

중금속 오염토양 정화에 영향을 미치는 봉의꼬리(*Pteris multifida* Poir.)와 쑥(*Artemisia princeps* Pamp.)의 혼합식재 비율

권혁준¹, 정선아², 신소림¹, 이철희^{2*}

¹국립생물자원관, ²충북대학교 축산·원예·식품공학부 원예학전공

Effect of Mixed Planting Ratios of *Pteris multifida* Poir. and *Artemisia princeps* Pamp. on Phytoremediation of Heavy Metals Contaminated Soil

Hyuk Joon Kwon¹, Seon A Jeong², So Lim Shin¹ and Cheol Hee Lee^{2*}

¹National Institute of Biological Resources, Incheon 22689, Korea

²Division of Animal, Horticultural and Food Science Horticulture Graduate School, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

Abstract - This study was performed to develop the efficient phytoremediation model in the paddy soil contaminated with heavy metals by cultivating *Pteris multifida* and *Artemisia princeps* with different mixing ratios (1:0, 8:1, 6:1, 4:1). As a result of investigating the heavy metal accumulation of each plant per dried material (1 kg), content of arsenic and cadmium was the highest in aerial part of *P. multifida* (169.82, 1.70 mg·kg⁻¹ DW, each) among the treated group. Lead content was the highest (12.58 mg·kg⁻¹ DW) in the aerial part of *P. multifida* cultivated with 8:1 mixed planting. But the content of copper and zinc was the highest (33.94, 61.78 mg·kg⁻¹ DW, each) in the aerial part of *A. princeps* with 8:1 treatment. Regardless of heavy metals, plant uptake from the 1 m² soil was the highest in 4:1 mixed planting group, which showed the best yield of *A. princeps*.

Key words - Arsenic, Hyperaccumulator, Fern, Pteridophyta, Smeter

서 언

산업화가 진행됨에 따라 인간의 생활환경에 다양한 유해 중금속에 노출되고 있으며, 폐금속광산, 제련소, 공장 등의 주변 지역 토양의 중금속 오염정도가 심각한 수준으로 알려져 있다 (Yeo and Kim, 1997; Jung *et al.*, 2001). 중금속 오염에 노출된 농작물이나 어패류 등은 최종적으로 이를 섭취한 인간에게 중금속 축적을 야기해 다양한 부작용을 유발하고 있다(Jung *et al.*, 1993). 국내에도 산업화에 따른 폐금속광산, 제련소 등 토양 중금속 오염사례와 피해가 발생되고 있어 중금속 오염정화는 점차 현안으로 대두될 것으로 생각된다. 따라서 중금속 오염정화

에 대한 복합적이고 포괄적인 연구가 수행되어야한다. 이러한 중금속으로 오염된 토양의 정화방법에는 생물학적, 물리화학적, 열처리 방법 등이 있으며(Marks *et al.*, 1994), 생물학적 처리기술인 식물정화기술(phytoremediation)은 식물을 이용하여 토양 내 중금속을 정화하는 친환경적인 기술로서 물리·화학적 처리기술 보다 경제적이고 친환경이라고 알려져 있다(Kim *et al.*, 1999; Kim and Lee, 1999; KrishnaRaj *et al.*, 2000; Kumino *et al.*, 2001). 그러나 우리나라의 식물정화기술에 대한 연구는 대부분 단일 오염물질에 대한 제한적이고 실험실 규모의 연구나 중금속 오염지에 자생하는 식물 탐색에 대한 연구가 주를 이루고 있어 관련 연구가 시급한 실정이다.

봉의꼬리(*Pteris multifida* Poir.)는 국내에 자생하는 상록성 양치식물로 발암물질로 알려진 비소에 대한 축적능이 매우 우수하고(Du *et al.*, 2005; Ju, 2011; Wang *et al.*, 2006, 2007;

