

폐석탄광산지역에 적용가능한 자생식물종의 중금속 흡수능력 평가

Evaluation of Heavy Metal Absorption Capacity of Native Plant Species in an Abandoned Coal Mine in South Korea

양금철

공주대학교 사회환경공학과 교수

Keum Chul Yang

Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University

Received 28 October 2020, revised 26 December 2021, accepted 28 December 2021, published online 31 December 2021

ABSTRACT: This study was conducted to evaluate the possibility of applying phytoremediation technology by investigating soil and native plants in waste coal landfills exposed to heavy metal contamination for a long period of time. The ability of native plants to accumulate heavy metals using greenhouse cultivation experiments was also evaluated. Plants were investigated at an abandoned coal mine in Hwajeolyeong, Jeongseon, Gangwon-do. Two species of native plants (*Carex breviculmis*, R. Br. and *Salix koriyanagi* Kimura ex Goerz.) located in the study area and three Korean native plants (*Artemisia japonica* Thunb., *Hemerocallis hakuunensis* Nakai., and *Saussurea pulchella* (Fisch.) Fisch.) were cultivated in a greenhouse for 12 weeks in artificially contaminated soil. Soils contaminated with arsenic and lead were generated with arsenic concentration gradients of 25, 62.5, 125, and 250 mg kg⁻¹ and lead concentration gradients of 200, 500, 1000, and 2000 mg kg⁻¹, respectively. Results showed that none of the five plants could survive at high arsenic concentration treatment (125 and 250 mg kg⁻¹) and some plants died in 2000 mg kg⁻¹ lead concentration treatment soil. The plant translocation factor (TF) was highest in *H. hakuunensis* in arsenic treatments, and *A. japonica* in lead treatments, respectively. The bioaccumulation factor (BF) of plants was more than 1 in all species in arsenic treatment, whereas it was highest in *H. hakuunensis*. BF for all species was less than 1 in lead treatment. Particularly, in 2000 mg kg⁻¹ concentration lead treatment, *A. japonica* accumulated more than 1000 mg kg⁻¹ lead and was expected to be a lead hyperaccumulator. In conclusion, *A. japonica* and *H. hakuunensis* were excellent in the accumulation of arsenic heavy metals, and *S. koriyanagi* was excellent in lead accumulation ability. Therefore, the above mentioned three plants are considered to be strong contenders for application of the phytoremediation technology.

KEYWORDS: Accumulation ability, Coal landfills, Heavy metal, Phytoremediation

요약: 본 연구는 장기간 중금속 오염에 노출된 폐 석탄매립지의 토양 및 자생식물을 조사하고 온실 재배 실험을 통해 자생식물의 중금속 축적 능력을 평가하여 식물정화 기술 적용 가능성을 위해 수행되었다. 강원도 정선 화절령에 위치한 폐 탄광 주변에서 자생하는 식물상을 조사하였다. 그리고 본 연구 지역에 생육하는 동일속의 자생식물 2 종 (*Carex breviculmis*, R. Br., *Salix koriyanagi* Kimura ex Goerz.,)와 일반적으로 분포하는 식물 3 종 (*Artemisia japonica* Thunb., *Hemerocallis hakuunensis* Nakai 및 *Saussurea pulchella* (Fisch.) Fisch.)을 온실에서 인공적으로 오염된 토양에서 12 주 동안 재배하였다. 비소와 납으로 오염된 토양은 각각 25, 62.5, 125, 250 mg kg⁻¹의 비소 농도 구배와 200, 500, 1000, 2000 mg kg⁻¹의 납 농도 구배로 생성하였다. 실험 결과 비소 고농도 처리 (125 및 250 mg kg⁻¹)로 5 개 식물이 모두 죽었고, 일부 식물은 2,000 mg kg⁻¹ 납농도 처리토에서 죽었다. 식물 이동계수는 비소 처리에서 *H. hakuunensis*에서 가장 높았고 납 처리에서는 *A. japonica*에서 각각 가장 높았다.

*Corresponding author: yangkc@kongju.ac.kr, ORCID 0000-0002-8348-6899

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

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.

생물 축적계수는 비소 처리에서 모든 식물종에서 1 이상이었고 *H. hakuunensis*에서 가장 높았다. 그리고 모든 식물종은 납 처리에서 1 미만이었다. 특히 2000 mg kg⁻¹ 농도 납 처리에서 *A. japonica*는 1000 mg kg⁻¹ 이상의 납을 축적하여 납 과다 축적 물질이 될 것으로 예상되었다. 결론적으로 *A. japonica*와 *H. hakuunensis*는 비소 중금속 축적이 뛰어났고 *S. koriyanagi*는 납 축적능이 우수하였다. 따라서 위의 3 가지 자생식물은 식물정화 기술에 적용성이 높은 것으로 판단되었다.

