

장군광산 광미 토양으로부터 아카시아의 중금속 전이에 관한 연구

Heavy Metal Uptake of Acacia from Tailing soil in Abandoned Janggun Mine, Korea

정 흥 윤(Hong-Yun Jeong)¹ · 김 영 훈(Young-Hun Kim)² · 김 정 진(Jeong-Jin Kim)^{3*}

¹한국원자력연구원

(Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea)

²안동대학교 환경공학과

(Department of Environmental Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea)

³안동대학교 지구환경과학과

(Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea)

요약 : 장군광산은 과거 갱도채굴한 폐금속광산으로 위치는 N36° 51'31.59", E129° 03'38.91"에 위치하고 있다. 산사면에 적치해 놓은 광미 적치장은 상부에 오염되지 않은 토양으로 약 20 cm 정도 복토한 후 아카시아를 식재해 놓은 상태이다. 광미 적치장에 식재해 놓은 아카시아는 대략 15년생 정도이다. 광미 적치장에서 채취한 토양시료의 중금속 농도는 As (66.43-9325.34 mg/kg), Cd (0.96-1.09 mg/kg), Cu (16.90-57.60 mg/kg), Pb (57.33-945.67 mg/kg), Zn (154.48-278.61 mg/kg)으로 비오염 토양인 대조군의 As (38.98 mg/kg), Cd (0.42 mg/kg), Cu (10.26 mg/kg), Pb (8.21 mg/kg), Zn (46.74 mg/kg) 보다 훨씬 높다. 가장 오염도가 높은 토양에 식재된 아카시아의 잎에서의 As, Cd, Cu, Pb, Zn의 농도는 각각 165.95, 0.04, 10.68, 3.18, 48.11 mg/kg이다. 비오염 토양에 식재되어 있는 아카시아의 잎에서의 중금속 농도는 As 1.31mg/kg, Cu 3.90 mg/kg, Pb 0.22 mg/kg, Zn 11.01 mg/kg이다. 아카시아에서의 중금속의 농 집도는 껍질과 잎에서 높으며 심재와 변재에서 낮은 경향을 나타낸다.

주요어 : 광미 적치장, 중금속, 껍질, 변재, 심재

ABSTRACT : Janggun mine (longitude 129° 03' 38.91" Latitude 36° 51' 31.59") had been operated as an underground mine for last few decades. As the part of the remediation process, the surface of tailing dump was covered with uncontaminated soil about 20 cm in depth and acacia trees were planted. Heavy metal uptake of acacia from tailing soil has continued for the past 15 years. Heavy metal concentration ranges of tailing soil that contaminated with As (66.43-9325.34 mg/kg), Cd (0.96-1.09 mg/kg), Cu (16.90-57.60 mg/kg), Pb (57.33-945.67 mg/kg), and Zn (154.48-278.61 mg/kg) have higher than those of control soil As (38.98 mg/kg), Cd (0.42 mg/kg), Cu (10.26 mg/kg), Pb (8.21 mg/kg), Zn (46.74mg/kg). The As, Cd, Cu, Pb and Zn concentrations of leaf of acacia in highly contaminated

*Corresponding author: +82-54-820-5038, E-mail: jkim@anu.ac.kr

tailing dump were 165.95, 0.04, 10.68, 3.18, 48.11 mg/kg, respectively. The metal contents of leaf of acacia tree that obtained from uncontaminated control soil are 1.31 of As, 3.90 of Cu, 0.22 of Pb and 11.01 mg/kg of Zn. It was investigated that in the acacia tree, heavy metals such as As, Cu, Pb and Zn tend to be more highly concentrated in bark and leaf, compared with sapwood and heartwood.

Key words : tailing dump, heavy metal, bark, sapwood, heartwood

서 언

광물찌꺼기는 선광·제련과정에 광체로부터 분리된 고온입자를 가진 광산 폐기물이며 유용광물을 생산하는 과정에 사용되는 수은, 아민, 시안 등 유해약품을 함유하는 광산지역 중금속 오염원 중 하나로 광물찌꺼기에 함유된 유해 중금속(As, Cr, Cd, Pb, Hg, 등)은 공기 중의 산소 및 물과 반응하여 주변지역의 지표수 및 지하수 그리고 토양 등의 오염원이 되고 있다. 광산 폐기물과 갭내수에 의해 광산주변 농경지는 쉽게 오염되며 오염된 농경지에서 생산된 농작물에서 중금속이 검출되며 이러한 농작물을 인간이 섭취함으로써 건강에 유해한 영향을 미칠 수 있다(Park *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2007; Lim *et al.*, 2008).

휴 폐광 지역의 대부분은 피복식물 없이 내대지로 존재하며 유기물함량, 양이온치환능력 등이 낮은 척박한 조건을 가지며 특정 중금속이 기준을 초과하는 지점이 있으며 식물종 중 소나무 아카시아, 쑥과 억새의 빈도가 높다(Kim *et al.*, 1999). 광산 주변 농작물에 대한 중금속 흡수와 생태계에 미치는 영향에 대한 연구로 경산광산 부근의 수질, 토양 및 식생의 중금속 오염에 관한 지화학적 연구를 수행하였다. 연구 결과 비오염지역에 비해 수질시료의 경우 1.5~3배 높게 나타났으며 토양시료의 경우 2~10배 정도 높게 나타났다. 또한 광산부근 자생하는 억새와 쭉레를 조사한 결과 억새의 중금속 함량은 쭉레보다 1.5배~16배 정도 높았다(Lee *et al.*, 1996). 농작물의 경우 비광산 지역에 비해 더 농축된 경향을 보였고, 농축정도는 Zn > Cu > Pb > Cd 순이었고, 식물별 원소의 농축률은 쑥 > 깨 > 나락 > 고추 순이다. 식물 중 중금속 원소의 지구화학적 분산에 관한 연구에서 Pb Cd의 함량은 담배 > 배추 > 고추 > 현미 Zn 배추 > 담배 > 현미 > 고추 Cu 담배 > 고추 > 배추 > 현미 순으로 감소하는 경향이 나타났다(Cho, 1998). 광해지역 토착 자생식물의 중금속 흡수에 관한 연구에 의하면 토

착 자생식물 중 중금속 제거에 적합한 종은 냉이, 억새, 고들빼기이지만 냉이와 고들빼기는 생체량이 작으며 억새는 아연 축적 정도가 높지 않다. 산양 광산의 경우 오염이 높은 것으로 알려진 As에 적합한 식물종을 찾지 못하였으며 Cd의 경우 소리쟁이가 사용될 수 있을 것으로 판단하였다(Choi, 2009). 풍원광산 지역의 토양 및 농작물 연구에 의하면 토양은 Zn, Pb가 기준치를 초과하였으며 농산물의 경우 Cd, Pb가 기준치를 초과하였고, 토양과 농작물의 이격거리별 중금속 평가결과 As, Cd, Zn의 확산성이 높은 것으로 조사되었다(Kim, 2010). 국내 휴폐금속광산 주변의 토양오염과 식물의 유기적 관계 규명에 대한 연구에서 농작물의 중금속 흡수계수는 Cd > Zn > Cu 순으로 감소하였다(Kwon *et al.*, 2012).

