

Evaluation of the Feasibility of Phytoremediation of Soils Contaminated with Cd, Pb and Zn using Sunflower, Corn and Castor plants

Mi Jin Chae*, Goo-Bok Jung¹, Seong Soo Kang, Myung Suk Kong, Yoo Hak Kim, and Deog Bae Lee

Division of Soil and Fertilizer

¹*Climate Change and Agroecology Division, NAAS, RDA, Wanju, 565-851, Korea*

(Received: November 5 2014, Revised: November 24 2014, Accepted: November 25 2014)

Phytoremediation is a technology using plants and associated soil microbes to reduce the concentrations or toxic effects of contaminants in the environments. It is regarded as a cost-effective, efficient, eco-friendly, and solar-driven technology with good public acceptance. This study was conducted to find the plants accumulating heavy metals in soils contaminated with Cd and Pb. Experimental plots (plot size: 0.81 m²) was artificially contaminated using a contaminated soil collected from a field in vicinity of Wondong mine (WD). Sunflower, corn and castor were tested for their potential to remove heavy metals from the contaminated soils. The results indicated that sunflower was most effective in accumulating heavy metals and thus remedying the soils among the three crops. Dry weight and heavy metal uptake of sunflower shoot differed with growth period. For example, the Cd content of shoots including leaf and stem were 0.31 mg, 2.23 mg, and 0.96 mg per plot at 4, 8 and 12 weeks after planting in Cd4-WD treatment; in addition, the dry weight of the shoots in Cd8-WD treatment was reduced due to heavy metal toxicity. This experiment showed that sunflower absorbed Cd, Pb and Zn in their shoots up to 8 weeks of planting; thereafter heavy metals uptake was diminished. This implies that the efficiency of these plants in cleaning the contaminated soils may be high at the early stage of plant growth.

Key words: Phytoremediation, Heavy metals, Sunflower, Mine, Plants, Cadmium, Lead

Heavy metal uptake(mg/0.81m²) by Sunflower at different sampling periods

plots	Cd			Pb			Zn		
	weeks after planting								
	4	8	12	4	8	12	4	8	12
control	0.01	0.04	0.33	0.01	0.04	0.25	2.61	8.21	31.72
0.05 Cd	0.04	0.13	0.13	0.01	0.12	0.29	3.16	16.35	18.76
Cd2-WD	0.19	1.31	0.67	0.34	2.72	0.97	11.77	105.06	34.66
Cd4-WD	0.31	2.23	0.96	0.48	4.23	2.57	16.84	123.92	57.25
Cd8-WD	0.31	1.93	1.21	0.42	3.91	2.18	14.35	96.06	55.99

*Corresponding author : Phone: +82632382440, Fax: +82632383822, E-mail: chmj011@korea.kr

§Acknowledgement: This study was carried out with the support of "Development of agro-environment management for contamination using advanced eco-friendly technology(PJ007515)", National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

중금속 오염기준을 초과한 농지는 광해관리공단에서 휴경을 권고하고, 이로 인한 소득 손실을 보상하고 있지만, 대부분 휴·폐광 2 km 이내 지역에 국한되어 있어, 범위를 벗어난 농지에서는 일상적인 농작물 경작이 이루어지고 있는 상황이다. 중금속 오염지역의 농경지에서 생산되는 농작물의 안전성 문제로 해당지역 농업이 크게 위축되어 있다. 농가 소득의 감소뿐만 아니라 소중한 자원인 토지가 소극적 활용으로 생산성이 떨어지고, 유휴토지의 증가로 이어지고 있다. 앞으로 오염토양에 대한 조사범위가 확대되고 있는 추세로 보아 이에 대한 대책이 시급한 실정이다 (Ministry of Environment, 2010).

중금속으로 오염된 농경지의 복원은 중금속의 농도를 기준치 이하로 낮추는 것인데, 이를 위해서는 외부에서 비오염 토양을 유입하여 기존 토양에 복토하는 방법이 이용될 수 있다. 그러나 이 방법은 넓은 오염 농경지를 복토하기 위해서 필요한 양의 비오염 토양을 확보하는 것과 더불어 많은 비용이 필요하다는 단점이 있다. 또 다른 방법으로는 토양 중 중금속의 안정화를 꾀하여 유효도를 떨어뜨리고 이로 인해서 식물체 이행을 줄이는 방법이다. 그러나 이는 토양 내 중금속 총함량이 줄어드는 것이 아니므로 궁극적으로 오염농경지를 비오염 농경지로 바꾸는 것은 아니다 (K.R. Kim et al, 2010). 오염토양의 복원방법중 기존의 물리·화학적 방법이 고비용 및 2차 오염문제를 야기하고 있어 최근에는 식물을 이용하여 오염물질을 제거하거나 유해하지 않도록 조치하는 기술인 식물재배정화법에 대한 연구가 활발함에도 짧은 시간 안에 정화할 수 없다는 단점이 있어 상업적인 적용이 부진하며, 또한 사후처리기술이 구체적으로 제시되지 않아 결국에는 추가 비용이 발생하는 것으로 인식되고 있다.