*교신저자: leech@chungbuk.ac.kr
Tel. +82-43-261-2525

Wei *et al.*, 2007), 다양한 비소 오염원과 농도에서 식물상 정화 기법 소재로 활용이 가능한 종으로 알려진 자생식물이다(Han *et al.*, 2014; Kwon *et al.*, 2015). 또한 중금속 토양오염이 심각한 곳으로 알려진 J 제련소 인근의 중금속 오염토양 정화 연구에서 봉의꼬리는 비소를 비롯한 다양한 중금속 축적능이 우수하고 생육이 양호하여 현장적용이 가능한 식물정화 소재로 보고된 바 있다(Kwon *et al.*, 2014b). 쑥(*Artemisia princeps* Pamp.)은 번식력이 강한 국화과의 다년생 초본으로 초장이 60~120 cm 정도이고, 뿌리줄기가 옆으로 뻗으면서 근생하여 토양의 배수성과 통기성을 향상시킨다(Lee, 1975). 또한, 카드뮴 및 아연 등의 중금속 축적능이 우수하며(Kim *et al.*, 1999), Co, Sc, Mo, Pb, Cu 등의 축적도 가능한 것으로 보고되었다(Song *et al.*, 2005). 봉의꼬리는 일반적으로 35~75%의 차광조건에서 생육이 우수하며(Suh *et al.*, 2006a), 비소 축적능도 증가하는 것으로 알려져 있어(Kwon *et al.*, 2013) 차광 효과를 제공할 수 있는 자생식물과 혼합식재 할 경우 효과적인 토양 정화가 가능할 것으로 생각되었다.

이에, 본 연구는 중금속 축적능이 우수한 것으로 알려진 봉의꼬리와 쑥의 혼합비율에 따른 생육 특성 및 중금속 축적능을 분석하여 토양 정화에 효과적인 식재 방법을 구명하고자 수행하였다. 이를 통해 토양의 중금속 정화가 시급한 곳으로 알려진 J 제련소 인근 농토양의 효과적인 중금속 정화를 위한 식물상 정화기법 모델을 개발하고자 한다.

재료 및 방법

연구에 사용한 식물재료는 충북 청주시 충북대학교 내의 무가온 비닐하우스에서 1년 동안 육묘한 봉의꼬리와 쑥을 사용하였다(Table 1). 실험은 충남 서천군 소재의 J 제련소 인근의 중금속 오염지역에서 실시하였으며, 실험부지의 토양은 다양한 중금속으로 복합오염된 토양으로 특히 비소 오염정도가 45.79 mg · kg⁻¹DW 수준으로 토양환경보전법 1지역의 토양오염 우려수준(warning level)을 초과하여 토양정화가 시급한 곳이었다(Table 2).

Table 1. Growth state of plants used for this study

Scientific name	Plant		No. of leaves / plant	Leaf		Root length (cm)	Fresh wt. (g)		Dry wt. (g)	
	height (cm)	width (cm)		height (cm)	width (cm)		Az	U	A	U
<i>P. multifida</i>	6.3±0.9	6.6±1.6	5.8±1.5	3.8±0.6	3.9±1.4	2.9±0.8	0.3±0.1	0.1±0.0	0.1±0.0	0.1±0.0
<i>A. princeps</i>	24.0±2.6	11.8±2.2	10.6±2.0	9.1±1.5	14.3±4.5	4.6±0.6	2.3±0.7	0.8±0.5	0.4±0.1	0.1±0.1

²A: aerial part, U: underground part.

Table 2. Heavy metal contents of soil near the smelter in 2009

Site	Heavy metals contents (mg·kg ⁻¹)				
	As	Cd	Cu	Pb	Zn
Warning level ²	25	4	150	200	300
Countermeasure level	75	12	450	600	900
Experimental site	45.79	0.28	13.21	32.46	75.18

²Soil environment conservation law (A: Paddy and upland field, orchard and livestock farm *et al.*).

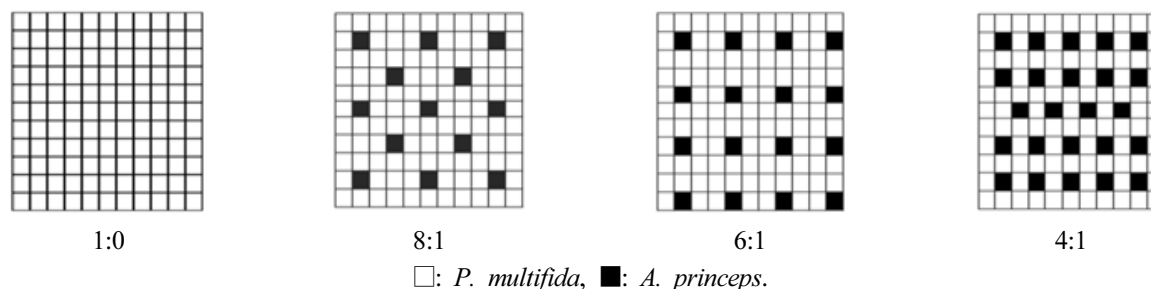


Fig. 1. Experimental design for experiment of mixed planting ratios.