외국의 경우 1990년대 중금속을 비롯하여 방사능 물질, 유기화합물 등에 대한 정화식물종의 선발과 정화능의 극대화, 오염현장적용과 관련된 연구(Salt, 1998)들이 진행되고 있으며 벼의 중금속 흡수에 대한 연구를 위해 토양과 벼의 각 부분의 중금속 함량을 측정하고 비교하였고 곡물과 뿌리 그리고 껍질, 잎과 싹에서 중금속 원소 중 Fe와 Mn이 높은 농도로 나타났다(Yap, 2009). 중금속이 인체에 영향을 끼칠 우려가 있어 식물에 함유된 중금속 함량 및 메커니즘 등 독성연구들이 이루어져 왔다(Clemens, 2006).

본 연구에서는 장군광산 광미 적치장에 성장하고 있는 아카시아와 적치장 토양의 중금속 농도를 측정하여 토양으로부터 식물로의 중금속 전이 정도를 파악하고 중금속이 아카시아로 전이될 때 어떤 부위에 농집되는지 규명하고 오염토양 정화 시 식물을 이용할 경우 문제점에 대해 알아보려 한다. 이를 위해 토양은 토양오염공정시험법에 준하여 분석하였으며, 아카시아는 껍질, 변재, 심재, 잎으로 구분하여 마이크로웨이브를 이용한 완전 분해 후 분석을 수행하였다.

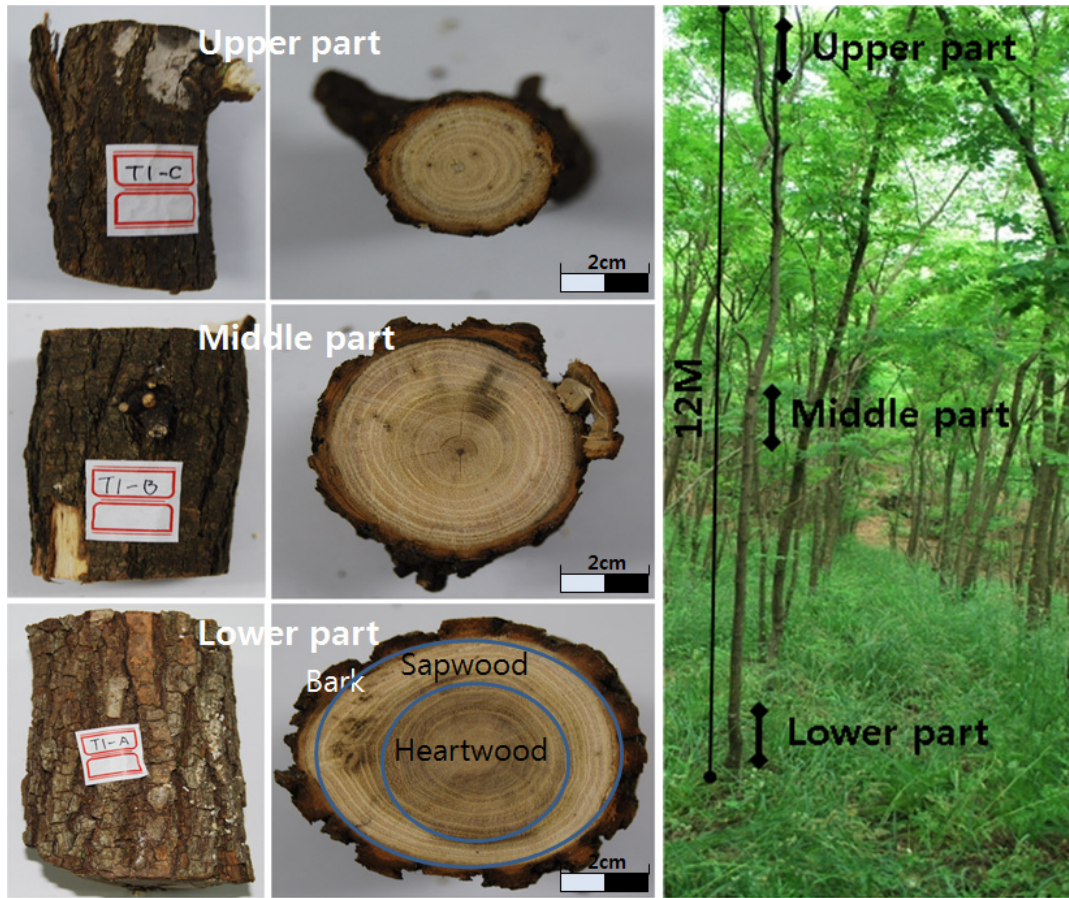


Fig. 1. Cross section of acacia samples and planting in tailing dump. Lower and middle part divide into bark, sapwood and heartwood.

연구지역

본 연구 지역은 장군광산 광미 적치장으로 경상북도 봉화군 재산면 갈산리 및 소천면 서천리 일대에 위치하고 있으며, 지리좌표 E129°03'38.91", N 36°51'31.59"에 위치한다. 장군광산 광미 적치장 상부에는 갯내수가 유출되는 개방된 갯구 1개소가 있으며, 적치장하부 침출수가 지속적으로 유출되고 있으며, 배수로를 통해 주변 소하천으로 유입되고 있다. 적치장 주변은 침출수에 포함된 철 수산화물이 침전되어 도로 및 주변 소하천을 붉게 변색시킨 상태이다. 광미 적치장은 비오염 토양으로 약 20 cm 복토 후 아카시아 나무를 식재해 놓은 상태이다. 식재된 아카시아 나무는 약 15년생 정도로 추정된다.

연구방법

시료 준비

본 연구를 위해 광미 적치장 사면을 따라 아카시아 나무와 그 주변 토양을 함께 채취하였으며, 대조군으로 광산과 관련이 없는 비오염 지역에서 채취하였다. 토양시료의 경우 토양시료 내 중금속 농도와 아카시아나무 시료 내 중금속 농도의 상관성을 알아보기 위해 아카시아나무 채취 지점 주변 토양 S-01, S-02, S-03를 채취하였으며, 대조군으로 비오염 토양 S-04를 준비하였다. 토양시료는 유기물 및 상부 토양을 제거하고 약 30 cm 깊이에서 채취하였다. 채취한 토양시료를 실험실로 운반 및 풍건시켜 눈금간격 0.15 mm (100 mesh)로 체거름한 시료를 분석용 시료로 하였다.

아카시아나무 시료 T-01, T-02, T-03, T-04는 각각

토양시료를 채취한 동일한 지점에서 채취하였으며, 하부(하단: lower), 중간(중단: middle), 상부(상단: upper), 잎(leaf)으로 구분하였다. T-01, T-02, T-03는 광미 적치장에 식재되어 있는 높이 약 15 m, 하부 직경 약 15 cm의 아카시아나무이다. T-04는 오염되지 않은 토양에서 채취한 아카시아나무의 시료로 나무의 크기는 광미 적치장에 식재되어있는 것과 유사하다. 광미 적치장에서 채취한 아카시아나무는 하부와 중간부분은 껍질(bark), 변재(sapwood), 심재(heartwood)로 분리하여 시료를 준비하였다(Fig. 1). 아카시아나무의 상부는 껍질, 심재, 변재로 분리하는 것이 불가하여 전체를 하나의 시료로 제조하였다. 또한 대조군 시료도 전체적이 중금속 분포를 알아보는 목적이기 때문에 껍질, 변재, 심재로 구분하지 않고 각 부분을 하나의 시료로 제조하였다. 광미 적치장에서 채취한 3구루의 아카시아는 하단과 중단부를 껍질, 심재, 변재의 18개 시료 상단, 잎의 6개 시료로 구분하여 24개의 시료를 제조하였으며, 대조군은 하단, 중단, 상단, 잎으로 구분하여 4개의 시료로 총 28개의 식물시료를 준비하였다. 토양은 아카시아가 식재되어있는 지점에서 4개의 시료를 준비하였다.