핵심어: 축적능력, 폐석탄매립지, 중금속, 식물정화

1. 서 론

석탄산업의 사양화로 개발되었던 국내 탄광들이 폐광 후 충분한 보호 조치를 받지 않고 방치되어 주변 경관을 해칠 뿐만 아니라 환경오염문제로 인하여 사회적 관심이 크게 대두되고 있다 (Min et al. 2005). 국내에는 전국적으로 394개의 폐석탄광산이 존재하며, 그 중 강원도 지역에 151개소가 분포하고 있고, 오랫동안 방치되어 지반침하, 산성광산배수 유출, 폐석탄적지 및 산림훼손, 폐 시설물 등과 같은 피해를 유발하고 있다 (MIRECO 2018). 환경부에서 시행한 강원도 5개 시·군에 위치한 151개 폐석탄광산 토양오염실태 조사 결과에 의하면 폐석탄광산 38개소가 토양오염우려기준을 초과하였으며, 9개 폐석탄광산은 대책기준을 초과하는 수준으로 나타났다. 또한 토양오염 중금속 비소의 농도는 토양오염우려기준 1지역 (25 mg kg⁻¹) 대비 12.5배 (311 mg kg⁻¹), 납은 토양오염우려기준 (200 mg kg⁻¹) 대비 4.5배 (891 mg kg⁻¹)로 나타나 심각한 토양오염 수준을 보였다 (MOE 2010). 이러한 폐광산지에서 발생하는 광산폐기물은 유실, 비산 등의 과정을 거쳐 주변 토양과 하천이 중금속에 오염될 수 있고, 중금속 오염 및 농도 증가는 토양 미생물의 활동을 억제하여 토양이 가진 정화능력을 저하시키며 (Park and Seo 2005), 생물의 폐사, 농작물 수확량 감소, 질병 등 다양한 생태·환경적 문제를 초래한다 (Ok et al. 2003).

미국 환경청 (US EPA) 및 국제암 연구기관 (IARC)에 따르면 카드뮴, 크롬, 납 및 수은 등은 특히 낮은 농도의 노출에도 높은 수준의 독성으로 여러 장기 손상을 유발하는 인체 발암물질로 분류하고 있다 (Tchounwou et al. 2012).

중금속 성분이 동물이나 인간에게 각종 질병을 야기하는 등 심각한 위협이 되고 있음은 익히 알려진 사실이다 (Jeong 2007, Ali and Khan 2019).

중금속 오염 토양에 대한 정화 및 복원 방법 중 식물

정화법 (Phytoremediation)은 대표적인 환경친화형 정화기술로서 (Kang et al. 1998, Reeves and Baker 2000, Park and Seo 2005) 기존의 물리·화학적 처리 방법보다 1/5 이상의 비용 절감이 가능하고 환경 교란을 최소한으로 할 수 있어 국내 다수의 오염지역에 도입할 수 있는 유용한 기술이다 (Cunningham and Ow 1996). 식물정화법에 가장 대표적인 방법으로 중금속을 흡수하여 지상부로 이동시켜 식물체내에 중금속을 축적하여 제거하는 식물추출 (Phytoextraction) 방법이 있다 (Jung et al. 2002, Jeong et al. 2010). 식물추출을 위한 식물재료는 수확이 가능한 조직 내에 고농도의 중금속을 축적하고 이에 대한 내성이 있어야 하며, 성장률과 생체량이 높아 개체 당 중금속의 제거량이 많아야 한다 (KSSGE 2007). 또한 식물은 기후와 토성 등 주변 환경에 의하여 생육이 크게 달라지고, 이에 따라 중금속 흡수능이 달라질 수 있으므로 (Park and Park 2002) 중금속 오염토양을 복원하기 위한 식물 선정에는 현장에서 생육이 가능하며, 중금속 흡수능이 우수한 식물을 선발해야 한다. 이를 위해서는 식물 추출을 위한 축적종과 식물안정화를 위한 중금속 내성종의 발굴이 우선적으로 이루어져야 한다. 이에 더하여 복원 작업시 식재 수종은 우리나라 자연환경에 적합하며 자연생태계의 교란을 주지 않는 자생 자연수종이 가장 적절할 것이다.

이와 관련된 연구로, 폐광산 주변 농경지를 대상으로 환원제를 이용한 중금속의 용출특성 및 안정화에 대한 연구 (Lee and Cho 2009, Yun et al. 2011, Hong et al. 2013, Oh et al. 2015, Seo et al. 2018, Ryu et al. 2011, Oa 2011)와 작물의 중금속 축적과 관련된 비료의 역할에 대한 연구 (Sterrett et al. 1996, Gupta et al. 2014), 중금속 오염토양에서의 토양 미생물 활성과 관련된 유기물 등의 연구와 같이 농업과 관련된 분야에서의 연구는 활발하게 진행되고 있다.

또한 국내에서 중금속을 축적하는 고축적 식물과 중금속 내성 식물종의 탐색, 식물종의 축적능 평가, 토양

개량제 연구 등이 수행되고 있으나 (Kang et al. 1998, Jung et al. 2000, Choi and Chiang 2003, Ok et al. 2003, Jeong et al. 2010) 우리나라 자생 식물종의 중금속 내성종의 식별이나 과축적종을 찾기 위한 기본 연구는 많지 않은 실정이다. 따라서 중금속 오염물질을 유발하는 오염지역 토양의 중금속을 효율적으로 제거 및 안정화하기 위한 기술의 개발이 필요하며 중금속으로 오염된 토양의 개선을 위해 연구지역에 자생하는 식물종을 탐색하고, 선정된 식물을 현장에 적용하기 전 중금속 종류 및 농도에 따른 흡수능을 분석하여 정화기술에 대한 기초자료를 제공하는 것이 본 연구의 목표이다.

