

광해지역 토착 자생식물에 의한 중금속 흡수

최형욱¹ · 최상일^{1*} · 양재규²

¹광운대학교 환경공학과, ²광운대학교 교양학부

Heavy Metal Uptake by Native Plants in Mine Hazard Area

Hyung-Wook Choi¹ · Sang-Il Choi^{1*} · Jae-Kyu Yang²

¹Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

²Division of General Education, Kwangwoon University

ABSTRACT

The purpose of this study was in search of native plant species showing metal-resistant property and excessively accumulating heavy metals in metal-contaminated soil or abandoned mines as well as in evaluation of applicability of phytoremediation. In the study area, species showing excessively accumulating heavy metals were a shepherd's purse, pampas grass, a Korean lettuce, a Hwansam vine, the Korean persicary, a foxtail, a goosefoot, and a water pepper. The first screened plant species in Sambo mine were as shepherd's purse, Korean lettuce and pampas grass. Among them the shepherd's purse can be excluded because it is a seasonal plant and has lower removal capacity for heavy metals. The Korean lettuce was also excluded because of having lower removal capacity for heavy metals. Pampas grass is a highly bionic plant species constantly growing from spring. However it has weak points such as little accumulation capacity for zinc as well as small values of an accumulation factor and a translocation factor. Another problem is regarded as removal of roots after the clean up if pampas grass is applied to a farmland. In Sanyang mine, wormwood and Sorijaengi were considered as adaptable species.

Key words : Abandoned mines, Heavy metal, Native plants, Hyperaccumulator, Uptake

1. 서 론

과거 광산 활동이 활발하였던 국내의 수많은 금속광산들은 현재 대부분이 휴·폐광되었고 채광 작업의 산물로 남아있는 광미장 또는 폐석장 등에 함유된 중금속이 오염원으로 작용하여 주변의 토양과 경작지에 영향을 주었다. 중금속은 먹이 사슬을 따라 생태계에 유해한 영향을 미칠 뿐 아니라 일단 오염되면 자연계의 자정 능력으로는 복구가 거의 불가능하며, 인위적인 복구를 위해서는 화학물질을 첨가하는 등 많은 복원비용과 시간이 소요된다(Cao et al., 2002). 그러나 토양오염 조건 하에서도 독성 중금속이 온을 다량 흡수하고 성장하는 중금속 내성식물들이 다수 발견되고 있으며 이들은 대부분 오염지역 인근의 토착 자생식물들이다. 이들 토착 자생식물들은 1)열악한 환경에

대하여 강한 내성을 가지고 있으며, 2)빠른 성장률을 특성으로 하고, 3)높은 번식능력을 가지는 것은 물론 4)적절한 환경에서 급격한 생체량 증가를 나타내는 특성이 있어 식물체내 고농도의 중금속을 흡수·축적한다면 오염현장의 식물상복원에 가장 적합하다고 판단되기 때문이다(Wei et al., 2008). 오염된 토양에서 서식하는 토착 자생식물들은 독성 금속의 흡수를 억제하는 기작을 갖고 있거나 식물체내에 중금속을 다량 축적하기도하여 원활한 활성을 유지하며 성장할 수 있는 특징을 갖는다. 이와 같이 식물은 내성금속성식물(metal tolerant plant)로 분류되고, 특히 건조량(dry weight) 기준으로 식물 체내에 Cd 100 mg/kg, Cu 1,000 mg/kg, Pb 1,000 mg/kg, Zn 10,000 mg/kg 이상 축적할 수 있는 식물종을 통칭하여 과축적종(hyperaccumulator)이라 한다(Baker et al., 1998). 본 연구에서는 삼보광산 및

*Corresponding author : sichoi@kw.ac.kr

원고접수일 : 2009. 9. 15 심사일 : 2009. 9. 22 게재승인일 : 2010. 2. 14

질의 및 토의 : 2010. 8. 31 까지

산양광산의 중금속 오염토양에서 자생적으로 서식하며 중금속에 대해 내성과 흡수 능력을 지닌 내성중금속성식물 및 과축적종을 탐색하고 이들을 광산주변에 확대 적용하는 식물상 복원의 적용 가능성을 평가하였다.