분석방법

아카시아나무 시료의 경우 중금속분석을 위하여 분쇄한 시료 1 g을 microwave용 테프론 vessel에 넣고 고순도질산 19 ml를 첨가한 뒤 microwave의 추출프로그램을 사용하여 분쇄하였으며 최대온도가 180 ± 5 °C가 되게 하였다. 분쇄가 끝난 용기를 식힌 뒤 0.45 μ m로 여과한 시료를 희석하여 ICP-MS (Elan DRC-e)를 이용하여 분석하였다.

토양 시료는 광미 적치장에 식재된 아카시아의 중금속 흡착의 연관성을 파악하기 위하여 아카시아 나무 시료를 채취한 지점과 동일한 곳에서 채취하였다. 토양시료는 상부 토양을 제거하고 약 30 cm 깊이에서 채취하여 자연 건조시킨 후 눈금간격 0.15 mm (100 mesh)로 체거름 한 시료를 분석용 시료로 준비하였다.

토양시료의 경우 중금속분석을 위하여 건조 및 체거름이 완료된 시료를 1 g 정량하여 microwave vessel에 넣어 왕수로 분쇄하였으며 분쇄가 완료된 용기는 식힌 뒤 여과하여 이를 ICP-AES (Agilent, 720Series) 및 AAS(SpectrAA-220FS)를 활용하여 중금속 함량 분석을 실시하였다.

연구 결과 및 토의

토양 시료

토양시료는 광미 적치장 경사면을 따라 아래쪽(S-01), 중간부근(S-02), 위쪽(S-03) 지점에서 채취하였으며 비오염 지역에서 채취한 대조 시료는 S-04이다. Al의 경우 S-02 시료가 약간 높게 나타나지만 S-01, S-03 및 대조군의 함량 차이가 크지 않다. Table 1과 Fig. 1은 광미 적치장에서 채취한 시료와 대조군 시료에 대한 중금속 분석결과이다. As의 농도는 S-01, S-02, S-03은 각각 105.93 mg/kg, 66.43 mg/kg, 9325.34 mg/kg으로 광미 적치장 상부에서 채취한 S-03시료가 아주 높으며 대조군인 S-04 시료는 38.98 mg/kg으로 광미 적치장 토양에 비해 낮은 값을 나타낸다. Cd는 대조군 시료에서 0.42 mg/kg이며 광미 적치장 시료는 0.86-1.09 mg/kg으로 모든 시료에서 대체로 낮은값을 나타낸다. Cu는 광미 적치장 상부 시료에서 57.60 mg/kg으로 광미 적치장 아래쪽과 중간에서 채취한 시료에 비해 높은 값을 나타내며 대조군 시료는 10.26 mg/kg으로 낮은값을 나타낸다. Fe는 광미 S-03시료에서 높지만 S-01, S-02, S-04시료는 비슷한 농도값을 보여준다. Pb의 경우 광미 적치장 상부시료인 S-03에서 945.67 mg/kg으로 아주 높지만 S-01과 S-02는 각각 62.76 mg/kg과 57.33 mg/kg이며 대조군인 S-04는 8.21 mg/kg으로 아주 낮은 값을 나타낸다. Zn은 광미 적치장 시료는 154-278 mg/kg이며 대조군인 S-4는 46.76 mg/kg으로 아주 낮은 값을 나타낸다. 광미 적치장 시료의 중금속 농도는 광미 적치장 상부에서 채취한 S-03가 As, Cu, Fe, Pb가 아래와 중간 지점에서 채취한 S-01과 S-02에 비해 아주 높은 값을 나타내며 Al, Cd, Zn은 큰 차이를 나타내지 않는다.

대조군 시료는 Al과 Fe의 농도가 광미 적치장 시료와 비슷하지만 그 외 중금속의 농도는 아주 낮은 값을 나타낸다. 각 시료에서 Al과 Fe는 광미에 오염되었을 가능성도 있지만 대조군에서도 높은 값을 나타내는 것으로 보아 배경치에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다.

토양에서 Cu의 농도는 30 mg/kg, Zn은 80-120 mg/kg, Pb 20 mg/kg 이하의 경우 비오염 토양이며 그 이상인 경우 상당히 오염된 토양으로 분류하고 있다(Alloway, 1995). 광미 적치장에서 채취한 토양 시료는 Zn과 Pb는 오염 토양이며 Cu의 경우 T-03가 오염 토양으로 대조군 토양은 비오염 토양으로

Table 1. Heavy metal concentrations in tailing and control soil

Sample No.	Al (mg/kg)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
S-01	17590.55	105.93	1.09	16.90	33856.80	62.76	196.57
S-02	20276.28	66.43	0.86	17.81	31749.78	57.33	154.48
S-03	17429.59	9325.34	0.96	57.60	56701.29	945.67	278.61
S-04 (control)	19844.59	38.98	0.42	10.26	41155.80	8.21	46.74