각 시험구의 크기를 2×2 m로 조성한 다음 식재 간격을 20×20 cm로 하여 4월 말에 봉의꼬리와 쑥의 혼합식재 비율을 1:0 (121:0주), 8:1 (108:13주), 6:1 (104:17주), 4:1 (97:24주)로 식재하여 24주 동안 재배하였다(Fig. 1). 모든 처리구는 완전임의배치 3반복으로 수행하였으며, 초기 2주 동안은 식물의 활착을 돕기 위하여 분수호스를 이용해 20분씩 관수하였다.

혼합식재 비율에 따른 봉의꼬리와 쑥의 생육은 처리구당 10주씩 3반복으로 조사하였으며, 식물체의 중금속 함량분석은 3반복을 1회로 3회 반복으로 수행한 다음 평균과 표준오차를 구하였으며, 던컨의 다중검정방법(Duncan's multiple range test)으로 $p < 0.05$ 의 수준에서 유의성 검정을 실시하였다(SAS version 9.2, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

식물의 중금속 함량은 습식분해법으로 전처리하여 분석하였다(Kor. Ministry Environ., 2009). 식물을 지상부와 지하부로 나누어 60°C의 건조기(Hanbaek Scientific Co., Korea)에서 72시간 건조하여 분쇄하였다. 분쇄한 식물시료 0.5 g을 분해용 삼각플라스크에 넣고 H₂SO₄ 1 ml와 50% HClO₄ 9 ml를 첨가한 다음 열판에 놓고 310~410°C에서 분해시켰다. 분해가 끝나면 냉각시켜 여과지(No. 6, Watman)를 사용하여 불순물을 제거하였다.

전처리한 식물의 시료는 유도결합플라즈마분광도계(Perkin Elmer Optima 5300DV ICP-AES, Perkin Elmer)를 이용하여 유도결합플라즈마-원자발광분광법으로 비소(As), 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 납(Pb), 아연(Zn)의 함량을 측정하였다(Kor. Ministry Environ., 2009). 또한 식물이 흡수한 중금속이 지하부에서 지상부로 이동되는 이동계수(Translocation rate, TR)를 아래의

식을 이용하여 구하였다(Kwon *et al.*, 2013).

$$\text{Translocation rate (TR)} = \frac{A}{A+B}$$

A: 지상부의 중금속 함량(mg · kg⁻¹ DW),

B: 지하부의 중금속 함량(mg · kg⁻¹ DW)

결과 및 고찰

생육 반응

봉의꼬리와 쑥의 혼합 식재 비율을 달리하여 중금속으로 오염된 토양에서 24주 동안 재배한 식물의 생육은 Table 3과 같다. 본 연구에 사용한 봉의꼬리의 생육은 중금속의 오염정도가 유사하고, 생육기간이 동일하였던 수림지에서 재배한 봉의꼬리의 생육에 비해 다소 불량한 경향을 보였는데(Ju, 2011), 이는 본 연구지의 논토양은 점질토로 배수성과 통기성이 우수한 토양에서 생육이 우수한 봉의꼬리(Suh *et al.*, 2006)의 생육에 악영향을 준 것으로 판단되었다. 반면, 쑥은 논토양에서도 생육이 우수하였다. 봉의꼬리의 생육은 6:1 처리구에서 다른 처리구에 비해 전반적인 생육이 가장 우수하였다. 봉의꼬리는 35~75% 차광에서 생육이 우수한 중생식물(Suh *et al.*, 2006a)로 봉의꼬리에 비해 초장이 큰 쑥이 차광 환경을 제공하여 봉의꼬리의 생육을 증가시킨 것으로 생각되었다.