2. 실험 내용 및 방법

2.1. 토양 및 식물체 시료채취 방법

중금속 과축적 토착 자생식물의 탐색과 현장 적용성을 확인하기 위하여 봄, 여름, 가을 계절별로 나누어 각각 다른 토착종을 선정하여 채집하였다. 채취위치는 오염의 개연성이 추정되는 광미장 또는 폐석장 하부의 논토양과 개천이고, 채취종은 해당 채취위치에서 가장 활발히 자라고 있는 우점종을 우선 선택하였다. 삼보광산 1차 조사에서 Zn, Cu, Pb, Cd, As 등 5개 중금속을 대상으로 하였으며, 2차 조사에서는 주 오염 항목인 Zn을 중점적으로 연구하였다. 또한 산양광산에서는 Zn, Cu, Pb, Cd 등 4개 중금속을 대상으로 주기적인 토착 자생식물 채집을 통해 다양한 식물종과 각각 다른 중금속 오염상 및 토양상에 따른 토착 자생식물의 중금속 축적능을 비교하였다. 식물을 채집할 때에는 식물 근권토양을 같이 채집하였으며, 근권토양이 식물체에 섞이지 않도록 식물체 지상부를 먼저 채취하고 식물체 뿌리와 근권토양을 채집한 다음 각각 다른 플라스틱 봉투에 넣어 실험실로 운반하였다. 또한 식물을 용이하게 하기 위하여 채취 전 식물체의 사진을 함께 촬영하였다.

2.2. 중금속 측정방법

토양오염공정시험법에 의하여 중금속의 추출 시 Pb, Cu, Cd은 0.1N HCl을 이용하였고, As는 1N HCl로 추출하였다. 건조시킨 토양을 10 g 취하여 100 mL 삼각플라스크에 넣고 염산용액(0.1N, 1N) 50 mL을 넣은 후, 항온수평진탕기(100회/분, 진폭 10 cm)를 사용하여 30°C를 유지하면서 1시간 진탕한 다음 여과해서 중금속 농도를 측정하였다. 중금속 농도는 Atomic Flame Absorption Spectrophotometer (AAS analyst 100, Perkin, USA)로 측정하였다. 식물의 중금속 추출 및 분석법은 Baek et al.(2005)의 acid digestion 방법을 따랐다. 식물 시료는 증류수로 세 번 이상 닦고 70°C 건조기에서 향량이 될 때까지 건조시킨 후 뿌리와 지상부로 나누어 막자사발에서 갈았다. 시료 0.1 g에 60% HNO₃ 5 mL을 가하여 microwave에서 분해시킨 후 whatman filter paper No. 2로 여과하고 증류수로 10 mL까지 맞추어 AAS로 중금속의 농도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 삼보광산 결과

삼보광산에서 채집한 계절별 자생식물 총 18종이며, 4월, 7월 및 10월에 각각 6종씩이다. 자생식물을 채취할 때 함께 채취한 토양의 pH는 인근 야산의 정상적인 토양 pH인 5.5~6과 비슷하거나 조금 낮게 분석되었다. 삼보광산의 계절별 토양 및 식물체내 중금속 농도는 Table 1~3

Table 1. Uptake amount of Zn by native plants (Sambo mine, April)

(unit : mg/kg)

Scientific name	Aerial part		Root		Soil	
	Average	Std. dev.	Average	Std. dev.	Average	Std. dev.
<i>Galium spurium</i>	522.0	29.7	1,085.9	57.6	914.6	121.5
<i>Capsella bursa-pastoris</i>	1,073.6	77.1	310.0	93.9	488.9	32.0
<i>Alopecurus aequalis</i>	862.7	73.7	2,832.4	358.4	714.9	4.6
<i>Equisetum arvense</i>	1,056.3	25.4	1,393.3	62.4	571.2	90.8
<i>Stellaria aquatica</i>	884.1	67.1	2,059.0	198.9	1,488.1	63.1
<i>Artemisia princeps</i>	791.3	45.8	1,033.1	14.4	5,253.6	197.6