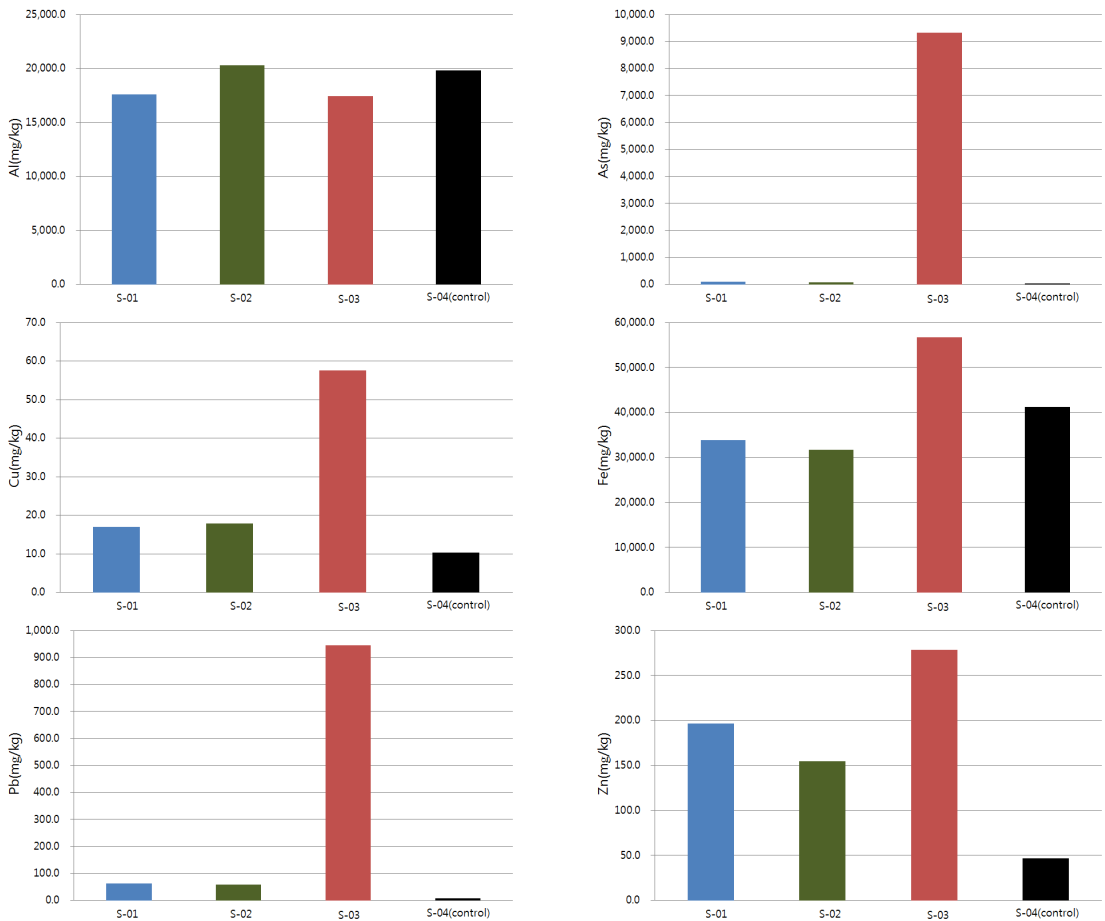


Fig. 2. Heavy metal concentrations in tailing and control soil.

분류할 수 있다.

아카시아 시료

아카시아 시료에 대한 부분별 농도 분석 결과를

Table 2에 정리하였으며 각 부분별 농도 변화를 Fig. 3에 그래프로 비교하였다. T-01 하단의 경우 꺾질부의 중금속 농도는 Al 92.86 mg/kg, As 7.26 mg/kg, Cd 0.37 mg/kg Cu 9.17 mg/kg, Fe 230.51 mg

Table 2. Heavy metal concentrations of acacia samples take from tailing dump and control site

Sample No.	position	part	Al (mg/kg)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Hg (μ g/kg)
T-01	lower	bark	92.86	7.26	0.37	9.17	230.51	20.16	58.44	11.38
		sapwood	1.09	0.20	0.04	1.35	5.56	0.35	21.27	ND
		heartwood	0.29	0.11	ND	0.75	2.08	0.26	0.29	ND
	middle	bark	41.00	3.05	0.09	7.11	85.58	6.65	17.27	15.62
		sapwood	0.54	0.14	ND	0.93	2.95	0.15	12.63	ND
		heartwood	2.12	0.41	ND	0.68	4.38	0.67	ND	ND
	upper	total	7.79	0.45	0.01	1.47	13.81	0.82	11.44	0.48
leaf	total	10.70	7.54	0.02	8.89	76.40	1.12	33.28	11.03	
T-02	lower	bark	40.04	1.79	1.79	5.11	79.49	5.56	13.44	3.04
		sapwood	0.77	0.12	0.01	1.42	3.03	0.35	3.69	ND
		heartwood	1.13	0.20	ND	1.10	3.09	0.37	0.25	ND
	middle	bark	56.71	4.03	0.11	4.43	118.75	7.08	15.36	12.47
		sapwood	0.70	0.32	0.01	0.94	3.38	0.26	2.87	ND
		heartwood	0.54	0.47	ND	0.66	2.40	0.22	0.01	ND
	upper	total	20.56	1.36	0.04	3.01	38.23	2.65	9.93	1.08
leaf	total	5.66	2.34	0.02	9.35	76.59	1.22	34.23	11.57	
T-03	lower	bark	48.09	35.95	0.22	7.83	176.11	10.16	19.59	6.65
		sapwood	0.85	0.37	0.02	1.24	4.45	0.33	6.59	ND
		heartwood	0.40	0.41	ND	1.25	2.48	0.18	ND	ND
	middle	bark	25.20	6.71	0.17	4.86	65.14	4.79	24.57	7.68
		sapwood	0.47	0.18	0.01	0.89	1.76	0.10	11.66	ND
		heartwood	1.90	1.33	0.06	1.78	3.41	2.07	9.86	ND
	upper	total	8.15	10.46	0.06	2.74	42.99	3.18	23.42	0.11
leaf	total	16.96	165.95	0.04	10.68	358.13	3.18	48.11	10.73	
T-04 (control)	lower	total	6.24	0.31	ND	1.03	9.89	0.19	8.23	0.28
	middle	total	21.81	0.45	0.02	1.40	37.28	0.64	3.04	0.52
	upper	total	26.26	0.47	0.03	1.63	43.95	0.91	4.50	0.75
	leaf	total	4.43	1.31	ND	3.90	44.59	0.22	11.01	7.74

*ND: No Detection

/kg, Pb 20.16 mg/kg, Zn 58.44 mg/kg, Hg 11.38 μ g/kg으로 변재와 심재부분보다 높으며, 중간부분의 껍질의 중금속 농도도 Al 41.00 mg/kg, As 3.05 mg/kg, Cd 0.09 mg/kg Cu 7.11 mg/kg, Fe 85.58 mg/kg, Pb 6.65 mg/kg, Zn 17.27 mg/kg, Hg 15.62 μ g/kg으로 변재와 심재부분보다 껍질부분이 중금속 농도가 높게 나타나는 경향을 보인다. 또한 높은 중금속 함량을 보인 중단의 껍질부분이 하단보다 높은 농도를 나타낸 것은 Hg로 대부분의 중금속이 하단의 껍질부분에 더 많이 농집되어 있다. 위의 중금속 농도는 Al 10.70 mg/kg, As 7.54 mg/kg, Cd 0.02

mg/kg Cu 8.89 mg/kg, Fe 76.40 mg/kg, Pb 1.12 mg/kg, Zn 33.28 mg/kg, Hg 11.03 μ g/kg으로 하단 껍질보다 낮지만 중단 껍질에 비해 As, Cu, Zn 등의 함량은 높게 나타난다.

T-02의 경우 하단의 껍질부의 중금속 농도는 Al 40.04 mg/kg, As 1.79 mg/kg, Cd 1.79 mg/kg Cu 5.11 mg/kg, Fe 79.49 mg/kg, Pb 5.56 mg/kg, Zn 13.44 mg/kg, Hg 3.04 μ g/kg으로 변재와 심재부분보다 높은 값을 보이며, 중단의 껍질에서 Al 56.71 mg/kg, As 4.03 mg/kg, Cd 0.11 mg/kg Cu 4.43 mg/kg, Fe 118.75 mg/kg, Pb 7.08 mg/kg, Zn 15.36 mg/kg

