

## 폐광산 주변 토양의 Zn, Cu, Pb의 함량 및 식물체내 축적

서상우 · 문성기<sup>1\*</sup> · 최철만<sup>2</sup> · 박연규

밀양대학교 환경공학과, <sup>1</sup>경성대학교 생물학과, <sup>2</sup>경성대학교 기초과학연구소

Received August 31, 2005 / Accepted October 11, 2005

**Concentration of Zn, Cu, and Pb in Soils and Accumulation of Its in Plants around Abandoned Mine Vicinity.** Sang-Woo Seo, Sung-Gi Moon<sup>1\*</sup>, Chul-Mann Choi<sup>2</sup> and Yeon-Kyu Park. *Department of Environmental Engineering, Miryang National University, Miryang 627-702, Korea, <sup>1</sup>Department of Biology, Kyungsung University, Busan 608-736, Korea, <sup>2</sup>Basic Science Research Center, Kyungsung University, Busan 608-736, Korea* – This study was conducted to inform basic data for management of abandoned mine that was based on soil heavy metal concentration of the non-rearing and the rearing sites in Guandong Mine which had been completed of improve contamination soils, and examined into standard plant which had tolerances about pollution that analyzed into its accumulated heavy metals contents in the wild plant of naked soil. Consider form the result of contents by depth of soils heavy metals in the non-rearing sites, S1 point judged by contaminated to heavy metals of tailing leach after weathering caused by rainfall and permeate in S1 point soils when restored rest of tailing in 1996 restoration project. Lead of S2 point was not contaminated seriously by restoration and S3 point considered that heavy metals which leach by rainfall in the contaminated soils in mine vicinity accumulated in the abandoned paddy through river. When heavy metals of rearing sites soils were examined from the view point of upside of mine point (SP1, SP2, and SP3) of same above the sea level, zinc (537.5 mg/kg) content of SP1 point was highest, and copper (535 mg/kg) and lead (141.5 mg/kg) in the SP3 point were high. To considered as orderly plenty of heavy metals in the plant were respectively in order, *Perilla frutescens* var. *acuta* KUDO (SP1 and SP4) > *Artemisia princeps* PAMPAN (SP2) > *Miscanthus sinensis* ANDERSSON (SP5) > *Vicia angustifolia* var. *segetilis* (THUILL.) K. KOCH. (SP2). Especially, there were plenty of heavy metals in *P. frutescens* var. *acuta*, so it judged as a standard plant which have tolerances about heavy metals pollution sites. Therefore, we need more study about the heavy metals accumulate ability of *P. frutescens* var. *acuta* in future.

**Key words** – heavy metals, Guandong Mine, *Perilla frutescens* var. *acuta*

우리나라는 1960년대 이후 급격한 경제성장을 이루었으나 환경 분야에서 여러 가지 오염 문제를 야기시켰고 특히 농약과 산성비 및 광산 폐수 등은 토양 오염의 주원인이 되었다.

중금속은 난분해성 물질로 생체세포 내에서 이온 상태로 생체 단백질과 착화합물을 형성하여 생화학적으로 안정되며 [3,30] 고농도로 환경에 축적될 경우에는 심각한 문제를 일으키기도 한다. 예를 들면, 지하수와 지표수를 오염시키는 직접적인 원인이 되며, 토양 기능을 상실시켜 산림 및 농작물의 생육 손실을 초래하고 먹이사슬 등을 거쳐 사람과 동물의 생존에까지 위협을 주고 있다[4,5,32].

휴·폐광 금속 광산의 폐석과 광미는 자연경관을 훼손할 뿐만 아니라 대부분 높은 농도의 중금속을 함유하여 중요한 토양오염의 오염원이 된다. 이렇게 오염된 광산은 정화가 시급하지만 오염된 토양의 유해 물질을 적절히 처리하는 것이 어렵고, 그 처리 비용이 과다하기 때문에 토양 오염은 거의 영구적인 환경오염 문제가 되고 있는 실정이다[6].