Table 2. Uptake amount of Zn by native plants (Sambo mine, July)

(unit ; mg/kg)

Scientific name	Aerial part		Root		Soil	
	Average	Std. dev.	Average	Std. dev.	Average	Std. dev.
<i>Setaria viridis</i>	237.1	66.3	460.4	157.7	2,041.7	759.0
<i>Persicaria thunbergii</i>	920.6	36.9	576.5	54.0	1,474.5	50.7
<i>Commelina communis</i>	148.2	10.3	361.8	6.7	142.4	40.3
<i>Impatiens textori</i>	518.4	36.5	661.3	98.9	540.1	22.8
<i>Portulaca oleracea</i>	105.3	7.3	155.2	18.8	249.9	12.8
<i>Humulus japonicus</i>	84.2	18.3	-	-	630.0	23.3

Table 3. Uptake amount of Zn by native plants (Sambo mine, October) (unit : mg/kg)

Scientific name	Aerial part		Root		Soil	
	Average	Std. dev.	Average	Std. dev.	Average	Std. dev.
<i>Erigeron annuus</i>	105.0	2.5	100.0	27.0	237.9	9.7
<i>Youngia sonchifolia</i>	1,035.0	101.8	238.3	31.7	945.1	117.6
<i>Digitaria sanguinalis</i>	162.5	110.1	927.5	51.1	291.8	17.0
<i>Aster yomena</i>	103.3	5.2	89.2	22.7	134.7	20.5
<i>Miscanthus sinensis</i>	199.2	41.6	132.5	6.6	109.0	4.0
<i>Elsholtzia ciliata</i>	770.8	27.7	703.3	187.5	883.7	141.6

와 같다. 삼보광산은 대표적인 연·아연광산이므로 아연을 위주로 기록하였고, 지상부와 뿌리를 통해 흡수된 중금속의 함량과 토양의 중금속 함량으로 나누어 표기하였다. 4월에 채취한 식물체내 아연함량(Table 1)은 7월(Table 2) 및 10월(Table 3)에 채취한 자생식물에 비해 높은 편이었다. 갈퀴덩굴(*Galium spurium*)이 522.0 mg/kg로 가장 낮았으며 냉이(*Capsella bursa-pastoris*)에서는 무려 1,073.6 mg/kg이 검출되었다. 이와 같은 이유는 봄철에 어린식물이 자라기 시작하면서 식물체 성장이 미숙하여 토양에서 섭취한 중금속에 비해 생체량이 작았기 때문으로 판단된다. 쑥(*Artemisia princeps*)의 경우는 토양내 농도가 5,253.6 mg/kg으로 극히 높았음에도 불구하고 뿌리 내 농도는 1,033.1 mg/kg로 낮은 편에 속한다. 7월에 채취한 식물 내 Zn의 함량은 Table 2와 같으며 환삼덩굴(*Humulus japonicus*)의 농도가 84.2 mg/kg로 가장 낮았고, 고마리(*Persicaria thunbergii*)의 농도가 920.6 mg/kg로 가장 높게 나타났다. 그러나 환삼덩굴의 경우 뿌리를 채취하지 못하여 뿌리 아연함량은 기재하지 못하였다. 10월에 채취한 식물내 아연함량은 Table 3과 같으며 쑥부쟁이(*Aster yomena*)의 줄기 내 농도가 103.3 mg/kg로 최저이

Table 4. Zn concentration of plants and soil (Sambo mine)