장군광산 광미 토양으로부터 아카시아의 중금속 전이에 관한 연구

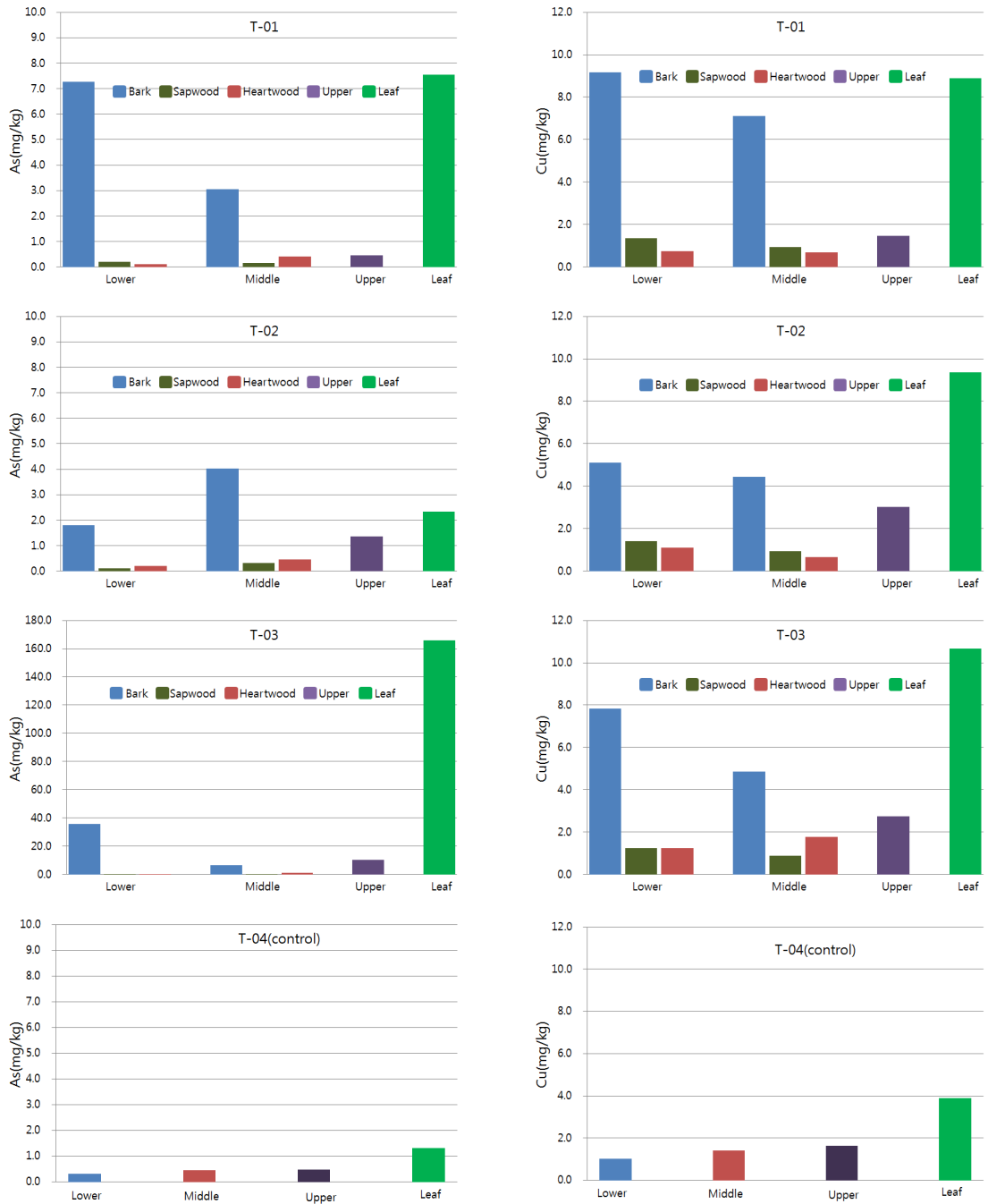


Fig. 3. Variations of heavy metal concentrations with part of acacia samples take from tailing dump and control site.

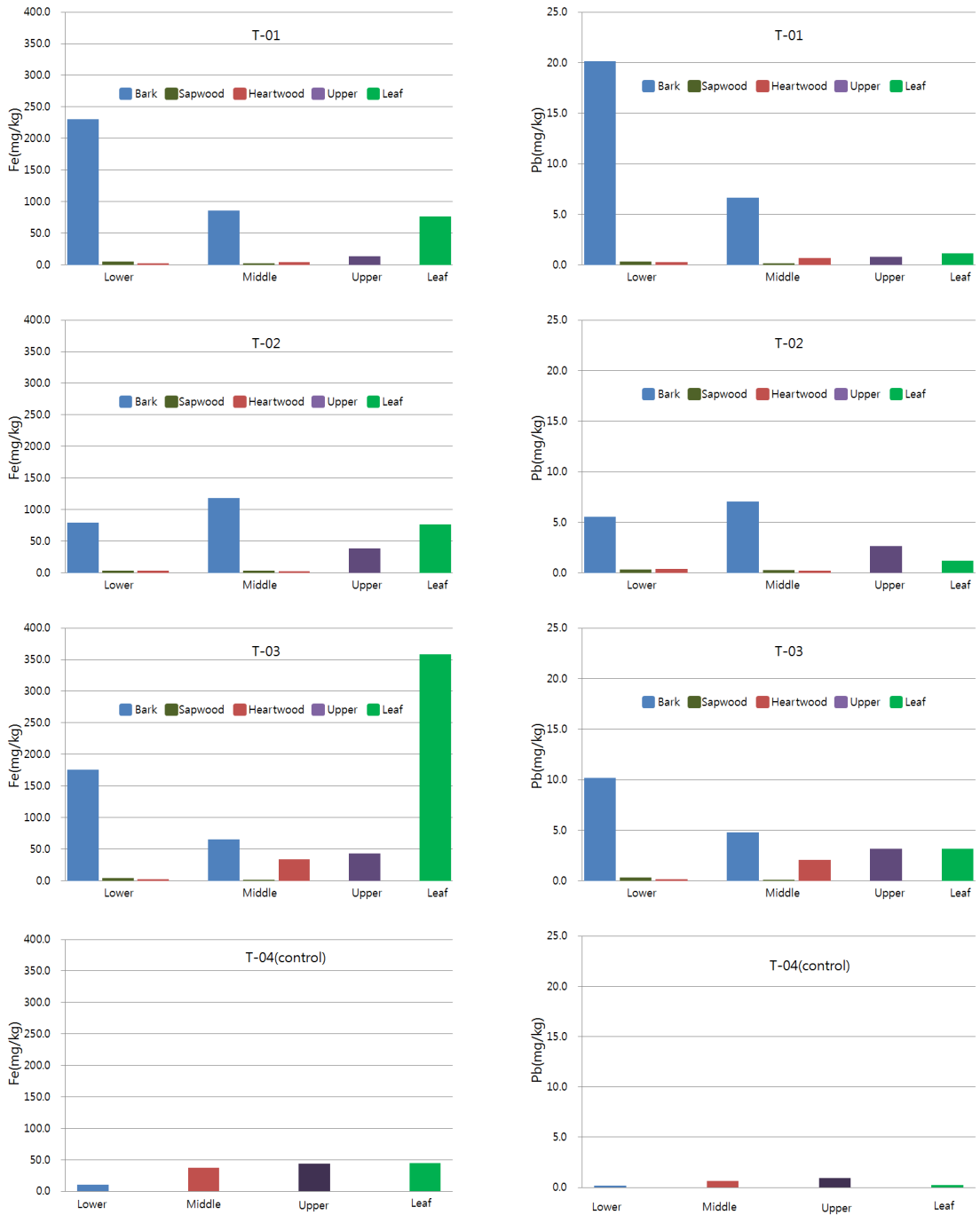


Fig. 3. continued.