현재까지 폐광산 주변 환경에 관한 연구는 주로 하상퇴적물과 토양 등에 대한 중금속 오염 정도를 파악하고 오염경로와 확산 범위 및 존재 형태 등을 규명하는데 주력해 왔고 [9, 13,14,17,18,22,26,27,34], 식물에 의한 제거[31], 생물학적 농축 [2,11] 그리고 토양 오염과 식물체의 중금속 오염에 관한 상관성[19] 등에 대해서는 연구가 활발하게 진행중에 있다.

따라서 본 연구는 오염토양 개선사업이 완료된 경상남도 밀양시 무안면 마을리에 위치한 구운동(양구동) 광산 주변의 토양과 야생식물 체내에 축적된 중금속 함량을 비교, 분석하고 중금속의 생물학적 농축 정도를 규명하여 휴·폐광산 관리시 그 기초자료로서 활용하고자 하는 한편 식물에 의한 중금속 제거 및 오염 토양 복원 연구에 도움을 주고자 실시하게 되었다.

### 재료 및 방법

#### 조사지역 개황

본 조사지역 폐광산은 경상남도 밀양시 무안면 마홀리의 종남산(해발 663.5 m) 줄기 북방 약 2.5 km에 위치하고 있다. 주 채광 금속은 금, 은, 동, 아연, 납이었으며 광복 후 채산성

#### \*Corresponding author

Tel : +82-51-620-4641, Fax : +82-51-620-4603

E-mail : skmun@star.ks.ac.kr

때문에 폐광되었고 폐광후 토양오염 방지사업의 일환으로 1996~1997년 밀양시에 의해 소류지 퇴적물의 준설과 유해 중금속으로 오염된 농경지의 토양 개선사업이 시행된 후 방치됨에 따라 광구수 및 광미 유출수에 의해 주변 토양 및 수계가 Cu와 Pb로 인해서 심각하게 오염된 곳이다[28].

**토양의 채취지점**

토양의 중금속 오염을 측정하기 위한 식물 비생육지 토양의 채취는 식물이 성장하지 않는 주변 토양 4지점(C-S, S1, S2,

S3)을 1 m<sup>2</sup>를 지정한 후 다시 20 cm<sup>2</sup> 3지점을 선택하여 토양 공정시험법 및 조사 목적에 부합되는 심도에 토양 채집기 또는 부삽을 이용하여 깊이별로 표토에서 50 cm 깊이까지 10 cm 단위로 5등분하여 시료 5점을 총 4지점에서 20개의 분석 시료를 채취하였다.

식물 생육지의 토양의 채취는 광미에 의해 토양이 오염되어 있고 광산 주변지역에서 특정식물이 우점하고 있는 곳 6지점(C-SP, SP1, SP2, SP3, SP4, SP5)을 선정하여 지표로부터 20 cm 아래부분을 채취하였다(Fig. 1).