Month	(unit : mg/kg)		
	Above Root	Root	Soil
April	522.0~1,073.6	310.0~2,832.4	488.9~5,253.6
July	84.2~920.6	155.2~661.3	142.4~2,041.7
October	103.3~1,035.0	89.2~927.5	109.0~945.1

며 고들빼기(*Youngia sonchifolia*)가 1,035.0 mg/kg으로 최고를 나타내었다. 이외에 향유(*Elsholtzia ciliata*) 줄기에서 770.8 mg/kg의 아연이 검출되었다. 그러나 전반적으로 줄기 내 아연함량은 낮은 것으로 나타났다. 삼보광산에서 채취한 식물 지상부, 뿌리 및 토양의 아연농도범위는 Table 4와 같이 큰 편차를 보이고 있다. 4월에 채취된 식물의 지상부 아연함량은 최대/최소비가 약 2배에 해당하지만 7월 및 10월에는 10배를 초과하였다. 뿌리 내 아연함량의 최대/최소비는 4월에 약 8.5배이지만 7월에는 4.3배, 10월에는 10.4배로 나타났으며, 근권토양의 아연함량 최대/최소비도 4월에는 10.7배, 7월에는 14.4배, 10월에는 8.7배로 거의 10배에 달하여 주변 토양의 아연오염가 매우 높음을 보여주고 있다. Fig. 1에 나타난바와 같이 독성임계치를 초과하는 아연을 함유하는 식물은 계절별로

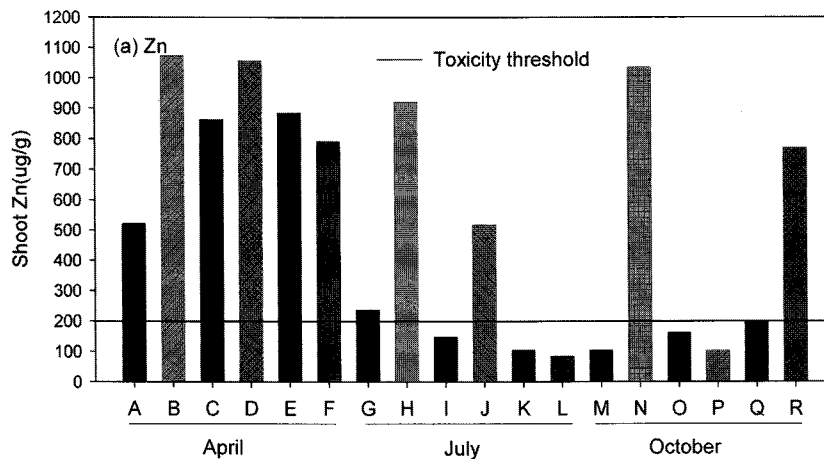


Fig. 1. Zn concentration of native plants at Sambo mine.

Table 5. AF and TF values of native plants (Sambo mine)

Month	Sample	Scientific name	Accumulation Factor*	Translocation Factor**
April	A	<i>Galium spurium</i>	0.57	1.05
	B	<i>Capsella bursa-pastoris</i>	2.20	3.46
	C	<i>Alopecurus aequalis</i>	1.21	0.30
	D	<i>Equisetum arvense</i>	1.85	0.76
	E	<i>Stellaria aquatica</i>	0.59	0.43
	F	<i>Artemisia princeps</i>	0.15	1.10
July	G	<i>Setaria viridis</i>	0.12	0.51
	H	<i>Persicaria thunbergii</i>	0.62	1.60
	I	<i>Commelina communis</i>	1.04	0.41
	J	<i>Impatiens textori</i>	0.96	0.78
	K	<i>Portulaca oleracea</i>	0.42	0.68
	L	<i>Humulus japonicus</i>	0.13	-
October	M	<i>Erigeron annuus</i>	0.44	1.05
	N	<i>Youngia sonchifolia</i>	1.10	4.34
	O	<i>Digitaria sanguinalis</i>	0.56	0.18
	P	<i>Aster yomena</i>	0.77	1.16
	Q	<i>Miscanthus sinensis</i>	1.83	1.50
	R	<i>Elsholtzia ciliata</i>	0.87	1.10

* Accumulative factor = Plant metal conc./Soil metal conc.