식물재배정화법은 바이오매스를 바이오연료로 전환하여 활용할 수 있다는 측면에서 다른 정화기술과 차별화된다. 오염으로 인해 생산성이 저하된 토지를 경제적으로 활용하는 방안으로 바이오연료 식물을 이용한 토양정화기술이 주목을 받고 있다.

본 연구는 중금속으로 오염된 토양을 효과적으로 복원하고 바이오에너지로 활용할 수 있는 종을 선발하여 폐광산 인근 노지에 활용 할 수 있는지를 검토하고자 수행했다.

Materials and Methods

처리 및 시험 작물 재배 시험구 규격은 0.81 m² (0.9 m×0.9 m)로 15개구로 조성하였으며, 일반토양으로 논토양에 하천 모래와 점토 성분의 산흙을 적절히 혼합하여 사양토를 인위적으로 만든 후 원동 (Wondong, WD) 폐광산 오염 토양으로 시험구당 Cd농도별로 오염시켰다. Cd 농도는 무처리, Cd-2, Cd-4, Cd-8 mg/kg으로 조절하였으며, 조절용 토양의 이화학성 특성 및 중금속 함량은 Table 1, 2와 같다. 토양복원용 식물 선발 중으로 하계작물인 해바라기, 옥수수, 아жу까리를 식재하여 2011년 5월부터 9월까지 단 반복 동시 재배하였다. 그 다음해에는 생육시기별 중금속의 흡수량을 비교하기 위해 해바라기를 3반복으로 파종하여 2012년 5월부터 7월까지 4주 간격으로 시료를 채취하였다.

시료의 채취 및 전처리 토양시료 채취는 각 시험구에서 총 3개의 토양시료를 채취한 후 하나의 시료로 균일하게 혼합하였다. 채취한 토양은 풍건한 후 2 mm 체로 걸러서 분석에 이용하였다. 식물은 시험구당 3개의 주를 선발하고 지상부만을 혼합하여 하나의 시료로 사용하였다. 식물체는 수확한 시료를 물과 증류수로 세척하여 잘게 썰어 비닐하우스내에서 1차 건조하고 건조기내에서 2차 건조하여 분쇄기로 갈아 분석시료로 사용하였다.

시료의 분석 토양의 화학성분 분석은 토양화학분석법 (NAAS, 2010)에 준하여 pH (1:5)는 pH-meter법 (Thermo Orion 920A), 유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법을 이용하였다. 토양의 중금속 분석은 토양오염공정시험방법에 준하여 왕수분해한 후 분석용 시료로 이용하였다. 식물체의 중금속 총 함량은 Microwave기기로 압력 130 psi에서 분해하여 분석용 시료로 이용하였다. 전처리한 토양 및 식물체의 화학성분, 카드뮴, 납 및 아연 정량은 ICP-OES (GBC integra XI)를 이용하여 측정하였다. 토양의 유효인산은 발색시킨 후 흡광광도계 (Hitachi, U-3000)를 이용하여

Table 2. Heavy metal content of mine soils used for the experiment.

mine soils	Cd	Pb	Zn
wondong	272	8,176	9,320

Table 1. Physico-chemical properties of the soil used in the experiment.

soil	pH (1:5)	OM g kg ⁻¹	Av.P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹	Sand %	Silt %	Caly %	Cd mg kg ⁻¹	Pb mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹
	5.4	40.3	123	59	30	11	2.04	56.6	64.7

비색 정량하였다.