2. 연구 방법

2.1 연구지역의 자생식물 조사

본 연구지역은 강원 정선군 사북읍 사북리 화절령 (N 37° 11' 53.2", E 128° 48' 29.2")에 위치한 폐석탄광산인 동원탄좌의 폐석매립지역으로 2004년 폐광 이후 별도의 처리 없이 폐석이 적재되어 있는 곳이다 (MIRECO 2018). 자생식물 조사는 폐석적재지 상부부터 시작하여 강우에 의해 생성된 수로나 웅덩이에 중금속 용출이 많을 것으로 예상되는 경로를 따라 2018년 4월에 실시하였다. 조사 식물상은 애쟁이사초, 골풀, 김의털, 호랑버들, 자작나무, 거제수나무 등이다.

2.2 식물체의 중금속 분석

식물체 시료는 지상부와 지하부로 나누어 60°C 에서 건조 후 분쇄하여 Microwave-digestion법 (Model: MARS-6)으로 전처리 하였다 (USEPA 1990). 전처리가 완료된 식물의 중금속 함량은 유도결합플라즈마-원자발광분광법을 사용하여 토양은 구리 (Cu), 납 (Pb), 아연 (Zn), 철 (Fe), 망간 (Mn), 비소 (As), 니켈 (Ni), 카드뮴 (Cd)을 분석하였고, 식물은 구리 (Cu), 납 (Pb), 아연 (Zn), 철 (Fe), 망간 (Mn), 비소 (As)를 분석하였다.

2.3 재배 실험

온실 제작: 재배실험을 위해 가로 7 m × 세로 10 m의 양문 개폐형 비닐하우스를 설치하였다.

중금속 구배 실험 오염토양의 제조: 비오염토양인

마사토를 3 mm 체로 통과시켜 원예용 상토와 약 66 : 33 부피 비율로 혼합하여 제조하였다. 중금속 오염토양 제조에 사용된 표준 시약인 비소와 납은 Sigma사의 $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 와 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 를 사용하였다. 재배토양의 비소 농도구배는 토양오염우려기준 (1지역)에 근거하여 각 25 (1배), 62.5 (2.5배), 125 (5배), 250 (10배) mg kg^{-1} 로, 납의 농도구배는 각 200 (1배), 500 (2.5배), 1,000 (5배), 2,000 (10배) mg kg^{-1} 로 처리하였다. 모든 처리는 중금속이 토양에 균일하게 오염되도록 약 10일 동안 안정화 시켰다.

식물종 선정 및 식재: 온실 재배실험에 선정된 식물종은 총 5종으로 이들 중 폐석탄매립지 자생종인 애쟁이사초와 호랑버들은 종자채집의 어려움으로 같은 속 (Genus)에 청사초 (*Carex breviculmis* R. Br.)와 키버들 (*Salix koriyanagi* Kimura ex Goerz)로 대체하여 선정 실험하였다. 또한 한반도에서 가장 분포지가 넓은 일반종으로 국화과의 제비쭉 (*Artemisia japonica* Thunb.), 각시취 (*Saussurea pulchella* (Fisch.) Fisch.) 및 백합과의 백운산원추리 (*Hemerocallis hakuunensis* Nakai)를 추가 선정하였다. 온실 재배실험에 사용된 화분은 높이 205 mm, 지름 210 mm 크기의 플라스틱 재질의 화분이며 각 화분 당 중금속이 처리된 토양을 4.0 kg씩 정량 분배 하였다. 식물은 육묘재배용 포트에서 생육시킨 후 뿌리 부분에 묻어있는 상토를 물로 씻어 제거하여 각 화분에 식재 하였다. 모든 처리는 1 종, 1 중금속, 1 구배 당 5개의 화분을 종별로 배치하였다. 관수는 토양의 포화수분량을 산정하여 식재 직후에는 500 ml를, 그 후 3일에 한번씩 300 ml의 일반 수돗물을 관수하였다.

2.4 식물체내 중금속 이동 및 축적계수 평가

식물에 축적된 중금속이 지하부에서 지상부로 이동하는 비율을 나타내는 이동계수 (Translocation factor, TF)와 토양 중금속 함량 대비 지상부의 축적량을 나타내는 생물축적계수 (Bioaccumulation factor, BF)는 아래의 식을 이용하여 분석 하였다.