** Translocation factor = Shoot metal conc./Root metal conc.

달랐다. 즉 봄에는 6종 모두, 여름에는 강아지풀(*Setaria viridis*), 고마리, 물봉선(*Impatiens textori*) 3종이었으며 가을에는 고들빼기와 향유만이 독성임계치를 넘는 것으로 나타났다. 이 결과를 분석해보면 생체량이 큰 벼과보다는 상대적으로 작은 국화과 식물내 아연의 함량이 높은 것을 알 수 있었다. 여기에 표시한 독성임계치(toxicity threshold) 값은 Chang et al.(2005)의 연구를 참고하였다. 토양에서 지상부로 이동한 아연의 비율을 Accumulation Factor(이하 AF, Wong et al., 1999), 뿌리에서 지상부로 이동한 아연의 비율을 Ttranslocation Factor(이하 DF, Deng et al., 2004)로 나타내었으며, 그 값은 Table 5와 같다. 아연에 대한 AF는 고들빼기와 쇠뜨기(*Equisetum arvense*)에서 각각 2.20과 1.85로 높게 나타났으며, 억새(*Miscanthus sinensis*)에서 1.83, 냉이가 1.10의 순이었다. TF는 냉이가 4.34로 가장 높았고, 다음으로 고들빼기 3.46, 억새 1.50 순이었다. 중금속의 축적 및 지상부 제거를 위해서는 AF가 1.0 이상이고 TF가 높을수록 적합한 종이라 할 수 있다. 삼보광산 계열별 자생식물내 중금속의 AF 및 TF로 판단하면, 냉이, 억새, 고들빼기가 대상이 된다. 그러나, 냉이는 한철 식물이며 생체량이 작아 적합하지 않고, 고들빼기 역시 생체량이 작아 어려움이 있을 것으로 판단된다. 억새는 생체량도 크고 봄철부터 지속적으로 성장하는 고생체식물이지만, 축적하는 아연의 농도가 높지 않고, AF

및 TF의 값도 그다지 크지 않은 것이 단점이라고 할 수 있다. 또한, 농경지를 대상으로 할 경우, 정화 후 뿌리를 제거하는 데 문제가 있을 것으로 사료된다.

3.2. 산양광산 결과

양광산에서 채취한 식물종 내 Cd, Cu, Pb 및 Zn 등의 중금속 농도를 식물의 부위별 및 식물 근권토양으로 분리하였고 중금속의 농도 범위를 요약하여 Table 6에 나타내었다. 산양광산에서도 채취 장소에 따라 토양의 중금

Table 6. Heavy metal concentration of soil and plants (Sanyang mine) (unit : mg/kg)

Heavy metal	Month	Above root	Root	Soil
Zn	March	65.3~132.2	49.7~409.7	97.4~127.7
	May	55.2~258.1	49.8~86.6	86.1~100.0
	July	55.4~207.3	63.7~175.9	77.9~158.6
Cu	March	13.3~27.8	6.6~13.9	19.9~30.9
	May	7.3~21.4	9.1~24.6	13.2~24.4
	July	9.0~20.6	10.7~23.7	14.5~21.2
Cd	March	7.6~15.5	6.4~33.5	0.1~3.0
	May	0.4~13.3	1.7~10.2	0.2~2.3
	July	1.0~4.5	1.7~43.0	0.4~5.7
Pb	March	17.6~44.1	44.9~75.0	16.3~47.9
	May	2.3~5.6	6.8~60.1	15.0~32.6
	July	2.5~6.0	4.5~47.7	19.2~323.9