Results and Discussion

중금속 오염토양에 대한 식물학적복원에 적합한 식물종 탐색을 위하여 고농도의 중금속으로 오염된 광산토를 처리한 시험구에서 재배한 공시식물의 생체량 및 건물량은 Table 3과 같다. 식물별 총 건물량은 옥수수>아주까리>해바라기 순으로 높게 나타난 반면 무처리구와 중금속 처리구별 건물량은 큰 차이는 없었다. 바이오매스 작물의 중금속 흡수량을 분석한 결과, 고농도의 Cd8-WD 시험구에서 카드뮴의 흡수는 옥수수>해바라기>아주까리 순이었고, 납은 옥수수>해바라기>아주까리 순이었으며, 아연은 해바라기>옥수수>아주까리 순으로 높았다. 또한 토양내 중금속 함량이 높을수록 식물로서 이행도 높아짐을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과를 종합해 볼 때 해바라기는 건물량은 적지만 건물량에 비해 중금속 흡수력이 높아 정화식물로서 적당하

며 미래의 바이오에너지 전환 및 경관식물로서의 활용도 기대되는 식물이다.

중금속 축적종 바이오매스 작물로 선정된 해바라기를 4주 간격으로 식물지상부를 조사한 결과, 무처리구와 Cd8-WD 처리구에서 21 g, 13 g으로 초기 생체량이 무처리구가 Cd8보다 약 2배정도 높았다 (Table 5). 그러나 8주에서 12주로 가면서 광산토로 처리된 시험구는 무처리구보다 생체량이나 건물량이 높았으며 처리 농도에 따라서는 생체량은 크게 차이가 없었으나 Cd8-WD처리구에서 건물량이 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 무처리구와 중금속 처리구의 토양화학성을 조사한 결과 pH는 6.0~7.0, 토양유기물은 20~30 g kg⁻¹, 유효인산은 300~550 mg kg⁻¹로 토양조건이 식물이 자라기 위한 적정 범위에 있다면 고농도의 중금속 오염이 된 지역이라도 식물 생육이 가능하다는 결론을 내릴 수 있다.

Table 6은 해바라기 생육시기별 식물지상부의 중금속 흡수량을 비교하였다. 12주 해바라기의 지상부의 카드뮴 (mg/0.81 m²)은 무처리, 0.05Cd, 2Cd-WD, 4Cd-WD, 8Cd-WD 처리 시험구에서 각각 0.33, 0.13, 0.67, 0.96, 1.21 mg이었 고 카드뮴 12주를 제외한 모든 생육시기에서 카드뮴, 아연, 납의 함량이 증가하다가 Cd8-WD에서 감소하는 경향을 보였다. 이는 Cd8-WD시험구가 다른 시험구들보다 건물량이 적기 때문에 건물량이 고려된 계산에서 중금속 제거량이 감소된 것으로 판단된다.

생육시기별 처리구 (0.81 m²)에 따른 중금속 흡수량을 비교하면 식물의 성장함에 따라 Cd 흡수량이 4, 8, 12주에 무처리구는 0.01, 0.04, 0.33 mg로, 0.05Cd처리구에서는 0.04, 0.13, 0.13 mg로 증가하였다. 반면, Cd2-WD 처리구 (0.81

Table 3. Fresh and dry weight of plants grown under the different heavy metals treatment (g/0.81m²).

Treatments	Corn		Sunflower		castor	
	Fresh weight	Dry weight	Fresh weight	Dry weight	Fresh weight	Dry weight
Control	2,094	516	942	176	1,842	378
0.05 Cd	1,486	380	692	114	2,196	400
Cd2-WD	2,194	648	559	124	2,976	570
Cd4-WD	2,936	872	790	132	958	194
Cd8-WD	2,080	582	918	136	1,884	366

Table 4. Heavy metal uptake of summer plants with the treatments (unit: mg/0.81m²).