이동계수 (TF) = 지상부의 중금속축적량 (mg kg^{-1}) / 지하부의 중금속축적량 (mg kg^{-1})

생물축적계수 (BF) = 지상부의 중금속축적량 (mg kg^{-1}) / 토양의 중금속 함량 (mg kg^{-1})

3. 결과

3.1 식물의 비소 축적 특성

비소 처리구에서 12주 동안 재배한 식물 중 비소 고농도 처리구 (125, 250 mg kg⁻¹)에서는 5 종의 식물이 모두 고사했다. 식재 전 식물의 비소 함량과 식재 12주 후 함량을 비교한 결과, 1배 처리구에서는 청사초가 지상부 37, 지하부 287.11 mg kg⁻¹, 키버들은 지상부 14.7, 지하부 263.3 mg kg⁻¹, 제비쭉은 지상부 47.8, 지하부 335.3 mg kg⁻¹, 백운산원추리는 지상부 66.5, 지하부 188.8 mg kg⁻¹을 보여 총 비소 함량은 제비쭉에서 가장 높았다. 2.5배 처리구에서 키버들은 지상부 59.6, 지하부는 410.8 mg kg⁻¹, 백운산원추리는 지상부 512.7, 지

하부 159.3 mg kg⁻¹을 보여 총 비소 함량은 백운산원추리에서 가장 높았다.

비소 처리구 식물의 이동계수(TF)를 조사한 결과, 1배 처리구의 백운산원추리는 이동계수가 0.35로 나타나 흡수한 비소를 지하부에 축적하는 것으로 나타났지만, 2.5배 처리구의 백운산원추리에서 3.22의 이동계수를 보여 지하부의 비소를 지상부로 빠르게 이동시킬 수 있는 것으로 나타났다. 그 외 처리구의 식물에서는 이동계수가 1 미만으로 나타나 비소 처리구의 식물은 토양에서 흡수한 비소를 지하부에 저장해 두는 것으로 나타났다 (Table 1).

비소 처리구에서 재배한 식물 개체당 흡수한 중금속 함량은 1배 처리구에서 지상부의 함량은 백운산원추리가 0.076 mg/individual로 가장 높았으며 지하부의 함

Table 1. The concentration, translocation factor (TF) and content of As and biomass in the plants grown in As-contaminated soil for 12 weeks

Study plant	Treatment concentration (mg As kg ⁻¹)	Plant concentration (mg As kg ⁻¹)						TF ¹⁾	Biomass after cultivation (g DM plant ⁻¹)			As content (mg As plant ⁻¹)		
		Shoot		Root		Total			Shoot	Root	Total	Shoot	Root	Total
		Cultivation time (weeks)												
		0	12	0	12	0	12							
<i>Carex breviculmis</i>	25	0.6	37.0	1.3	287.1	1.9	327.1	0.13	0.2	0.3	0.5	0.045	0.013	0.057
	62.5		- ²⁾		-		-	-	-	-	-	-	-	-
	125		-		-		-	-	-	-	-	-	-	-
	250		-		-		-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Salix koriyanagi</i>	25	0.7	14.7	2.7	263.3	3.4	278.0	0.06	4.6	1.5	6.1	0.067	0.392	0.459
	62.5		59.6		410.8		470.4	0.15	1.1	0.4	1.5	0.064	0.157	0.221
	125		-		-		-	-	-	-	-	-	-	-
	250		-		-		-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Artemisia japonica</i>	25	1.0	47.8	2.1	335.3	3.1	383.1	0.14	1.4	2.0	3.4	0.062	0.878	0.940
	62.5		-		-		-	-	-	-	-	-	-	-
	125		-		-		-	-	-	-	-	-	-	-
	250		-		-		-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Hemerocallis hakuunensis</i>	25	0.4	66.5	N.D ³⁾	188.8	0.4	255.3	0.35	1.1	2.2	3.3	0.076	0.429	0.504
	62.5		512.7		159.3		672.0	3.22	0.5	1.4	1.9	0.399	0.210	0.609
	125		-		-		-	-	-	-	-	-	-	-
	250		-		-		-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Saussurea pulchella</i>	25	0.3	-	1.0	-	1.3	-	-	-	-	-	-	-	-
	62.5		-		-		-	-	-	-	-	-	-	-
	125		-		-		-	-	-	-	-	-	-	-
	250		-		-		-	-	-	-	-	-	-	-

¹⁾ Ratio of As concentrations in shoots to roots.

²⁾ Data unavailable due to the death of plants.

³⁾ Not detected.

량은 제비쭉이 0.878 mg/individual로 가장 높았다. 지상부와 지하부의 총 비소 함량은 제비쭉이 0.940 mg/individual을 축적하여 가장 높게 나타났다. 2.5배 처리구에서 지상부의 함량은 백운산원추리에서 0.399 mg/individual 로 가장 높았으며 지하부의 함량 또한 0.210 mg/individual 로 가장 높았고 총 비소 함량 0.609 mg/individual로 백운산원추리에서 총 중금속 함량이 가장 높았다. 따라서 비소 처리구의 개체당 흡수량은 제비쭉에서 가장 높은 것으로 나타났다 (Table 1).