속 농도범위가 매우 컸으며, 최대값/최소값의 비가 Cd와 Pb의 경우 각각 10배 및 25배 이상 차이가 났다. 특히 7월에 채취한 닭의장풀 근권토양에서 납이 323.9 mg/kg으로 나타났다. 그러나 닭의장풀(*Commelina communis*)에서의 농도는 높지 않았다. 토양 및 식물체내 중금속의 농도를 일목요연하게 비교하기 위해 AF 및 TF의 값을 산정하고 Table 7에 요약하였다. 3월에 채취한 자생식물 물잔디(*Alopecurus aequalis*)와 쇠별꽃(*Equisetum arvense*)의 AF가 최소 5.17에서 최고 136.0으로 매우 크게 나타났다. 이와 같은 이유는 봄철은 식물의 성장이 시작되는 단계로 활발한 뿌리 흡수작용이 발생한 반면, 어린식물이므로 생체량이 작았기 때문으로 판단된다. 동일한 경향이 삼보광산에서도 관측되었다. 일반 식물의 중금속 원소별 TF는 Table 8과 같다. Cd의 채소에 대한 생물학적 이용도(bioavailability)가 가장 높으며(TF = 0.223), Pb가 가장 낮다(TF = 0.0016). 그러나 오염토양에서는 생물학적 이용

가능 중금속의 분율이 증가하므로 높은 TF값이 관찰된다(Adriano, 2001). Cu의 경우에 냉이 TF가 2.41로 가장 높고, 쑥 AF가 1.62로 높았고 TF도 1.0 이상으로 나타났다. Zn의 경우는 환삼덩굴, 고마리, 강아지풀, 명아주, 여뀌가 AF 및 TF가 1.0 이상으로 나타났고 그중에서 고마리의 TF가 2.98로 가장 높은 것으로 나타났다. 봄철 어린식물을 제외한 Cd의 AF 및 TF값을 비교하면, 고마리가 AF 9.5로 매우 높으나 TF는 0.7로 아주 낮았다. 쑥은 AF 8.87로 매우 높았고 TF도 2.42로 높게 검출되었다. 소리쟁이는 AF 4.0, TF 1.41로 나타났는데, 소리쟁이의 경우 식물생체량도 크고 잘 자라므로 Cd의 식물상 복원에 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 납은 저유동성으로 인해 쇠비름(*Portulaca oleracea*)에서만 TF가 1.00으로 나타났고, 다른 모든 식물에서는 TF값이 1.0 이하가 되었다. AF의 경우에도 봄철 어린식물에서만 1.0을 상회하고 5월 및 7월에는 모두 낮게 검출되었다.

Table 7. AF and TF of native plants (Sanyang mine)

Month	Sample	Scientific name	Cu		Zn		Cd		Pb	
			AF	TF	AF	TF	AF	TF	AF	TF
March	A	<i>Galium spurium</i>	0.67	2.41	0.66	0.92	12.56	0.93	1.75	0.60
	B	<i>Capsella bursa-pastoris</i>	0.76	1.34	0.96	0.63	5.17	0.46	0.75	0.53
	C	<i>Alopecurus aequalis</i>	0.57	1.01	1.30	0.32	97.00	0.98	1.84	0.40
	D	<i>Equisetum arvense</i>	0.59	1.17	0.94	0.74	49.00	1.02	1.06	0.26
	E	<i>Stellaria aquatica</i>	0.80	1.78	0.81	1.58	10.86	1.19	1.58	0.62
	F	<i>Artemisia princeps</i>	0.60	1.34	1.09	1.48	136.00	1.45	1.33	0.45
May	G	<i>Setaria viridis</i>	0.58	0.81	2.75	2.98	9.50	0.70	0.25	0.29
	H	<i>Persicaria thunbergii</i>	0.95	0.83	0.66	1.15	0.96	0.39	0.13	0.56
	I	<i>Commelina communis</i>	0.36	0.72	0.77	0.85	3.75	0.29	0.16	0.06
	J	<i>Impatiens textori</i>	0.51	1.22	0.67	1.15	4.00	1.41	0.10	0.34
	K	<i>Portulaca oleracea</i>	0.44	0.79	0.56	0.79	0.80	0.06	0.14	0.34
	L	<i>Humulus japonicus</i>	1.62	1.45	0.86	1.02	8.87	2.42	0.29	0.35
July	M	<i>Erigeron annuus</i>	0.50	0.64	1.31	1.71	0.83	0.44	0.05	0.36
	N	<i>Youngia sonchifolia</i>	0.68	0.86	0.49	0.87	0.29	0.31	0.11	0.50
	O	<i>Digitaria sanguinalis</i>	0.44	0.48	0.67	0.60	0.18	0.02	0.02	0.13
	P	<i>Aster yomena</i>	0.66	1.10	1.33	1.56	3.17	1.12	0.11	0.45
	Q	<i>Miscanthus sinensis</i>	1.20	0.87	0.93	0.89	2.50	0.34	0.23	1.00
	R	<i>Elsholtzia ciliata</i>	0.68	0.51	1.12	1.16	3.33	0.17	0.24	0.47