그러나 쑥의 식재비율이 가장 높았던 4:1 처리구에서는 봉의꼬리의 생육은 오히려 감소하는 경향을 보였다. 4:1 처리구에서

Table 3. Effect of mixed planting ratio on growth of *Pteris multifida* and *Artemisia princeps* cultivated in soil for 24 weeks

Scientific name	Mixed ratio ²	Plant		No. of leaves / plant	Leaf		Root length (cm)	Fresh wt. (g)		Dry wt. (g)	
		height (cm)	width (cm)		length (cm)	width (cm)		Ay	U	A	U
<i>P. multifida</i>	1:0	6.5c ^x	9.8c	10.3a	9.8b	4.8b	7.5a	0.7b	0.4a	0.6a	0.2ab
	8:1	9.6b	13.2a	7.0b	12.9a	5.8a	7.6a	0.9a	0.2b	0.5a	0.1b
	6:1	11.9a	11.7b	10.0a	13.6a	5.3ab	7.4a	0.7b	0.3ab	0.3b	0.1ab
	4:1	6.5c	10.1c	10.5a	8.1c	3.4c	5.6b	0.7b	0.4a	0.3b	0.2a
<i>A. princeps</i>	1:0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8:1	78.9b	51.6b	18.9c	5.0c	2.2b	22.6b	154.3b	32.1b	47.0b	13.2b
	6:1	87.5a	54.1b	21.4b	6.0b	2.0b	21.3b	164.7a	35.9b	52.6a b	18.1a
	4:1	90.2a	57.0a	25.0a	8.8a	4.8a	32.3a	161.7a	46.9a	60.5a	18.7a

²*P. multifida* : *A. princeps* = 1:0 (121:0), 8:1 (108:13), 6:1 (104:17), 4:1 (97:24).

³A: aerial part, U: underground part.

^xMean separation within columns by Duncan's multiple range test, $p < 0.05$.

봉의꼬리의 초장, 초폭, 엽수 등은 쑥을 식재하지 않은 무처리구와 비슷하였으나, 뿌리 생육은 무처리구에 비해 약 24.3% 감소하였다. 이는 쑥의 식재비율이 높았던 4:1 처리구에서 쑥의 지하부 생육이 다른 처리구에 비해 약 30% 증가하였기 때문으로 판단되며, 뿌리줄기를 옆으로 길게 뻗어 군생하는 쑥의 생육 특성(Lee, 1975)이 두드러지게 나타나 봉의꼬리의 지하부 생육을 억제한 것으로 판단되었다.

중금속 축적

봉의꼬리의 중금속 축적능은 봉의꼬리 단일 식재구에서 지상부의 비소 축적능이 169.82 mg · kg⁻¹ DW로 가장 높았다(Table 4). 봉의꼬리의 카드뮴과 아연 축적능은 식재 비율에 따른 유의적인 차이가 없었으며, 납과 구리 축적능은 8:1 처리구에서 각 12.58, 5.34 mg · kg⁻¹ DW로 다른 혼합 식재비율 처리구에 비해 우수하였다.

쑥의 카드뮴(1.08~1.29 mg · kg⁻¹ DW)과 구리 축적능(7.63~10.51 mg · kg⁻¹ DW)은 봉의꼬리와 비슷한 수준이었으나, 구리, 아연의 축적능은 봉의꼬리에 비해 쑥의 축적능이 우수하였다. 쑥은 토양에 오염된 Cd, Zn, Pb, Cu 등의 다양한 중금속을 흡수하여 토양정화 소재로 활용가치가 높다고 보고되었는데(Kim *et al.*, 1999; Song *et al.*, 2005), 본 연구에서도 쑥은 구리, 아연 등 다양한 중금속의 축적능이 확인되었다.

봉의꼬리와 쑥의 중금속 이동계수(TR)는 95%의 유의수준에서 혼합식재 비율에 따라 큰 차이가 없었다(Table 5). 식물정화 기법 소재로 활용하기 위해서는 이동계수가 0.5 이상으로 지하부에 비해 지상부의 중금속 축적능이 우수해야하는 것으로 알

려져 있다(Oh, 2006; Ju, 2011). 본 연구의 봉의꼬리는 비소에 대한 이동계수가 0.74~0.88로 매우 높았으며, 쑥은 아연에 대한 이동계수가 0.68~0.73으로 우수하였다. 일반적으로 식물로 흡수된 카드뮴과 아연은 지상부로 전이가 용이하며, 납과 구리는 지하부의 축적능이 높은 것으로 알려져 있다(Brown *et al.*, 1994; Muller *et al.*, 2000). 본 연구에서도 같은 경향으로 흡수된 카드뮴과 아연은 지상부로의 전이가 우수하였다.