3.2 식물의 납 축적 특성

식재 전 식물의 납 함량과 식재 12주후 납 함량을 비교한 결과, 1배 처리구에서는 청사초가 지상부 25.3, 지하부 69.1 mg kg⁻¹, 키버들은 지상부 4.7, 지하부 130.6

mg kg⁻¹, 제비쭉은 지상부 12.6, 지하부 46.3 mg kg⁻¹, 백운산원추리는 지상부 18.1, 지하부 61.5 mg kg⁻¹, 각시취는 지상부 16.9, 지하부 162.0 mg kg⁻¹을 보여 총 납 함량은 각시취에서 가장 높았다. 2.5배 처리구에서 청사초는 지상부 114.1, 지하부 170.4 mg kg⁻¹, 키버들은 지상부 6.7, 지하부 343.1 mg kg⁻¹, 제비쭉은 지상부 26.8, 지하부 108.3 mg kg⁻¹, 백운산원추리는 지상부 38.0, 지하부 159.9 mg kg⁻¹, 각시취는 지상부 41.3, 지하부 533.4 mg kg⁻¹을 보여 총 납 함량은 각시취에서 가장 높았다. 5배 처리구에서는 청사초가 지상부 110.4, 지하부 278.0 mg kg⁻¹, 키버들이 지상부 19.0, 지하부 1820.2 mg kg⁻¹, 제비쭉이 지상부 138.4, 지하부 213.2 mg kg⁻¹, 백운산원추리는 지상부 34.7, 지하부 306.3 mg kg⁻¹, 각시취는 지상부 98.8, 지하부 1132.9 mg kg⁻¹을 보여 총 납 함량은 키버들에서 가장 높았다. 10배 처

Table 2. The concentration, translocation factor (TF) and content of Pb and biomass in the plants grown in Pb-contaminated soil for 12 weeks

Study plant	Treatment concentration (mg Pb kg ⁻¹)	Plant concentration (mg Pb kg ⁻¹)						TF ¹⁾	Biomass after cultivation (g DM plant ⁻¹)			Pb content (mg Pb plant ⁻¹)		
		Shoot		Root		Total			Shoot	Root	Total	Shoot	Root	Total
		Cultivation time (weeks)												
		0	12	0	12	0	12							
<i>Carex breviculmis</i>	200	N.D ²⁾	25.3	N.D	69.1	N.D	94.4	0.37	3.8	1.4	5.2	0.068	0.097	0.165
	500		114.1		170.4		284.5	0.67	3.3	1.3	4.6	0.145	0.222	0.367
	1000		110.4		278.0		388.4	0.40	3.9	0.8	4.7	0.139	0.257	0.396
	2000		132.0		953.7		1085.7	0.14	4.8	1.6	6.4	0.451	1.166	1.618
<i>Salix koriyanagi</i>	200	N.D	4.7	0.25	130.6	0.25	135.3	0.04	9.3	3.3	12.6	0.044	0.440	0.484
	500		6.7		343.1		349.8	0.02	8.0	3.1	11.1	0.054	1.140	1.194
	1000		19.0		1820.2		1839.2	0.01	7.2	3.1	10.3	0.136	4.035	4.171
	2000		27.1		2567.6		2594.7	0.01	2.7	1.4	4.1	0.074	3.694	3.768
<i>Artemisia japonica</i>	200	0.31	12.6	1.45	46.3	1.76	58.9	0.27	5.4	7.4	12.8	0.067	0.337	0.404
	500		26.8		108.3		135.1	0.25	5.4	8.0	13.4	0.148	0.938	1.068
	1000		138.4		213.2		351.6	0.65	4.8	8.0	12.8	0.647	1.734	2.381
	2000		1132.0		832.9		1964.9	1.36	0.9	1.5	2.4	0.632	1.062	1.694
<i>Hemerocallis hakuunensis</i>	200	N.D	18.1	N.D	61.5	N.D	79.6	0.29	1.9	2.5	4.4	0.046	0.173	0.219
	500		38.0		159.9		197.9	0.24	1.5	1.9	3.4	0.171	0.327	0.498
	1000		34.7		306.3		341.0	0.11	1.0	1.6	2.6	0.111	0.495	0.607
	2000		84.8		779.3		864.1	0.11	2.0	4.0	6	0.279	3.470	3.749
<i>Saussurea pulchella</i>	200	0.56	16.9	0.59	162.0	1.15	178.9	0.10	6.1	1.6	7.7	0.102	0.245	0.347
	500		41.3		533.4		574.7	0.08	6.2	1.0	7.2	0.255	0.541	0.796
	1000		98.8		1132.9		1231.7	0.09	5.9	0.9	6.8	0.628	1.095	1.723
	2000		786.2		2651.2		3437.4	0.30	0.9	0.1	1.0	0.721	0.371	1.092

¹⁾ Ratio of Pb concentrations in shoots to roots.
²⁾ Not detected.

Table 3. Bioaccumulation factor(BF) according to the treatment concentrations of As and Pb in the study plants

Study plant	Heavy metal							
	As				Pb			
	Theoretical concentrations (mg kg ⁻¹)				Theoretical concentrations (mg kg ⁻¹)			
	25	62.5	125	250	200	500	1000	2000
<i>Carex breviculmis</i>	2.6	-	-	-	0.28	0.53	0.27	0.08
<i>Salix koriyanagi</i>	1.0	1.3	-	-	0.05	0.03	0.05	0.02
<i>Artemisia japonica</i>	3.3	-	-	-	0.14	0.12	0.33	0.65
<i>Hemerocallis hakuunensis</i>	4.6	11.0	-	-	0.20	0.18	0.08	0.05
<i>Saussurea pulchella</i>	-	-	-	-	0.19	0.19	0.24	0.45

리구에서 청사초는 지상부 132.0, 지하부 953.7 mg kg⁻¹, 키버들은 지상부 27.1, 지하부 2567.6 mg kg⁻¹, 제비쭉은 지상부 1132.0, 지하부 832.9 mg kg⁻¹, 백운산원추리는 지상부 84.8, 지하부 779.3 mg kg⁻¹, 각시취는 지상부 786.2, 지하부 2651.2 mg kg⁻¹을 보여 총 납 함량은 각시취에서 가장 높았다.