Table 8. Heavy metal concentration in soil and TF value in plant (unit : mg/kg)

Heavy metal	Concentration in soil		Translocation Factor		
	Range	Average	Fruit	Vegetable	Root
As	0.1~40	6	0.004	0.037	0.004
Cd	0.01~2	0.35	0.036	0.223	0.008
Pb	1~300	19	0.002	0.0016	2 × 10 ⁻⁵
Hg	0.01~0.5	0.06	0.085	0.009	0.002
Se	0.01~1.2	0.4	0.002	0.015	0.042

Table 9. Zn concentration in different plants (unit : mg/kg)

Plants	Sampling	Aerial part	Root	Soil	AF/TF
Capsella bursa-pastoris	Sambo mine	1,073.6	310.0	488.9	2.20/3.46
	Sanyang mine	65.3	70.7	98.8	0.66/0.92
	Urban mine (Aksoy et al. 1999)	200	-	576	0.34/ -
Commelina communis	Sambo mine	148.2	361.8	142.4	1.04/0.41
	Sanyang mine	106.2	175.9	158.6	0.67/0.60
	Zn-Pb mine (Wei et al. 2008)	168.5	152.2	619.2	0.27/1.11
Portulaca oleracea	Sambo mine	105.3	155.2	249.9	0.42/0.68
	Sanyang mine	72.5	81.2	77.9	0.93/0.89
	Zn-Pb mine (Wei et al. 2005)	73.1	129.8	518.1	0.14/0.56

3.3. 자생식물의 광산별 중금속 흡수량 비교

삼보광산과 산양광산에서 채집된 식물종에 대하여 AF와 TF를 비교하면 Table 9와 같다. 냉이(*Capsella bursa-pastoris*)의 아연 AF 및 TF는 삼보광산에서 2.20/3.46으로 나타났으며, 산양광산에서는 0.66/0.92이었다. 아연 흡수에 대한 결과를 고찰할 때, 동일 식물종이 삼보광산에서 효과적이었으나 산양광산에서는 효과가 없는 것으로 나타났다. 또한 닭의장풀(*Commelina communis*) AF 및 TF에서도 삼보광산은 1.04/0.41로 나타났으며, 산양광산에서는 0.67/0.60으로 차이를 보였다. 쇠비름(*Portulaca oleracea*)의 경우에도 AF/TF는 삼보광산 0.42/0.68, 산양광산 0.93/0.89로 차이를 보여, 동일한 식물종이 자생위치 및 오염중금속 종에 따라 축적도가 다르게 나타났다.