장군광산 광미 토양으로부터 아카시아의 중금속 전이에 관한 연구

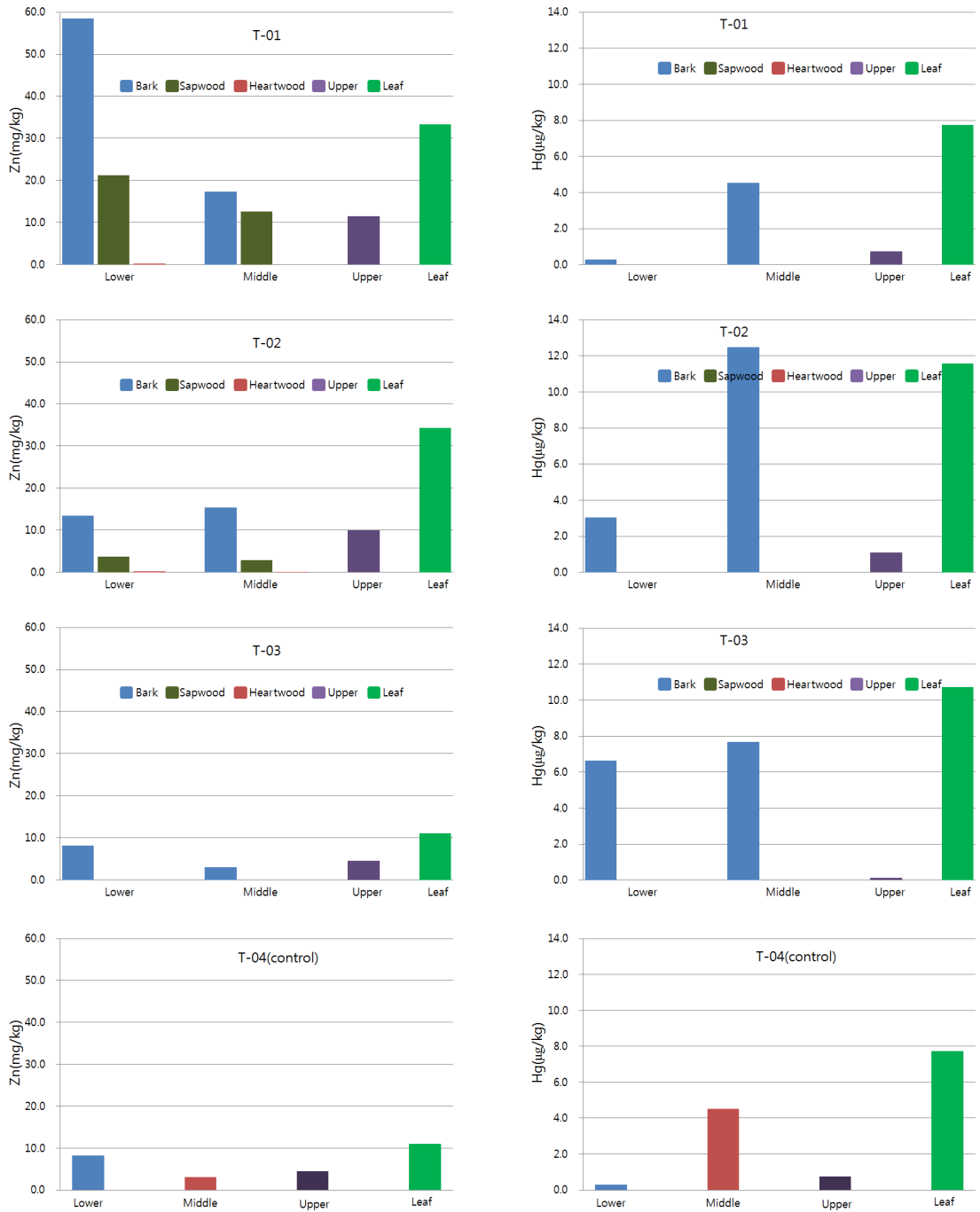


Fig. 3. continued.

kg, Hg 12.47 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 으로 껍질부분이 변재와 심재부분보다 높은 값을 나타낸다. 또한 높은 중금속 함량을 보인 껍질부분에서 중단이 하단의 껍질부분보다 높은 농도를 나타낸 것은 Al, As, Fe, Pb, Zn, Hg로 대부분의 중금속이 하단의 껍질부분에 더 많이 농집되어 있는 T-01시료와는 약간의 차이가 있다. 앞에서 하단과 중단의 껍질보다 높은 농도를 나타내는 것은 Zn이다.

T-03 하단의 경우 껍질부분의 중금속농도는 Al 48.09 mg/kg, As 35.95 mg/kg, Cd 0.22 mg/kg Cu 7.83 mg/kg, Fe 176.11 mg/kg, Pb 10.16 mg/kg, Zn 19.59 mg/kg, Hg 6.65 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 으로 변재와 심재부분보다 아주 높은 값을 보이며, 중단의 껍질부분의 중금속농도는 Al 25.20 mg/kg, As 6.71 mg/kg, Cd 0.17 mg/kg Cu 4.86 mg/kg, Fe 65.14 mg/kg, Pb 4.79 mg/kg, Zn 24.57 mg/kg, Hg 7.68 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 으로 변재, 심재 부분보다 높은 값을 나타낸다. 또한 높은 중금속 함량을 보인 껍질부분에서 중단이 하단의 껍질 부분보다 높은 농도를 나타낸 것은 Zn, Hg로 대부분의 중금속은 하단의 껍질부분에 더 많이 농집되어 있다. 앞에서 하단과 중단의 껍질보다 높은 농도를 나타내는 것은 As, Fe, Zn, Hg이다.

T-04는 하단, 중단을 변재와 심재로 구분하지 않았으며, 상단, 옆 부분과 동일하게 각 부분별로 전체를 하나의 시료로 제작하였다. 하단의 경우 As 0.31 mg/kg, Cu 1.03 mg/kg, Fe 9.89 mg/kg, Pb 0.19 mg/kg, Zn 8.23 mg/kg, Hg 0.28 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 으로 옆보다 농도가 낮으며 중금속의 농도는 하단, 중단, 상단, 옆으로 갈수록 높아지는 경향이 있다.

T-01, T-02, T-03, T-04의 각 부분별 및 위치별 분석 결과에 의하면 대부분의 중금속은 아카시아의 껍질과 옆에 농집되며, 상부로 갈수록 높아지는 경향이 있다.

토양으로부터 식물로의 중금속 전이는 식물의 종류에 따라 큰 차이를 나타내며, 뿌리로부터 유입되는 물의 양과 뿌리 표피세포의 원형질막을 통과하는 활성에 의해 일어난다(Alloway *et al.*, 1990). 또한 식물의 중금속의 생물학적 이용 가능성은 토양의 중금속 농도와 화학종에 의해 결정되며, 낮은 pH와 높은 중금속 농도는 많은 양의 중금속이 식물 전이 된다(Thornton, 1999). 납의 경우 식물세포에 1-10 mg/kg 정도 존재할 경우 식물 영양에 피해를 준다(Ghaderian *et al.*, 2007). 본 연구에서의 아카시아에서의 납의 농도는 0.10-20.16 mg/kg으로 광미 적치장에서 식재된 위치에 따라 Pb의 영향을

받을 수 있을 것으로 판단된다.