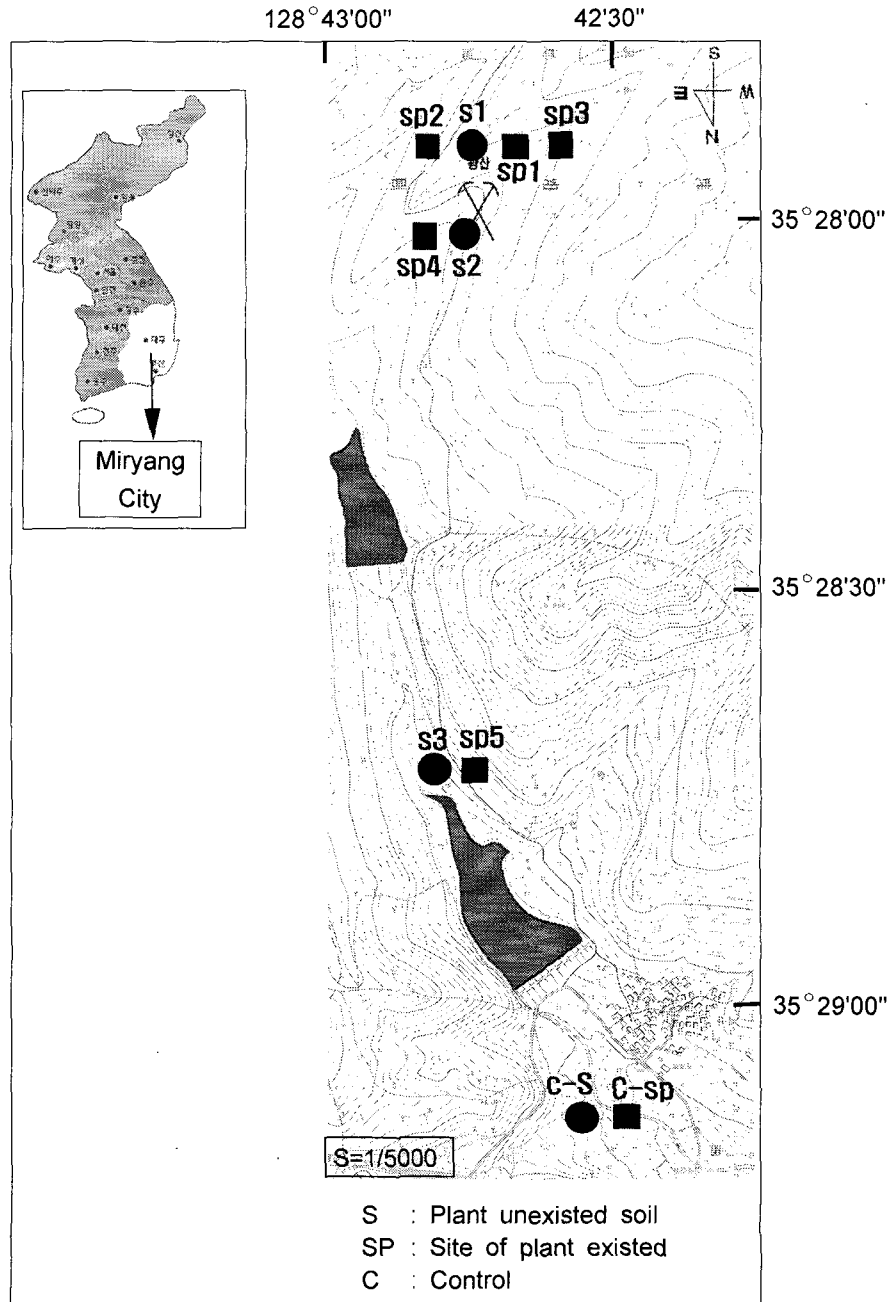


Fig. 1. Map showing the sampling sites of soil and plant in Guandong mine.

**중금속 분석용 식물의 선정과 동정**

중금속 분석용 식물은 우점 식물을 선택하여 각 지점별 20 cm<sup>2</sup> 범위의 동일종 식물을 3곳 선택하여 채집하였으며, 식물의 동정은 대한식물도감[20]과 Flora of Korea[21]를 참고하였다.

식물은 뿌리가 상하지 않도록 흙을 제거하여 혼합시료로 만든 후 4분법하여 약 1 kg정도를 분석시료로 하였다.

**토양의 중금속 분석**

토양 시료는 채취 토양을 음건하여 고무망치로 분쇄한 후 2 mm 폴리에틸렌 체를 통과시킨 다음 비닐봉투에 보관하여 분석시료로 사용하였고 중금속 분석은 우리나라 토양오염 공정시험법[24]에 준하여 분석하였으며 분석기기는 유도결합플라즈마 발광광도계(Perkin Elmer 3300DV)를 사용하였다. 이 모든 과정은 blank를 첨가하여 QC (Quality Control) 과정을 거쳤으며 분석시 오염을 최소화하기 위해 deionized water를 사용하였고 3회 반복 분석하였다.