일반적으로 지상부의 건물중 당 카드뮴은 100 mg · kg⁻¹, 비소, 구리, 납은 1,000 mg · kg⁻¹, 아연은 10,000 mg · kg⁻¹ 이상일 때 고축적종으로 분류한다(Baker and Brooks, 1989; Watanabe, 1997). 다수의 연구에서 봉의꼬리의 비소 축적능은 1,000 mg · kg⁻¹ DW이상으로 보고되어 있었으나(Du *et al.*, 2005; Ju, 2011; Wang *et al.*, 2006, 2007; Wei *et al.*, 2007; Han *et al.*, 2014; Kwon *et al.*, 2014b) 본 연구에서는 봉의꼬리의 비소 축적능이 169.82~102.99 mg · kg⁻¹ DW로 다소 낮았으며, 쑥 또한 카드뮴(18.00~26.85 mg · kg⁻¹ DW)과 아연(1,192~2,853 mg · kg⁻¹ DW)의 축적량이 많은 것으로 보고되어 있으나(Kim *et al.*, 1999), 본 연구에서는 이보다 낮은 양이 축적되었다. 토양의 중금속 오염농도와 오염원, 기상 등의 환경조건에 의해 식물의 중금속 축적 정도가 상이한 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 1999; Jung *et al.*, 1993; Jung *et al.*, 2002). 또한 토양의 중금속 오염농도가 낮으면 식물의 중금속 축적능도 낮아지며(Cui *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2005), 비소, 카드뮴, 납, 아연은 토양의 중금속 농도와 식물체의 축적능이 비례적으로 증가하는 것으로 알려져 있다(Jeong *et al.*, 2010; Kwon *et al.*, 2015). 본 연구지역은 다양한 중금속으로 복합 오염토이나 비소를 제외한

Table 4. Effect of mixed planting ratio on heavy metals concentration of *Pteris multifida* and *Artemisia princeps* cultivated in soil for 24 weeks

Scientific name	Mixed ratio ^z	Heavy metals concentration (mg · kg ⁻¹ DW)									
		As		Cd		Pb		Cu		Zn	
		Ay	U	A	U	A	U	A	U	A	U
<i>P. multifida</i>	1:0	169.82a ^x	20.30b	1.70a	1.09a	7.19b	24.77b	2.38b	72.77b	29.58a	36.37b
	8:1	128.61b	31.05a	1.52a	1.18a	12.58a	32.22a	5.34a	113.27a	40.31a	58.29a
	6:1	102.99b	35.75a	1.11a	1.58a	8.69b	30.41a	3.08b	92.76a	29.04a	45.88ab
	4:1	130.65b	29.05a	1.53a	0.96a	7.24b	21.01b	3.27b	97.46a	30.94a	45.93ab
<i>A. princeps</i>	1:0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8:1	4.97a	7.44b	1.29a	0.94a	10.51a	29.72a	33.94a	52.05a	61.78a	23.52a
	6:1	5.28a	9.62b	1.08a	1.71a	10.51a	17.73b	29.43a	49.72a	53.64ab	19.50a
	4:1	5.36a	13.99a	1.17a	1.61a	7.63a	22.46ab	30.36a	53.38a	45.70b	20.50a

^z*P. multifida* : *A. princeps* = 1:0 (121:0), 8:1 (108:13), 6:1 (104:17), 4:1 (97:24).

^yA: aerial part, U: underground part.

^xMean separation within columns by Duncan's multiple range test, *p* < 0.05.

기타 중금속 오염정도가 다소 낮아 기존에 보고된 쑥의 중금속 흡수능이 다소 낮게 나타난 것으로 판단되었다. 또한 연구지는 점질토양으로 배수성과 통기성이 낮아 생육이 다소 억제되었기 때문에 분석되었다.

동일 면적(1 m²)에서 혼합식재 비율에 따른 쑥과 봉의꼬리 건물중 생산량과 중금속 축적능을 분석하여 흡수한 면적당 식물의 중금속 흡수량을 분석한 결과, 비소는 봉의꼬리 단일식재 처리구(1:0)에서 2.91 mg · m²로 가장 많았으며, 카드뮴, 납, 구리, 아연 흡수량은 4:1 처리구에서 가장 우수한 경향을 보였다 (Table 6).