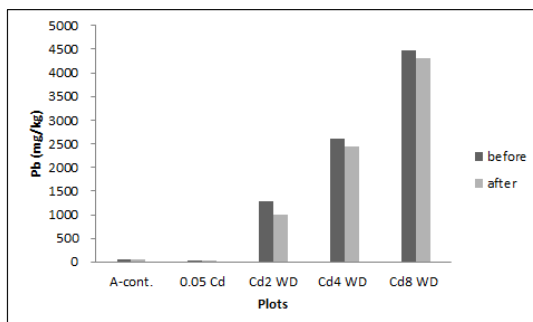
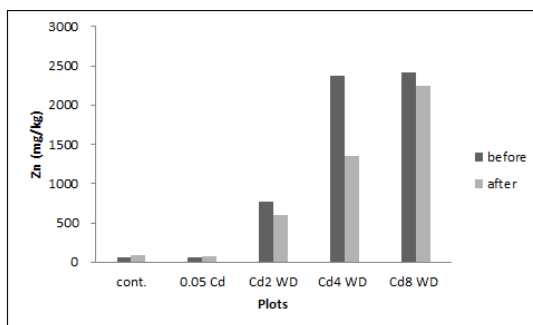
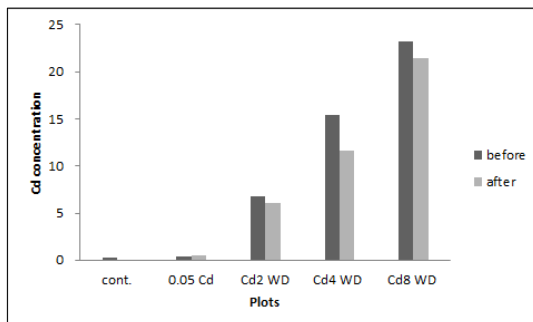
Treatments	Corn			Sunflower			castor		
	Cd	Pb	Zn	Cd	Pb	Zn	Cd	Pb	Zn
Control	0.00	0.34	10.40	0.02	0.20	6.51	0.01	0.32	10.41
0.05 Cd	0.01	0.37	6.34	0.06	0.12	5.64	0.04	0.22	9.22
Cd2-WD	0.14	2.29	17.66	0.20	2.22	18.97	0.09	1.40	21.40
Cd4-WD	0.52	6.48	67.89	0.36	2.45	22.56	0.12	1.97	10.74
Cd8-WD	0.59	11.36	35.37	0.54	4.52	36.79	0.16	1.56	21.88

Table 5. Fresh and dry weight in Sunflower at different sampling periods (g/0.81m²).

Treatments	4 weeks		8 weeks		12 weeks	
	Fresh weight	Dry weight	Fresh weight	Dry weight	Fresh weight	Dry weight
Control	149	21	1533	73	1552	241
0.05 Cd	176	25	1384	157	1726	243
Cd2-WD	198	25	964	185	1592	285
Cd4-WD	174	22	801	194	1437	258
Cd8-WD	103	13	1839	126	1485	228

Table 6. Heavy metal uptake by Sunflower at different sampling periods (unit: mg/0.81m²).

Treatments	Cd			Pb			Zn		
	Weeks after planting								
	4	8	12	4	8	12	4	8	12
Control	0.01	0.04	0.33	0.01	0.04	0.25	2.61	8.21	31.72
0.05 Cd	0.04	0.13	0.13	0.01	0.12	0.29	3.16	16.35	18.76
Cd2-WD	0.19	1.31	0.67	0.34	2.72	0.97	11.77	105.06	34.66
Cd4-WD	0.31	2.23	0.96	0.48	4.23	2.57	16.84	123.92	57.25
Cd8-WD	0.31	1.93	1.21	0.42	3.91	2.18	14.35	96.06	55.99

**Fig. 1. Differences in heavy metal contents of the soil before and after the harvest**

m²에서는 0.19, 1.31, 0.67 mg, Cd4-WD는 0.31, 2.23, 0.96 mg, Cd8-WD는 0.31, 1.93, 1.21로 Cd8-WD를 제외한 두 처리구에서 8주가 가장 높은 중금속 흡수를 보이다가 12주에 감소하는 경향을 보였다. 식물 이행지수 (Khairia M. A., 2012)가 낮은 Pb와 Zn에서도 Cd와 비슷한 경향을 보였다. 이러한 결과를 종합해 볼 때, 중금속 흡수의 효율성을 최대화할 수 있는 방법은 식물의 장기 재배보다는 식물성장

초기를 고려한 재배법을 이용하는 것이 좋을 것으로 판단되었다 (J. K. Adesodun et al., 2010).

해바라기 12주후 수확하여 수확 전 토양내 카드뮴, 아연, 납이 얼마나 제거되었는지를 확인하였다 (Fig. 1). 카드뮴은 Cd2-WD, Cd4-WD, Cd8-WD 처리구에서 10, 24, 8% 제거되었고, 아연은 22, 43, 7%, 납은 21, 6, 4% 제거율을 보였다. 이러한 차이를 보인 이유는 처리구별 건물량 및 토양내 중금속 존재 형태에 따라 차이를 보인 것으로 판단된다. 처리에 이용된 광산토를 이용해 연속침출법을 실시하여 중금속들의 존재형태를 조사한 결과, 카드뮴은 다른 중금속에 비해 교환성형태 (exchangeable)와 환원성형태 (Oxidizable)가 가장 높게 존재하였고, 납은 교환성형태 (exchangeable)가 다른 중금속에 비해 가장 낮은 경향을 보였다 (Yun et al., 2010). 따라서 교환성형태가 많은 카드뮴은 식물로서 이행이 다른 중금속보다 높으며 교환성형태가 적은 납은 반대로 식물로서 이행이 낮아 중금속 제거능에 차이를 보인 것으로 판단된다.