**식물체내의 중금속 분석**

채집한 식물은 실내에서 세척, 건조(105℃)한 후 식물 전체를 믹서기로 갈아 분말로 만든 다음 분석 시료로 사용하였다. 이 시료는 체(20 mm)에 통과시킨 후 10 g을 자체도가니에 정확히 칭량하여 뚜껑을 닫은 후 회화로(600℃)에서 6시간 가열한 후 킬달 플라스크에 약 0.5 g씩 넣어 혼합 분해액(HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:HClO<sub>4</sub> = 10:1:4) 10 ml를 주입하여 분해액이 백색이 될 때까지 분해를 하였다. 분해된 시료는 Toyo 5C 여지로 여과시켜 유기물을 제거한 후 100 ml로 검량한 것을 ICP-OES (Perkin Elmer 3300DV)로 각 성분을 분석하였다[25]. 이 모든 과정은 blank를 첨가하여 QC 과정을 거쳤으며 분석시 오염을 최소화하기 위해 deionized water를 사용하였고 동일한 시료를 3회 반복 분석하였다.

**식물에 의한 토양 연간 중금속 제거율**

식물의 연간 중금속 제거량(g/ha)은 본 조사지역에서 각 지점별로 채취한 식물을 단위면적당 건중량에 식물체 농도를 곱하여 구하였으며, 10월에 채취한 식물체내의 중금속 함량을 최고 중금속 함량으로 하였다. 토양의 단위 면적당 중금속 현존량(g/ha)은 20 cm<sup>2</sup>에서 채취한 토양의 중금속 농도(mg/kg)에 ha당 가비중 1.4 g/cm<sup>3</sup>을 곱하여 구하였다. 토양의 일반적인 가비중은 화산재가 0.6~0.8 g/cm<sup>3</sup>, 충적토 0.9~1.1 g/cm<sup>3</sup>, 사질토양은 1.2~1.6 g/cm<sup>3</sup>인데 본 조사지역은 사질토양으로 깊이 0~20 cm의 가비중(1.4g/cm<sup>3</sup>)으로 하였다. 식물에 의한 토양 중금속의 연간 제거율은 서와 조[31]에 의하였다.

**결과 및 고찰**

**식물 비생육지 토양의 깊이별 Zn, Cu, Pb 함량**

폐광산 토양의 중금속 농도를 측정하기 위해 깊이별로 Zn, Cu, Pb의 함량을 조사한 결과 Zn 함량은 대조구(C-S)와 석회비료로 시비가 이루어진 지점(S3)은 깊이가 깊어질수록 낮아지는 정상적인 변화양상을 보이는 반면 나머지 지점들에서는 깊이와 함량과의 상관성은 없었다. Cu 및 Pb의 농도 역시 깊이와는 상관성이 없었지만 표토와 50 cm이상의 깊이를 제외한 중간 부분의 깊이에서 대체로 함량이 높음을 알 수 있었는데 이는 이들 중금속이 비록 지표수나 지하수에 의해 이동하기는 하지만 그 이동도가 비교적 낮아[1] 표토의 층층에 집적되었기 때문이라 생각된다(Table 1).

Zn의 농도를 지점별로 보면 대조구(C-S)에서는 자연배경 값과 유사한 함량으로 검출되었고 S1지점에서 평균 443.2 mg/kg으로 가장 높은 함량을 보였는데 이는 Kloke[15]가 제안한 토양오염 허용한계치인 300 mg/kg를 초과하였으며 오염원에서 가까운 지역의 토양중에 많이 집적됨을 보여줄 뿐

Table 1. Vertical distribution concentration of zinc, copper, and lead in 0.1N HCl extraction of non-rearing site soil (mean±SD, n=3) (mg/kg)