연구결과, 봉의꼬리의 비소 축적능을 높이기 위한 식재는 봉의꼬리 단일 식재로 분석되었다. 그러나 봉의꼬리의 생육 및 비소 축적능 향상을 위해서는 차광 시설물 설치 및 관리를 위한 추가적인 인작물적 자원이 필요하다(Kwon *et al.*, 2013). 또한 쑥은 비소 축적능이 저조하여 비소 오염토양 정화효율이 낮고, 쑥을 식재비율을 높일 경우 봉의꼬리의 생육을 감소시켜 비소 흡수량이 저하될 수 있을 것으로 생각되었다. 그리고 중금속 토양 정화가 필요한 지역은 대부분 다양한 중금속으로 복합 오염된 지역으로 알려져 있어(Yeo and Kim, 1997; Jung *et al.*, 2001) 봉의꼬리와 쑥을 혼합식재하였을 때 토양 정화효율을 향상시킬

Table 5. Effect of mixed planting ratio on translocation rate of *Pteris multifida* and *Artemisia princeps* cultivated in soil for 24 weeks

Scientific name	Mixed ratio ^z	Translocation rate ^y				
		As	Cd	Cu	Pb	Zn
<i>P. multifida</i>	1:0	0.88a ^x	0.59a	0.22a	0.03a	0.45a
	8:1	0.81a	0.60a	0.27a	0.05a	0.41a
	6:1	0.74a	0.45a	0.22a	0.03a	0.40a
	4:1	0.81a	0.60a	0.29a	0.03a	0.42a
<i>A. princeps</i>	1:0	-	-	-	-	-
	8:1	0.43a	0.57a	0.24a	0.39a	0.73a
	6:1	0.37a	0.38a	0.33a	0.43a	0.68a
	4:1	0.28b	0.43a	0.24a	0.39a	0.70a

^z*P. multifida* : *A. princeps* = 1:0 (121:0), 8:1 (108:13), 6:1 (104:17), 4:1 (97:24).

^yTranslocation rate : Ratio of arsenic in aerial parts to underground parts.

^x Mean separation within columns by Duncan's multiple range test, *p* < 0.05.

Table 6. Effect of mixed planting ratio on heavy metals absorption of *Pteris multifida* and *Artemisia princeps* from 1 m² soil for 24 weeks

Scientific name	Mixed ratio ^z	Heavy metals absorption in soil (mg · m ²)									
		As		Cd		Pb		Cu		Zn	
		A ^y	U	A	U	A	U	A	U	A	U
<i>P. multifida</i>	1:0	2.91a ^x	0.10a	0.03a	0.01a	0.12b	0.13a	0.04b	0.37a	0.51a	0.18a
	8:1	1.73b	0.08a	0.02b	0.01a	0.17a	0.08a	0.07a	0.29a	0.54a	0.15a
	6:1	0.75c	0.14a	0.01c	0.01a	0.06c	0.12a	0.02c	0.36a	0.21b	0.18a
	4:1	1.02c	0.13a	0.01c	0.01a	0.06c	0.10a	0.03c	0.44a	0.24b	0.21a
<i>A. princeps</i>	1:0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8:1	0.76c	0.32c	0.20b	0.04c	1.60c	1.28b	4.49c	2.23c	9.43c	1.01c
	6:1	1.12b	0.74b	0.24b	0.13b	2.35b	1.37b	7.59b	3.83b	11.99b	1.50b
	4:1	1.94a	1.57a	0.42a	0.18a	2.77a	2.52a	11.01a	5.99a	16.57a	2.30a
Total	1:0	2.91a	0.10d	0.03c	0.01d	0.12d	0.13d	0.04d	0.37d	0.51d	0.18d
	8:1	2.50ab	0.40c	0.22b	0.04c	1.77c	1.36c	4.56c	2.52c	9.97c	1.16c
	6:1	1.93b	0.88b	0.25b	0.14b	2.41b	1.48b	7.61b	4.19b	12.20b	1.68b
	4:1	2.90a	1.70a	0.43a	0.19a	2.82a	2.62a	11.04a	6.43a	16.81a	2.51a

^z*P. multifida* : *A. princeps* = 1:0 (121:0), 8:1 (108:13), 6:1 (104:17), 4:1 (97:24).

^yA: aerial part, U: underground part.

^xMean separation within columns by Duncan's multiple range test, *p* < 0.05.

수 있을 것으로 생각되었다. 따라서 비소를 비롯한 다양한 중금속으로 오염된 토양을 정화하기 위해서는 봉의꼬리와 쑥의 혼합식재 비율을 4:1로 하였을 때 가장 효과적일 것으로 판단되었다.