중금속 오염도

토양 시료 중 가장 오염도가 높은 시료는 S-03으로 특히 As, Cu, Fe, Pb, Zn이 다른 시료에 비해 아주 높은 값을 나타낸다. 토양의 오염도가 높은 중금속에 대한 아카시아의 중금속 농도를 비교해보면, 껍질에서의 As의 농도는 하단부에서 T-03 35.95 mg/kg, T-01 7.26 mg/kg, T-02 1.79 mg/kg이며, 중단부는 T-03 6.71 mg/kg, T-01 3.05 mg/kg, T-02 4.03 mg/kg으로 S-03시료 채취지점의 T-03가 다른 시료에 높게 나타난다. 아카시아 옆에서의 As의 농도는 T-03 165.95 mg/kg, T-01 7.54 mg/kg, T-02 2.34 mg/kg, T-04 0.31 mg/kg으로 토양의 오염도가 높은 T-03가 다른 시료에 비해 월등히 높게 나타난다.

껍질에서의 Cu의 농도는 하단부에서 T-03 7.83 mg/kg, T-01 9.17 mg/kg, T-02 5.11 mg/kg이며, 중단부는 T-03 4.86 mg/kg, T-01 7.11 mg/kg, T-02 4.43 mg/kg으로 토양의 오염도와 큰 관련성이 없는 것으로 판단된다. 아카시아 옆에서의 Cu의 농도는 T-03 10.68 mg/kg, T-01 8.89 mg/kg, T-02 9.35 mg/kg, T-04 3.90 mg/kg으로 토양의 오염도가 높은 T-03가 다른 시료에 비해 약간 높지만 큰 차이는 나타내지 않는다.

Fe의 농도는 하단부의 껍질에서 T-03 176.11 mg/kg, T-01 230.51 mg/kg, T-02 79.49 mg/kg이며, 중단부는 T-03 65.14 mg/kg, T-01 85.58 mg/kg, T-02 118.75 mg/kg으로 T-02의 경우 하단부 보다 중단부에 높은 값을 나타내지만 토양의 오염도와는 관련성이 없는 것으로 생각된다. 아카시아 옆에서의 농도는 T-03 358.13 mg/kg, T-01 76.40 mg/kg, T-02 76.59 mg/kg, T-04 44.59 mg/kg으로 토양의 오염도가 높은 T-03가 다른 시료에 비해 높은 값을 나타낸다.

하단부의 껍질에서의 Pb의 농도는 T-03 10.16 mg/kg, T-01 20.16 mg/kg, T-02 5.56 mg/kg이며, 중단부는 T-03 4.79 mg/kg, T-01 6.65 mg/kg, T-02 7.08 mg/kg으로 T-01의 하단부가 가장 높지만 토양의 오염도와는 관련성이 없는 것으로 판단된다. 아카시아 옆에서의 농도는 T-03 3.18 mg/kg, T-01 1.12 mg/kg, T-02 1.22 mg/kg, T-04 0.22 mg/kg으로 토양의 오염도가 높은 T-03가 다른 시료에 비해 높은 값을 나타낸다.

Zn의 농도는 하단부의 껍질에서 T-03 19.59 mg/

Table 3. Biological absorption coefficient of part in acacia tree take from tailing dump and control site

Sample No.	position	part	Al (mg/kg)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
T-01	lower	bark	0.005	0.069	0.336	0.543	0.007	0.321	0.297
		sapwood	0.000	0.002	0.034	0.080	0.000	0.006	0.108
		heartwood	0.000	0.001	0.000	0.044	0.000	0.004	0.001
	middle	bark	0.002	0.029	0.078	0.421	0.003	0.106	0.088
		sapwood	0.000	0.001	0.005	0.055	0.000	0.002	0.064
		heartwood	0.000	0.004	0.000	0.040	0.000	0.011	0.000
	upper	total	0.000	0.004	0.012	0.087	0.000	0.013	0.058
leaf	total	0.001	0.071	0.017	0.526	0.002	0.018	0.169	
T-02	lower	bark	0.002	0.027	0.166	0.287	0.003	0.097	0.087
		sapwood	0.000	0.002	0.012	0.080	0.000	0.006	0.024
		heartwood	0.000	0.003	0.001	0.062	0.000	0.006	0.002
	middle	bark	0.003	0.061	0.132	0.249	0.004	0.123	0.099
		sapwood	0.000	0.005	0.008	0.053	0.000	0.004	0.019
		heartwood	0.000	0.007	0.001	0.037	0.000	0.004	0.000
	upper	total	0.001	0.020	0.045	0.169	0.001	0.046	0.064
leaf	total	0.000	0.035	0.021	0.525	0.002	0.021	0.222	
T-03	lower	bark	0.003	0.004	0.224	0.136	0.003	0.011	0.071
		sapwood	0.000	0.000	0.018	0.021	0.000	0.000	0.024
		heartwood	0.000	0.000	0.002	0.022	0.000	0.000	0.000
	middle	bark	0.001	0.001	0.177	0.084	0.001	0.005	0.089
		sapwood	0.000	0.000	0.014	0.015	0.000	0.000	0.042
		heartwood	0.001	0.000	0.059	0.031	0.001	0.002	0.036
	upper	total	0.000	0.001	0.066	0.048	0.001	0.003	0.085
leaf	total	0.001	0.018	0.044	0.185	0.006	0.003	0.175	
T-04 (control)	lower	total	0.000	0.008	0.011	0.101	0.000	0.023	0.176
	middle	total	0.001	0.011	0.042	0.136	0.001	0.078	0.065
	upper	total	0.001	0.012	0.074	0.158	0.001	0.111	0.096
	leaf	total	0.000	0.033	0.008	0.380	0.001	0.027	0.236

kg, T-01 58.44 mg/kg, T-02 13.44 mg/kg이며, 중단부는 T-03 24.57 mg/kg, T-01 17.27 mg/kg, T-02 15.36 mg/kg으로 토양의 오염도와는 관련성이 없는 것으로 생각된다. 아카시아 잎에서의 농도는 T-03 48.11 mg/kg, T-01 33.28 mg/kg, T-02 34.23 mg/kg, T-04 11.01 mg/kg으로 토양의 오염도가 높은 T-03가 다른 시료에 비해 높은 값을 나타낸다. 하단과 상단의 변재에서 Zn의 농도가 높게 나타나는 것을 다른 중금속과 차이를 나타낸다.

토양의 오염도가 높은 As, Cu, Fe, Pb은 아카시아의 껍질과 잎에서 높은 농도를 나타내며 변재와 심재 부분은 토양의 오염도와 관계없이 낮은 농도를 나타낸다. 그러나 Zn의 농도는 하단과 상단

의 변재에서 다른 중금속에 비해 높기 때문에 중금속의 종류에 따라 농집되는 부분이 다르다는 것을 알 수 있다.

중금속 흡수비

광미 적치장에서 채취한 토양으로부터 식물시료인 아카시아로의 중금속 원소의 흡수정도를 알아보기 위하여 흡수 계수를 알아보았다(Table 3). 생물흡수계수(Biological Absorption Coefficient)는 토양으로부터 식물로 이동되는 원소의 함량을 토양 내 원소함량으로 나눈 값으로 토양에서 식물로 이동되는 중금속 원소의 흡수비를 나타낸다 (Brooks, 1983).