납 처리구 식물의 이동계수 (TF)는 제비쭉의 1배, 2.5배, 5배 처리구에서는 이동계수가 1미만으로 나타나 대부분의 납을 지하부에 축적하는 것으로 나타났지만 10배 처리구에서 이동계수가 1.36으로 나타나 지하부의 납을 지상부로 이동시킬 수 있는 것으로 나타났다. 그 외 처리구의 식물에서는 이동계수가 1 미만으로 나타나 납 처리구의 식물은 토양에서 흡수한 납을 지하부에 저장해 두는 것으로 나타났다 (Table 2).

납 처리구에서 재배한 식물 건중량 대비 흡수한 중금속 함량은 1배 처리구에서 지상부의 함량은 각시취가 0.102 mg/individual 로 가장 높았으며 지하부의 함량은 0.440 mg/individual로 키버들의 농도가 가장 높았다. 지상부와 지하부의 총 납 함량은 키버들이 0.484 mg/individual을 축적하여 가장 높게 나타났다. 2.5배 처리구에서 지상부의 함량은 각시취가 0.255 mg/individual로 가장 높았으며 지하부는 키버들이 1.140 mg/individual로 가장 높게 나타났다. 지상부와 지하부의 총 납 함량은 키버들이 1.194 mg/individual을 축적하여 가장 높게 나타났다. 5배 처리구에서 지상부 함량은 제비쭉이 0.647 mg/individual로 가장 높았으며 지하부는 4.035 mg/individual로 키버들에서 가장 높게 나타났다. 지상부와 지하부의 총 납 함량은 키버들이 4.171 mg/individual로 가장 높게 나타났다. 10배 처리구에서 지상부의 함량은 각시취가 0.721 mg/

individual로 가장 높았으며 지하부의 함량은 3.694 mg/individual로 키버들의 농도가 가장 높았다. 지상부와 지하부의 총 납 함량은 키버들이 3.768 mg/individual을 축적하여 가장 높게 나타났다. 따라서 납 처리구의 건중량 대비 흡수능은 모든 농도에서 키버들이 가장 높은 것으로 나타났다 (Table 2).

3.3 식물의 중금속 축적능

식물체의 토양 오염정도에 대한 식물 지상부의 축적능을 보여주는 생물축적계수 (Bioaccumulation factor, BF)는 1 이상일 때 식물정화기법의 소재로 활용가치가 높다고 알려져 있다 (Watanbe 1997). 비소 항목의 경우 1배 처리구에서 각시취를 제외한 모든 종의 BF가 1 이상으로 매우 높았으며, 특히 청사초, 제비쭉, 백운산원추리에서 각각 2.6, 3.3, 4.6로 토양오염 농도 대비 높은 비소 흡수량을 보였다. 62.5 mg kg⁻¹ 농도에서도 키버들과 백운산원추리가 각각 1.3, 11.0 으로 매우 높았으며 농도가 증가함에 따라 축적계수도 높아지는 경향을 보였다. 납 항목의 경우에는 0.02 - 0.65로 1 미만의 수준을 보여 높은 축적능을 보이지 않았지만, 제비쭉과 각시취에서 농도가 증가할수록 축적계수가 높아지는 경향을 보였다 (Table 3).

4. 고찰

본 연구에서 폐석탄매립지의 중금속 농도는 환경부의 조사 결과와 비교 하였을때 비소와 납 모두 낮게 나타났다으나 여전히 심각한 수준을 보였다 (MOE 2010).

재배한 5종 식물의 중금속 축적량을 평가 하였을때

비소 1배 처리구에서는 제비쭉의 흡수량이 가장 우수하였으며 2.5배 처리구에서는 백운산원추리의 흡수능이 가장 우수하였다. 2.5배 처리구에서 키버들과 백운산원추리는 전 단계 처리구보다 약 1.7배, 2.6배 더 흡수하는 것으로 나타나 비소 처리구의 식물은 토양 내 중금속 농도가 높아질수록 더 많은 중금속을 흡수하는 경향을 보였다. 한편 폐석탄광산 토양이 토양오염기준 대비 최대 12.5배 까지 오염되어 있다는 보고 (MOE 2010)와 본 실험의 토양오염기준 대비 5배 처리구에서 모든 식물이 고사한 결과는 시험 식물종들이 고농도의 비소 오염 토양정화에는 적절하지 않은 식물종임을 의미한다고 볼 수 있다.