본 연구지와 인접하여 기상환경 조건이 동일하고, 토양의 비소 축적량이 유사한 수리지에서 재배한 봉의꼬리 지상부에서 비소 축적능은 $1,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$ 이상이었으며, 단위 면적(1 m^2) 당 흡수한 비소의 함량도 $172.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^2$ 로 매우 높았다(Ju, 2011). 따라서 토양 내 중금속의 축적량과 기상환경 조건 이외에도 식물의 생육에 크게 영향을 미칠 수 있는 토질과 토성 등에 의하여 식물의 중금속 흡수능이 크게 달라지는 것으로 생각되었다. 봉의꼬리는 구연산과 유허분말을 토양에 처리했을 때 식물체 내 비소 축적능이 27.5~62.5% 증가하며, 단위면적당 비소 흡수량도 14.9% 증가시킬 수 있는 것으로 알려져 있다(Kwon *et al.*, 2014a). 쑥은 유허분말과 퇴비(Kim, 2002) 또는 인산과 유기물질(Choi *et al.*, 2002; Choi and Chiang, 2003) 등을 토양에 처리했을 때 생육 및 중금속의 축적능이 향상되는 것으로 보고되어 있다. 따라서 식물의 생육이 원활하지 못한 토양 조건에서는 식물의 생육을 조절할 수 있는 처리를 통하여 식물 내 중금속 축적능을 향상시키는 방법이 개발되어야 할 것으로 생각되었다.

적 요

본 연구는 중금속으로 오염된 논토양에서 봉의꼬리(*P. multifida*)와 쑥(*A. princeps*)의 식재 비율을 1:0, 8:1, 6:1, 4:1로 달리하여 재배함으로써 토양 내 중금속별 효율적인 식물상 정화 모델을 개발하기 위하여 수행되었다. 중금속별 식물 건물중 1 kg 당 축적량을 분석한 결과, 비소와 카드뮴의 경우에는 봉의꼬리 단일 식재구의 봉의꼬리 지상부에서 각 169.82 와 $1.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$ 로 가장 많았다. 납은 8:1 식재구의 봉의꼬리 지상부에서 $12.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$ 로 가장 많았다. 그러나 구리와 아연의 축적량은 8:1 식재구에서 재배한 쑥의 지상부에서 각 33.94 , $61.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$ 로 가장 많았다. 단위 면적당(1 m^2) 토양에서 수확한 식물의 각 중금속별 총 흡수량은 중금속의 종류와 관계없이 쑥의 생산량이 가장 많았던 봉의꼬리와 쑥 4:1 식재구에서 가장 높은 경향을 보였다.

References

Baker, A.J.M. and R.R. Brooks. 1989. Terrestrial higher plants

- which hyperaccumulate metallic elements- a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery* 1:81-126.
- Brown, S.L., R.L. Chaney, J.S. Angle and A.J.M. Baker. 1994. Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescens* and bladder campion for zinc and cadmium contaminated soil. *J. Environ. Qual.* 23:1151-1157.
- 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., M.H. Chiang, Y.H. Cho, S.G. Lee and M.H. Chiang. 2002. Ameliorating effects of soil conditioners on heavy metal-contaminated soils in abandoned zinc mine area. *J. Korean Soc. People Plants Environ.* 5(2):25-27 (in Korean).
- Cui, Y.J., Y.G. Zhu, R.H. Zhai, D.Y. Chen, Y.Z. Huang, Y. Qiu and J.Z. Liang. 2004. Transfer of metals from soil to vegetables in an area near a smelter in Nanning, China. *Environ. Int.* 30:1-18.
- 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.
- Han, J.H., H.J. Kwon and C.H. Lee. 2014. Effect of arsenic types in soil on growth and arsenic accumulation of *Pteris multifida*. *Korean J. Plant Res.* 27:344-353 (in Korean).
- Jeong, S.K., T.S. Kim and H.S. Moon. 2010. Characteristics of heavy metals uptake by plants: based on plant species, types of heavy metals, and initial metal concentration in soil. *J. Soil Groundwater Environ.* 15(3):61-68 (in Korean).
- Ju, Y.K. 2011. Selection of plants for phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. Department of Horticulture, M.S. Thesis, Chungbuk Nat'l. Univ., Korea (in Korean).
- Jung K.C., B.J. Kim and S.G. Han. 1993. Survey on heavy metals contents in native plant near old zinc-mining sites. *Korean J. Environ. Agric.* 12:105-111 (in Korean).
- Jung, G.B., W.I. Kim, J.S. Lee and K.M. Kim. 2002. Phytoremediation of soils contamination with heavy metal by long-term cultivation. *Korean J. Environ. Agric.* 21:31-37 (in Korean).
- Jung, M.C., J.S. Ahn and H.T. Chon. 2001. Environmental contamination and sequential extraction of trace elements from mine wastes around various metalliferous mines in Korea. *Geosystem. Eng.* 4:50-60.