Sites	Soil Depth	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	40~50 cm	Mean
C-S	Zn	59.4±2.8	59.4±5.2	39.3±3.6	15.7±1.5	11.5±0.8	37.1
	Cu	3.13±0.5	3.13±0.5	3.32±0.8	3.78±0.5	3.51±0.5	3.4
	Pb	1.91±0.3	1.91±0.2	3.23±0.4	9.92±0.3	12.1±0.4	5.8
S1	Zn	511±16.8	628±14.2	747±15.6	271±15.7	59.2±2.4	443.4
	Cu	125±10.8	153±10.2	75.3±2.8	10.5±1.6	5.12±0.5	73.8
	Pb	104±9.8	97.9±5.3	127±7.7	84.3±5.6	123±12.8	107.2
S2	Zn	59.7±3.6	61.8±5.8	117±6.7	316±15.6	107±5.7	132.3
	Cu	85.2±5.8	78.6±4.4	127±7.6	149±8.2	53.1±1.8	98.6
	Pb	83.5±3.1	40.1±2.8	70.3±4.5	149±6.2	108±7.6	90.2
S3	Zn	265±7.5	268±4.9	257±0.7	198±0.5	145±3.6	226.6
	Cu	84.2±3.2	83.8±2.8	68.9±1.6	12.5±0.8	5.28±0.5	50.9
	Pb	54.4±5.6	56.1±3.2	45±2.8	24.7±0.8	18.1±0.5	39.7

아니라 0~30 cm 깊이까지는 다른 지점과도 현저한 차이를 보이지 않았지만 그 이상의 깊이에서는 큰 차이를 보였고 S3지점에서는 매 깊이마다 약 200 mg/kg 정도의 함량으로 깊이 별 뚜렷한 변화가 없었다(Fig. 2).

식물 비생육지 토양의 Zn 평균 함량은 267.4 mg/kg으로 대조구의 평균(37.1 mg/kg)보다 약 7배가 높았으며 Bowen[1]에 의한 일반적인 비오염지역 Zn 평균 함유량보다도 3배나 높았으며 각 지점별 평균 함유량 역시 일반적인 비오염지역 Zn 함유량보다도 약 1.5배~4.9배 정도 높게 조사되었다. 폐광된 년 수가 비슷한 일반적인 다른 폐광산[29]과는 함량이 비슷하였으나, 폐광된 지 오래된 가학광산[34]보다는 더 높은 함량을 보여 주었다. 폐광된 지 30년 이상 된 가학광산의 경우 폐광된 직후(938 mg/kg)에는 본 조사지역보다 월등히 높았음을 감안할 때 본 조사지역도 해가 거듭할수록 현저히 감소되리라 예상된다.

비오염토양에서 채취한 토양의 Cu 함량이 20~30 mg/kg [1]임을 감안할 때 비생육지 토양에서 채취한 Cu 평균 함량은 74.43 mg/kg으로 비오염토양의 2배 이상이었고 대조구(C-S)의 22배 이상이었지만 대조구의 평균(3.37 mg/kg)은 일반적인 비오염토양에서보다도 훨씬 적게 함유하고 있음을 알 수 있었다. 반면 S1지점에서 0~20 cm까지는 우리나라 토양환경보전법[23]의 토양오염 대책기준인 125 mg/kg을 초과하였고, 20~30 cm에서는 75.3 mg/kg으로서 토양오염 기준 50 mg/kg을 초과하였다. 이는 토양 개선사업을 하면서 표토 위에다 남은 광미를 복토함으로써 오염이 되었을 것으로 판단된다. S2지점에서는 20~40 cm까지 토양대책기준을 초과한 반면 0~20 cm까지와 S3지점의 경우는 토양대책기준을 초과하지 않았는데 이는 오염토양 개선사업의 효과로 생각되며 일부 강우로 인한 광미 중금속의 영향으로 인하여 토양오염기준을 초과한 것으로 생각된다(Fig. 3).