백운산원추리는 다른 종과는 다르게 지하부보다 지상부에 더 많은 비소를 축적하여 TF (이동계수)가 3.22로 나타나 지하부의 중금속을 지상부로 빠르게 이동시키는 것으로 나타났다. 하지만 백운산원추리를 제외한 식물의 이동계수는 모든 종에서 1 이하로 나타나 대부분의 중금속을 지하부에 축적하는 것으로 나타났다.

납 처리구의 평가 결과 1배, 2.5배, 10배 처리구에서 각시취의 흡수능이 가장 우수하였고, 5배 처리구에서는 키버들의 흡수능이 가장 우수하였다. 1배 처리구와 10배 처리구의 흡수량을 비교 하였을 때 청사초, 키버들, 제비쭉, 백운산원추리, 각시취 순으로 12배, 19배, 33배, 11배, 19배 더 흡수하는 것으로 나타나 납 처리구의 식물 또한 토양 내 중금속 농도가 높아질수록 더 많은 중금속을 흡수하는 경향을 보였다. TF (이동계수)는 제비쭉을 제외한 나머지 종에서는 모든 농도에서 1 이하로 나타나 대부분의 중금속을 지하부에 축적하는 것으로 나타났으나, 제비쭉은 농도 구배가 증가 할수록 이동계수가 높아져 10배 처리구에서 1.36을 나타내 납을 지상부에 축적 하는 것으로 나타났다.

5종 식물들의 개체당 중금속 축적능을 평가하여 식물 개체와 중금속 축적능 간의 유의한 관련성을 찾기 위해 조사하였다. 비소처리구의 경우 1배 처리구에서 개체당 제비쭉이 가장 많은 비소를 함유하고 있었고 대부분이 지하부에 되어 있었다. 2.5배 처리구에서는 개체당 백운산원추리가 가장 많은 비소를 함유하고 있었으며 지상부에 더 많은 비소를 흡수하였다. 납 처리구의 경우 모든 농도에서 개체당 키버들이 가장 많은 납을 함유하고 있었다.

연구 결과를 종합한 결과 키버들, 제비쭉, 백운산원

추리는 토양 내 중금속 흡수능이 우수한 것으로 나타났다. 제비쭉과 백운산원추리는 비소의 흡수능이 우수하였고, 키버들은 납 흡수능이 우수하였다. 축적능이 우수한 상기 3종의 식물은 대부분의 중금속을 지하부에 축적하는 것으로 나타났다. 비소 처리구의 경우 식물의 중금속 흡수능이 높은 반면 고농도에서 고사율이 높고 생체량 또한 떨어지기 때문에 광미매립지 자생식물의 현장 적용을 위해서는 식물의 생존율 및 생체량을 높이기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되며, 납 처리구의 식물은 대체로 생육 상태가 우수하고 흡수능 또한 높아 납 농도가 높은 지역의 식생정화 소재로 활용 가치가 높을 것으로 판단된다.

5. 결론 및 제언

본 연구는 장기간 오염된 폐석탄매립지의 중금속 오염토양을 대상으로 중금속 저감식물의 현장적용 가능성을 평가하기 위해 실시하였다. 비소와 납 두 가지의 중금속을 비 오염 토양에 섞어 인위적으로 농도 구배 (25 (1배), 62.5 (2.5배), 125 (5배), 250 (10배) mg kg⁻¹ / 납 : 200 (1배), 500 (2.5배), 1000 (5배), 2000 (10배) mg kg⁻¹)가 있는 오염 토양을 만들고, 폐석탄매립지 자생식물 유사종 2종 (청사초, 키버들)과 국내 자생종 3종 (제비쭉, 각시취 및 백운산원추리)을 식재하여 12주 동안 재배한 뒤 식물의 생육, 식물체의 중금속 축적량 및 개체 건중량 대비 중금속 흡수능을 분석하였다.

또한, 온실 실험 토양과 현장토양의 토성이 달라 실제 적용 시 연구결과와는 다른 양상을 보일 수 있어 현장토양을 통한 실험이 필요하며, 현장 토양의 중금속 이온화 농도 (Exchangeable concentration) 조사를 통해 식물이 직접적으로 이용 할 수 있는 중금속 농도 파악 및 온실 실험 시 고사한 종에 대한 중금속 분석을 통해 실험식물의 중금속 치사량 정도를 파악하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

References

- Ali H. and Khan E. 2019. Trophic transfer, bioaccumulation and biomagnification of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in food chains/webs - Concepts and implications for wildlife and human health. *Human and Ecological Risk Assessment* 25: 1353-1376.