- Kim, J.G. and S.H. Lee, 1999. Phytoremediation. Korean J. Environ. Agric. 29:58-88 (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. Department of Agriculture, M.S. Thesis, Korea Univ., Korea (in Korean).
- Kor. Ministry Environ. 2009. Official test method enacted by Korean Ministry of Environment.
- Krishnaraj, S., M.A. Dixon and P.K. Saxena. 2000. Scented geraniums: a model system for phytoremediation. Korean J. Plant Tiss. Cult. 27: 325-337.
- Kumino, T., K. Saeki, K. Nagaoka, H. Oyaizu and S. Matsumoto. 2001. Characterization of copper-resistant bacterial community in rhizosphere of highly copper-contaminated soil. Eur. J. Soil Biol. 37:95-102.
- 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. 2014a. Effect of sulfur powder and citric acid on arsenic phytoremediation using *Pteris multifida* in forest soil. J. Korean Environ. Res. Tech. 17:1-12 (in Korean).
- Kwon, H.J., J.S. Cho and C.H. Lee. 2014b. Screening for heavy metals accumulation ability of twelve Pteridophyta species at soil contaminated with heavy metals. J. Korean Soc. People Plant Environ. 17:203-210 (in Korean).
- Kwon, H.J., J.S. Cho and C.H. Lee. 2015. Effect of arsenic concentrations in soil on growth and arsenic accumulation of *Pteris multifida*. J. Korean Soc. People Plant Environ. 18:273-280 (in Korean).
- Lee, S.J. 1975. Studies on the identification of Korean traditional folk medicine. Korean J. Raw Med. 6:75 (in Korean).
- Lee, B.K., I.H. Koh and H.A. Kim. 2005. The partitioning characteristics of heavy metals in soils of Ulsan by sequential extraction procedures. Korean Soc. Environ. Eng. 27:25-35 (in Korean).
- Marks, P.J., W.J. Wujcik and A.F. Loncar. 1994. Remediation technologies screening matrix and reference guide (2nd Edition). DOD Environmental Technology Transfer Committee, USA. p. 611.
- Muller, H.W., F. Oort, B. Gelie and M. Balabane. 2000. Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metal smelter. Environ. Pollut. 109:231-238.
- Oh, W.K. 2006. A feasibility study on *Pteris multifida* Pior. for the phytoremediation of arsenic contaminated mine soil. Department of Environmental Engineering, M.S. Thesis, Seoul Univ., Korea.
- Song, S.H., Y.R. Kang and I.C. Kim. 2005. Evaluation of heavy metal contents in the floras derived from granite and coal bearing shale areas in Keumsan. Korean J. Plant Res. 18:251-256 (in Korean).
- Suh, J.T., D.L. Yoo, H.S. Lee, C.W. Nam and S.J. Kim. 2006. Effects of culture soil combinations on growth of *Pteris multifida*, *Cyrtomium falcatum* and *Cheilanthes argentea*. Korean J. Plant Res. 19:517-520 (in Korean).
- Suh, J.T., D.L. Yoo, H.S. Lee, C.W. Nam and S.J. Kim. 2006a. Effects of shading degree on the growth of Pteridophyte on rain-shelter. Korean J. Interior Landscape 8(2):23-27 (in Korean).
- 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., M.H. Wong, C.Y. Lan, A.J.M. Baker, Y.R. Qin, W.S. Shu, G.Z. Chen, 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.
- Yeo, S.J. and S.J. Kim. 1997. Heavy metal speciation in soil from the Janghang smelter area. J. Miner. Soc. Korean 10:139-147.

(Received 22 November 2016 ; Revised 1 February 2017 ; Accepted 15 February 2017)