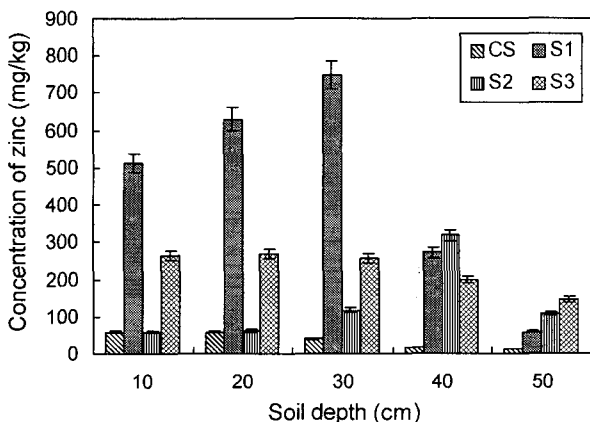


Fig. 2. Vertical distribution of zinc concentration in 0.1N HCl extraction of non-rearing site soil.

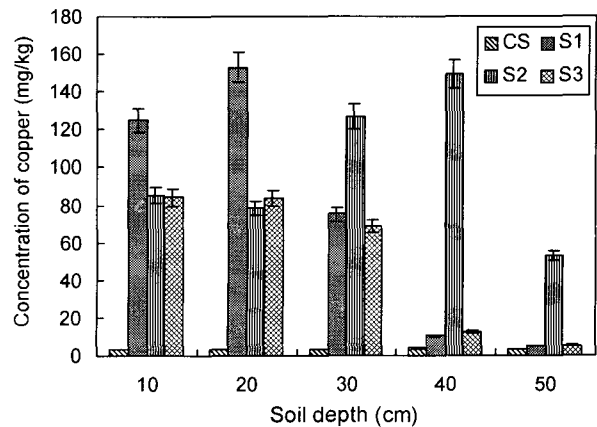


Fig. 3. Vertical distribution of copper concentration in 0.1N HCl extraction of non-rearing site soil.

비오염토양에서 채취한 토양의 Pb 함량 평균은 35 mg/kg [1]인데 비생육지 토양의 Pb 함량 평균은 79.03 mg/kg으로 조사되어 비오염토양의 2배 이상이었고 대조구에서는 5.81 mg/kg로 Cu의 함량과 마찬가지로 비오염토양보다 훨씬 적은 함유량을 보였다. 지점별로는 보면 S1지점에서는 모든 깊이에서 오염우려기준인 100 mg/kg과 비슷하거나 초과된 함량이었고 S2지점에서는 30~50 cm에서만 각각 149, 108 mg/kg로 조사되어 토양오염 우려기준에 속할 뿐이었다. 정 [8]의 연구에서 납에 영향을 주는 광맥이 석영맥에 함유된 방연석(PbS)과 일부 황철석의 영향이라 하였는데 구운동 광산의 광맥도 방연석, 섬아연석, 황동석, 황철석 등의 유해광물과 함께 산출되었다는 기록[16]을 볼때 S1지점과 S2지점의 우려기준을 초과하는 것은 광맥의 영향때문이라 판단된다. S3지점에서 우려기준을 초과하는 것은 없었고 토심이 깊어 질수록 낮은 경향을 보였다(Fig. 4).

비생육지 토양의 중금속 함량을 전체적으로 본다면 S1지점은 광미의 중금속이 용탈되어 오염되고 있는 것으로 생각

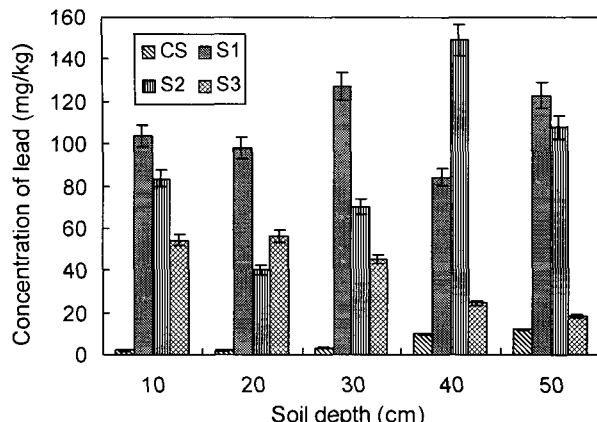


Fig. 4. Vertical distribution of lead concentration in 0.1N HCl extraction of non-rearing site soil.