아카시아 시료에서 중금속 원소에 대한 흡수계수는 대체로 껍질 > 잎 > 변재 > 심재 순으로 감소한다. 흡수계수가 모든 시료에서 0.01 이하인 중금속은 Al, Fe이며 Cu의 경우 T-01 하단의 껍질과 잎, T-02 중단의 잎에서 0.5 이상의 높은 값을 나타낸다. 토양에서 Cu 농도가 가장 높은 T-03의 경우 T-01과 T-02 보다 낮은 흡수비를 나타낸다. As는 토양에서 가장 높은 9325.34 mg/kg인 T-03의 경우 아카시아의 껍질과 잎에서 높은 농도이지만 흡수비는 0.02 이하로 매우 낮은 값을 나타낸다.

아카시아의 중금속 원소의 흡수비가 껍질과 잎에서 높게 나타나는 것은 아카시아 내의 중금속 농도 분포와 유사하다. 토양의 중금속 농도가 높은 경우 흡수비가 낮게 나타나는 것은 토양에서 아카시아로의 중금속 원소의 이동이 이루어지고 있지만 흡수에 한계가 있는 것으로 판단된다.

결 론

광미 적치장에서 채취한 토양의 중금속 농도는 오염되지 않은 토양에 비해 훨씬 높은 값을 나타내며, 광미 적치장에 식재된 아카시아 나무의 중금속 농도는 대조군에 비해 특정 부위에 높은 중금속 농집도를 나타낸다. 대부분의 중금속은 아카시아의 껍질과 잎에 농집되는 경향을 보이며 변재와 심재는 껍질에 비해 아주 낮은 값을 나타낸다. Fe의 농도는 껍질과 잎에서 높지만 특히 하부의 껍질 부분에 집중적으로 농집되며, Pb는 다른 중금속과 상이하게 껍질 부분에 중적으로 농집되고 잎에는 낮은 값을 나타낸다. Zn은 껍질과 잎에 농집되는 경향을 보이지만 변재에도 높은 값을 나타내며, Hg는 변재와 심재에는 거의 농집되지 않는다. 따라서 아카시아나무에서 중금속의 수평적 농도 분포는 껍질, 변재, 심재 순으로 농집되는 경향을 나타낸다. 또한 중금속의 수직적 분포는 대체로 잎, 상부, 중부, 하부의 순으로 잎에 가장 많이 농집되는 경향을 나타낸다.

토양의 오염도가 높은 중금속은 껍질과 잎에서 높은 농도를 나타내며 변재와 심재 부분은 토양의 오염도와 관계없이 낮은 농도값을 나타낸다. Zn은 아카시아의 하단과 상단의 변재에 농도가 높은 것으로 보아 중금속의 종류에 따라 농집되는 부분이 다르다.

아카시아의 중금속 흡수비는 토양의 중금속 농도가 높은 경우 낮아지는 경향이 있다. 이는 토양

에서 아카시아로의 중금속 원소의 이동이 이루어지고 있지만 흡수에 한계가 있는 것으로 판단된다. 또한, 중금속 농집 부위는 잎과 껍질 부분으로 잎의 경우 다시 토양으로 되돌아가기 때문에 재 오염의 가능성이 있다. 따라서 식물을 이용한 중금속 오염 토양 정화 시 토양이 심각하게 오염되었거나 잎에 중금속이 농집되는 식물은 정화 효율이 떨어질 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 “2013년도 안동대학교 특별연구지원사업”에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Alloway B.J. (1995) Heavy Metals in Soils. Blackie Academic & Professional, Glasgow.
- Alloway, B.J., Jackson, A.P., and Morgan, H. (1990) The accumulation of cadmium by vegetables grown on soils contaminated from a variety of sources. *The Science of the Total Environment*, 91, 233-236.
- Brooks, R.R. (1983) Biological Methods of Prospecting for Minerals, John Wiley & Sons Inc, 336p.
- Cho, H. (1998) Geochemical dispersion of heavy metals in soils, stream sediments and plants in the vicinity of the Sukdam mine. Ms. Thesis, Kang Won National University, Chuncheon, 73p (in Korean with English abstract).
- Choi, H.W. (2009) Studies on metal-resistant and metal-uptake wild plants and species overly accumulating metal growing naturally in metal-contaminated soil of disused or abandoned mines. Ms. Thesis, Kwang Woon University, Seoul, 55p (in Korean with English abstract).
- Clemens, S. (2006) Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*, 88, 1707-1719.
- Ghaderian, S.M., Hemmat, G.R., Reeves, R.D., and Baker, A.J.M. (2007) Accumulation of lead and zinc by plants colonizing a metal mining area in central Iran. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 81, 145-150.
- Kim, J.G., Lim, S.K., Lee, S.H., Lee, C.H., and Jeong, C.Y. (1999) Evaluation of Heavy Metal Pollution and Plant Survey around Inactive and Abandoned Mining Areas for Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soils. *Korean Journal of Environmental*

- Agriculture, 18, 28-34 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.K. (2010) Heavy Metal Concentrations in Soils and Crops in the Poongwon Mine Area. *Journal of the Korean Environmental Geotechnical Society*, 11, 5-11 (in Korean with English abstract).
- Kwon, J.C., Jeong M.C. and Kang M.H. (2013) Contents and Seasonal Variations of Arsenic in Paddy Soils and Rice Crops around the Abandoned Metal Mines. *Economic Environmental Geology*, 46, 329-338 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., Lee, I.H., and Lee, S.Y. (1996) Geochemical study on pollution of heavy metals in soils, plants and streams in the vicinity of abandoned metal mines-Salseong and Kyeongsan Mines. *Economic Environmental Geology*, 29, 597-613 (in Korean with English abstract).
- Li, M.S., Luo, Y.P., and Su, Z.Y. (2007) Heavy Metal Concentrations in Soils and Plant Accumulation in a Restored Manganese Mineland in Guangxi, South China. *Environmental Pollution*, 147, 168-175.
- Lim, H.S., Lee, J.S., Chon, T.H., and Sager, M. (2008) Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment in the Vicinity of the Abandoned Songcheon Au-Ag Mine in Korea. *Journal of Geochemical Exploration*, 96, 223-230.
- Liu, H., Probst, A., and Liao, B. (2005) Metal Contamination of Soils and Crops Affected by the Chenzhou Lead/Zinc Mine Spill (Hunan, China). *Science of the Total Environment*, 339, 153-166.
- Park, J.S., Kim, C.M., and Lee, M.K. (2001) A Study on Contents of Trace Metal of the Agricultural Products around Mines Located in Chollanam-Do. *The Korean Journal of Food and Nutrition*, 14, 132-137 (in Korean with English abstract).
- Salt, D.E., Smith, R.D., and Raskin, I. (1998) Phytoremediation. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49, 643-668.
- Thornton, L. (1999) Bioavailability of trace metals in the food chain. *The 2nd International Vetiver Conference*, Bangkok, Thailand.
- Yap, D.W., Adezrian, J., Khairiah, J., Ismail, B.S., and Ahmad-Mahir, R., (2009) The Uptake of Heavy Metals by Paddy Plants (*Oryza sativa*) in Kota Marudu, Sabah, Malaysia. *American-Eurasian Journal of Agriculture & Environmental Science*, 6, 16-19.

Received June 10, 2015, Revised June 20, 2015,
Accepted June 25, 2015, Responsibility Editor: Kang
joo Kim