- Choi M.K. and Chiang M.H. 2003. Soil conditioner treatment and growth responses of *Artemisia princeps* and *Helianthus annuus* for ecological restoration in abandoned zinc mine area. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology* 21: 447-450. (in Korean).
- Cunningham S.D. and Ow D.W. 1996. Promises and prospects of phytoremediation. *Plant Physiology* 110: 715-179.
- Gupta D.K., Chatterjee S., Datta S., Veer V. and Walther C. 2014. Role of phosphate fertilizers in heavy metal uptake and detoxification of toxic metals. *Chemosphere* 108: 134-144.
- Hong C.O., Kim Y.G., Lee S.M., Park H.C., Kim K.K., Son H.J., Cho J. H. and Kim P.J. 2013. Liming effect on cadmium immobilization and phytoavailability in paddy soil affected by mining activity. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 32: 1-8. (in Korean)
- Jeong K.S. 2007. Heavy metal contents in soil and vegetables collected from Busan district. *Journal of the Environmental Sciences* 16: 725-733. (in Korean)
- Jeong S.K., Kim T.S. and Moon H.S. 2010. Characteristics of heavy metals uptake by plants: based on plant species, types of heavy metals, and initial metal concentration in soil. *Journal of soil and groundwater environment* 15: 61-68. (in Korean)
- Jung G.B., Kim W.I., Lee J.S. and Kim K.M. 2002. Phytoremediation of soils contaminated with heavy metal by long-term cultivation. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 21: 31-37. (in Korean)
- Jung G.B., Kim W.I. and Moon K.H. 2000. Studies on the phytoextraction of cadmium and lead contaminated soils by plants cultivation. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 19: 213-217. (in Korean)
- Kang B.H., Shim S.I., Lee S.G., Kim K.H. and Chung I.M. 1998. Evaluation of *Ambrosia artemisiifolia* var. *elator*, *Ambrosia trifida*, *Rumex crispus* for phytoremediation of Cu and Cd contaminated soil. *Journal of Korean Weed Science* 18: 262-267. (in Korean)
- Lee S.H. and Cho J.G. 2009. In-situ stabilization of heavy metal contaminated farmland soils near abandoned mine, using various stabilizing agents: Column test study. *Journal of Soil and Groundwater Environment* 14: 45-53. (in Korean)
- Korea Society Soil and Groundwater Environment (KSSGE). 2007. Illustrated soil environmental engineering. Hyangmoonsa, Seoul.
- Min J.G., Park E.H., Moon H.S. and Kim J.K. 2005. Chemical properties and heavy metal content of forest soils around abandoned coal mine lands in the Mungyeong area. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 7: 265-273. (in Korean)
- Mine Reclamation Corporation (MIRECO). 2018. Yearbook of MIRECO Statistics (<https://www.mireco.or.kr>).
- Ministry of Environment (MOE). 2010. Survey result of soil pollution from waste coal mines (<http://www.me.go.kr>).
- Oa S.W. 2011. A leaching characteristics on lime stabilization of heavy metal contaminated soil in a waste mine ares. *Journal of Korean Society on Water Environment* 27: 862-867. (in Korean)
- Oh S.J., Kim S.C., Oh S.M., Ko T.Y., Ok Y.S. and Yang J.E. 2015. Reduction of heavy metal bioavailability in agricultural field using lime based materials. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer. Abstract of Spring Conference*. pp. 199. Wanju-Gun. (in Korean)
- Ok Y.S., Kim S.H., Kim D.Y., Lee H.N., Lim S.K. and Kim J.G. 2003. Feasibility of phytoremediation for metal-contaminated abandoned mining area. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 36: 323-332. (in Korean)
- Park Y.H. and Seo K.W. 2005. Policy Suggestions for Soil Contamination Prevention and Management of Inactive or Abandoned Metal Mines. Korea Environment Institute (KEI 2005 WO-03). Sejong-Si. p. 98. (in Korean)
- Park Y.S. and Park J.B. 2002. Effects of heavy metals on growth and seed germination of *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Environmental Science* 11: 319-325. (in Korean)
- Reeves R.D. and Baker A.J.M. 2000. Metal-accumulation plants. In: Raskin, I. (Ed.), *Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the Environment*. John Wiley & Sons. Int. New York. pp. 193-229.
- Ryu J.H., Kim W.I., Kim J.Y., Lee J.H., Lim G.J. and Hong M.K. 2011. Effect of Lime application on solubility and bioavailability of heavy metals within rhizosphere of radish in sandy soils. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer. Abstract of Fall Conference*. pp. 230-231. (in Korean)
- Seo D.S., Yun S.I. and Lee C.K. 2018. Stabilization of heavy metals and growth of *Pinus densiflora* in and abandoned mine tailing with compost and lime amendment. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer. Abstract of Spring Conference*. pp. 108. (in Korean)
- Sterrett S.B., Chaney R.L. Gifford C.H. and Mielke H.W. 1996. Influence of fertilizer and sewage sludge compost on yield and heavy metal accumulation by lettuce grown in urban soils. *Environmental Geochemistry and Health* 18: 135-142.
- Tchounwou P.B., Yedjou C.G., Patlolla A.K. and Sutton D.J. 2012. Heavy metal toxicity and the environment, *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology* 101: 133-164.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 1990. Microwave assisted acid digestion of sediments,

- sludges, soils and oils. SW-846 Method 3051.
- Watanabe M.E. 1997. Phytoremediation on the brink of commercialization. *Environmental Science & Technology* 31: 182-186.
- Wilkins D.A. 1978. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth. *New Phytologist* 80: 623-633.
- Yun S.W., Kang S.I., Jin H.G., Kim H.J., Yu C. 2011. Leaching characteristics of arsenic and heavy metals and stabilization effects of limestone and steel refining slag in a reducing environment of flooded paddy soil. *Journal of Agriculture and Life Science* 45: 251-263. (in Korean)