Conclusions

오염으로 인해 생산성이 저하된 토지를 경제적으로 활용하는 방안으로 바이오연료 식물을 이용한 토양정화기술이 주목을 받고 있다. 본 연구에서 해바라기가 중금속으로 오염된 토양을 효과적으로 복원하고 바이오에너지로도 활용할 수 있는 바이오매스로 조사되었다. 생육시기별 처리구에 따른 중금속 흡수량을 비교하면 무처리구와 저농도 처리구에서는 식물이 성장함에 따라 중금속 흡수량이 증가하는 반면 고농도 처리구에서는 8주가 가장 높은 중금속 흡수를 보이다가 12주에 가서는 감소하는 경향을 보였다. 해바라기의 개화소요 일수 (45~60일)를 고려하여 중금속 오염지에 해바라기 2기작을 재배하여 중금속 흡수를 최대화하여 경관 작물로서 각광을 받고 있는 해바라기를 폐광산 인근 노지에 활용함으로써 중금속 오염지를 자연친화적으로 복원하고 향후 수확된 중금속 흡수작물을 바이오에너지로 전환할 수 있어 미래 에너지 활용도 기대된다.

References

- Dilek, B. and Y.B. Kurtulus. 2011. Comparison of Extraction Procedures for Assessing Soil Metal Bioavailability of to Wheat Grains. *Clean-soil, Air, Water*. 39(8):728-734.
- Hazrat A., Ezzat K. and Muhammad A. S., 2013. Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications. *Chemosphere* 91:869-881.
- Jung, G.B. and W.I. Kim. 2000. Studies on the Phytoextraction of Cadmium and Lead Contaminated Soils by Plants Cultivation. *Korean Journal of Environmental Agriculture*. 19(3):213-217.
- Johnson, K. A., M.O. Atayese and T.A. Agbaje. 2010. Phytoremediation Potentials of Sunflowers (*Tihonia diversifolia* and *helianthus annuus*) for Metals in soils Contaminated with Zinc and Lead Nitrates. *Water Air Soil Pollut.* 207:195-201.
- Kim, H.S. and S.I. Choi. 2008. Effects of HCl and EDTA on Soil Washing to Remediate Lead-contaminated Soil in a Firing Range. *J. Korean Sci. Soil and Ground Water Envir.* 13(1): 60-66.
- Kim, K.R., J.S. Park and J.G. Kim. 2010. Changes in Heavy Metal Phytoavailability by Application of Immobilizing Agents and Soil Cover in the Upland Soil Nearby Abandoned Mining Area and Subsequent Metal Uptake by Red Pepper. *Korean J. Soil Sci. Fertil.* 43:864-871.
- Kim, R.Y. and J.S. Lee. 2010. Accumulation, Mobility and Availability of Copper and Zinc in Plastic Film House Soils Using Speciation Analysis. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(6): 937-944.
- Kim, R.Y. and J.E. Yang. 2014. Changes in Changes in Phytoavailability of Cadmium, Copper, Lead and Zinc after Application with Eggshell in Contaminated Agricultural Soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 47(1):41-47.
- Khairia M. A. 2012. Assessment of Heavy Meatal Accumulation in Native Plant Species from Soils Contaminated in Riyadh City, Saudi Arabia. *Life Science Journal* 9(2):384-392.
- Ministry of Environment, 2010. Plan of standardization and competitiveness for activation of soil remediation industry. NAAS(National Academy of Agricultural Science). 2010. Methods of Soil Chemical Analysis.
- Niu, Z.X. and Sun, L.N. 2007. Evaluation of Phytoextracting Cadmium and Lead by Sunflower, Ricinus, Alfalfa and Mustard in Hydroponic Culture. *Journal of Environmental Sciences.* 19:961-967.
- Yun, S.W. and Jin, H.G. 2010. A Comparison on the Effect of Soil Improvement Methods for the Remediation of Heavy Metal Contaminated Farm Land Soil. *J. Korean Geol. Soc.* 26(7):59-70.