4. 결 론

토착 자생식물을 이용한 토양오염 복원방법은 끈질긴 생명력과 번식력을 이용한 최소한의 노력과 비용으로 가장 친환경적으로 오염물질을 제거할 수 있는 식물상 토양오염 복원방법이다. 삼보광산에서 확인된 토착 자생식물 중 중금속 제거에 적합한 종은 냉이, 억새, 고들빼기로 확인되었다. 그러나 냉이는 한철 식물이며 생체량이 작아 적합하지 않고, 고들빼기 역시 생체량이 작아 어려움이 있을 것으로 판단된다. 억새는 생체량도 크고 봄철부터 지속적으로 성장하는 고생체식물이지만, 축적하는 아연의 농도가 높지 않고, AF 및 TF의 값도 그다지 크지 않은 것이 단점이라고 할 수 있다. 또한, 농경지를 대상으로 할 경우 정화 후 뿌리를 제거하는 데 문제가 있을 것으로 사료된다. 산양광산에서는 Cd에 대해 소리쟁이의 AF 4.0, TF 1.41이고 식물생체량도 크고 잘 자라므로 Cd의 제거에 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구지역에서 확인된 중금속 과축적종은 냉이, 억새, 고들빼기, 환삼덩굴,

고마리, 강아지풀, 명아주, 여뀌 등으로 조사되었다. 그러나 동일 식물종이 광산별로 AF 및 TF가 큰 차이를 보이는 원인에 대해서는 본 연구 자료로서 토의하기에 충분하지 못하였다. 따라서 이의 규명을 위한 연구 및 향후 효과적인 현장적용을 위해서 더욱 다양한 자생식물과 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 환경부의 “토양지하수복원관리 환경기술교육 혁신지원사업단”과 “유해중금속오염부지정화기술개발연구단” 지원을 받은 과제입니다.

참 고 문 헌

- 양재의, 정덕영, 김동진, 임경제, 김휘중, 김수정, 이진용, 2006, 삼보광산 광미 및 침출수 처리방안 연구, 광해방지사업단, p. 390-393.
- Adriano, D.C., 2001, Trace Elements in Terrestrial Environments: Biochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals, 2nd edition, Springer-Verlag, New York.
- Aksoy, A., W.H.G. Hale and J.M. Dixon, 1999, *Capsella bursa-pastoris* (L). Medic. as a biomonitor of heavy metals, *The Science of Total Environment*, **266**, 177-186.
- Baek, K.H., Kim, H.H., Bae, B.H., Chang, Y.Y. and Lee, I.S., 2005, EDTA-assisted phytoextraction of lead-contaminated soils by *Echinochloa crusgalli* var. *frumentacea*, *J. Environmen. Biol.*, 151-154.
- Baker, A.J.M., McGrath, S.P., Reeves, R.D. and Smith, J.A.C., 1998, Metal Hyperaccumulator Plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for Phytoremediation of metalpolluted soils. In Terry N, Banuelos GS(eds.) Phytoremediation, Ann Arbor Press, Ann arbor, MI.

- Cao, X., Ma, L.Q., Chen, M, Singh, S.P., and Harris, W.G., 2002, Impacts of phosphate amendments on lead biogeochemistry in a contaminated site, *Environmental Science and Technology*, **36**, 5296-5304.
- Chang, P., Kim, J.Y. and Kim K.W., 2005, Concentrations of arsenic and heavy metals in vegetation at two abandoned mine tailings in South Korea, *Environmental Geochemistry and Health*, 109-119.
- Deng, H., Ye, Z.H., and Wong, M.H., 2004, Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in china, *Environmental pollution*, 29-40.
- Wei, S., Qixing, Z., Hong, X., Chuanjie, Y., Yahu, H., and Liping, R., 2008, Hyperaccumulative property comparison of 24 weed species to heavy metals using a pot culture experiment, *Environmental Monitoring and Assessment*, DOI
- Wei, S., Qixing, Z., and Xin, Wang., 2005, Identification of weed plants excluding the uptake of heavy metals, *Environment International*, **31**, 829-834.
- Wong, H.K.T., Gauthier, A., and Nriagu, J.O., 1999, Dispersion and toxicity of metals from abandoned gold mine tailings at Goldenville, Nova Scotia, Canada, *The Science of the total environment*, 35-47.