arsenic-hyperaccumulator Chinese brake fern (*Pteris vittata* L.). *Environ. Poll.* 128:317-325.
- Choi, M.K. and M.H. Chiang. 2003. Physiological and biochemical responses, and heavy metal accumulation of *Artemisia princeps* and *Helianthus annuus* in the abandoned zinc mine area for phytoremediation. *Korean J. Hort. Sci. Technol.* 21:451-456 (in Korean).
- Choi, M.K., Y.H. Cho, S.G. Lee and M.H. Caiang. 2002. Ameliorating effects of soil conditioners on heavy metal-contaminated soils in abandoned zinc mine area. *J. Korean Soc. People Plants Environ.* 5:25-27 (in Korean).
- Cullen, W.R. and K.J. Reimer. 1989. Arsenic speciation in the environment. *Chem. Rev.* 89:713-764.
- Deuel, L.E. and A.R. Swoboda. 1972. Arsenic solubility in a reduced environment. *Soil Sci. Soc. American Proc.* 36:276-278.
- Du, W.B., Z.A. Li, B. Zou and S.L. Peng. 2005. *Pteris multifida* Poir., a new arsenic hyperaccumulator: characteristics and potential. *Int. J. Environ. Pollut.* 23:388-396.
- Enterline, P.E. and G.M. Marsh. 1982. Cancer among workers exposed to arsenic and other substances in a copper smelter. *American J. Epidemiol.* 116:895-911.
- Jarup, L. and G. Pershagen. 1991. Arsenic exposure, smoking, and lung cancer in smelter workers—a case-control study. *American J. Epidemiol.* 134:545-551.
- Jeon, B.D. and J.S. Choi. 2006. Effect of elevated cadmium concentration in nutrient solution on growth and cadmium accumulation of young pear tree. *Korean J. Hort. Sci. Technol.* 24:364-369 (in Korean).
- Jeong, S.A. 2011. Effect of mixed planting ratio of plants on phytoremediation of heavy metals in soil. M.S. Thesis, Chungbuk Nat. Univ., Korea. (in Korean).
- Ju, Y.K. 2011. Selection of plants for phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. M.S. Thesis, Chungbuk Nat. Univ., Korea. (in Korean).
- Kim, D.Y. and J.G. Kim. 2004. Arsenic in soil environments and in-situ remediation techniques of arsenic-contaminated soils. *Life Sci. Nat. Res. Res.* 12:103-118 (in Korean).
- Kim, J.G., S.K. Lim, S.H. Lee, Y.M. Yoon, C.H. Lee and C.Y. Jeong. 1999. Evaluation of heavy metal pollution and plant survey around inactive and abandoned mining areas for phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Korean J. Environ. Agric.* 18:28-34 (in Korean).
- Kim, S.H. 2002. Effects of manure compost and sulfur treatment on heavy metal uptake of *Artemisia princeps* var. *orientalis* in mining area soil. M.S. Thesis, Korea Univ., Korea (in Korean).
- Kwon, H.J., J.S. Cho and C.H. Lee. 2013. Effect of shading treatment on arsenic phytoremediation using *Pteris multifida* in paddy soil. *Korean J. Plant Res.* 26:68-74 (in Korean).
- Kwon, H.J., J.S. Cho and C.H. Lee. 2014. Effect of sulfur powder and citric acid on arsenic phytoremediation using *Pteris multifida* in forest soil. *J. Korean Env. Res. Tech.* 17:1-12 (in Korean).
- Lasat, M.M. 2002. Phytoremediation of toxic metals: a review of biological mechanisms. *J. Environ. Qual.* 31: 109-120.
- Nriagu, R.D. 1980. Cadmium in the environment. Part 1. *Ecological Cycling.* p. 639-648.
- Oh, W.K. 2006. A feasibility study on *Pteris multifida* Poir. for the phytoremediation of arsenic contaminated mine soil. M.S. Thesis, Seoul Univ., Korea.
- Park, E.H., Y. Choi, S.G. Lee and M.H. Chiang. 2003. Effect of soil conditioners for contaminated soil of abandoned zinc mine area on growth of *Chrysanthemum zawadskii* and *Caryopteris incana* (Thunb.) Miq. *J. Bio-Environ. Control* 12:245-251 (in Korean).
- Park, Y.H. 1994. Management of wastes from inactive or

- abandoned mines. Korean Environ. Inst (in Korean).
- Ronald, D.H. and P.H. William. 1982. Effects of parental arsenite exposure in the hamster. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 29:671-671.
- Smedley, P.L. and D.G. Kinniburgh. 2002. A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural water. Appl. Geochem. 17:517-568.
- Song, D.S., J.U. Lee, I.W. Ko, and K.W. Kim. 2007. Study on geochemical behavior of heavy metals by indigenous bacteria in contaminated soil and sediment. Econ. Environ. Geol. 40:575-585 (in Korean).
- Suh, H.M. 2003. Bioremediation of petroleum hydrocarbons contaminated soil using phytoremediation. M.S. Thesis, Yonsei Univ., Korea (in Korean).
- Tokudome, S. and M. Kuratsune. 1976. A cohort study on mortality from cancer and other causes among workers at a metal refinery. Int. J. Cancer 17:310-317.
- USEPA. 2001. Drinking water standards for arsenic. EPA 815-F-00-015.
- Wang, H.B., M.H. Wong, C.Y. Lan, A.J.M. Baker, Y.R. Qin, W.S. Shu, G.Z. Chen and Z.H. Ye. 2007. Uptake and accumulation of arsenic by 11 *Pteris* taxa from Southern China. Environ. Pollut. 145:225-233.
- Wang, H.B., Z.H. Ye, W.S. Shu, W.C. Li, M.H. Wong and C.Y. Lan. 2006. Arsenic uptake and accumulation in fern species growing at arsenic-contaminated sites of Southern China: field surveys. Int. J. Phytoremediation 8:1-11.
- Watanabe, M.E. 1997. Phytoremediation on the brink of commercialization. Environ. Sci. Technol. 31:182-186.
- Wei, C.Y., C. Wang, X. Sun and W.Y. Wang. 2007. Arsenic accumulation by ferns: a field survey in Southern China. Environ. Geochem. Health 29:169-177.
- Wilkins, D.A. 1978. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth. New Phytol. 80:623-633.
- World Health Organization (WHO). 1981. Environmental health criteria substances on the adsorption of As (V) on geologic materials. Water Air Soil Pollut. 40:293-305.
- Yang, Y.J. and B.Y. Lee. 1990. Effect of heavy metal treatments on the growth and uptake in hydroponically cultured lettuce. J. Korean Soc. Hort. Sci. 31:37-41 (in Korean).
- 김경웅, 김순오, 이종운, 김주용, 이상우, 이진수, 고일원, 고은정, 신경희, 강소영, 박현성. 2006. 토양오염복원기술. 신평문화사.
- 환경부. 2012. 토양오염공정시험기준.

(Received 28 March 2014 ; Revised 28 July 2014 ; Accepted 6 August 2014)