되고 S2지점의 경우는 오염토양 개선사업의 결과 토심 0~30 cm까지는 오염이 심각하지 않음을 알 수 있으며 S3지점은 강우에 의한 광산 주변 광미의 중금속이 용탈되어 하천을 따라 휴경지에 축적되고 있는 것으로 판단된다.

박[28]의 조사에서 구운동 광산의 Cu 및 Pb의 오염이 심각하다고 보고한 바 있는데 본 조사에서도 Cu 및 Pb의 함량으로 볼 때 심각하게 오염되어 있음을 알 수 있었고 이는 토양 개선 사업이 완료된 현재에도 오염이 여전히 진행되고 있음을 간접적으로 시사하고 있다.

**식물 생육지 토양의 Zn, Cu, Pb 함량**

식물 생육지 토양의 깊이별 Zn, Cu, Pb의 함량을 조사한 결과 대체적으로 SP2지점에서는 적은 함량을 SP3지점에서는 높은 함량을 나타내었는데 이는 SP2지점이 다른 지점보다 고도가 높아 광미의 영향을 적게 받았을 것으로 생각된다 (Table 2).

Zn의 평균 함량은 396.76 mg/kg으로 대조구(C-SP)의 약 12배였고 토양오염 허용한계치를 약간 초과하였다. 지점별로 보면 대조구는 자연배경값과 유사하였고 SP3지점에서 가장 높은 함량인 945 mg/kg으로 대조구의 약 30배 정도였다. 지점별로 차이가 많이 나는 이유는 고도에 의해 분포가 차이 나기 때문으로 여겨진다.

Cu는 1.8~72.7 mg/kg 범위였는데 SP2지점이 고도가 높기 때문에 광미의 영향을 적게 받아 가장 적은 함량으로 조사되었고 나머지 지점들의 경우, 폐광산의 토양오염 개선사업을 하였다 하더라도 여전히 토양 복원이 완전히 이루어지지 않았고 또한 강우와 풍화에 의한 광미 중금속의 영향이 컸을 것이라고 판단된다. SP1지점과 SP4지점은 토양환경보전법상 토양오염 우려기준을, SP3지점은 토양오염 대책기준을 초과하였다.

Pb의 경우 SP3지점과 SP4지점은 토양오염 우려기준을 초과하였고 특히 SP4지점이 함량이 높은 이유는 광구 앞 지점으로서 이동성이 낮고 많은 양의 광미가 복토후에도 계속 많이 잔재하고 있음을 의미한다고 할 수 있다(Fig. 5).

**우점 식물체내 중금속 함량**

각 지점에서의 출현 식물중 우점 식물 1종에 대하여 중금

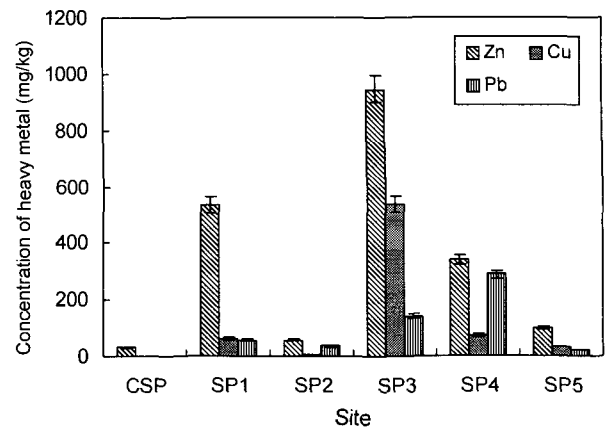


Fig. 5. Concentration of heavy metals in the rearing site soil.

속 함량을 측정된 결과 대체적으로 SP1지점과 SP4지점의 차즈기에서 높은 함량을 보였다(Table 3).

Zn의 함량은 광산 위 SP1지점의 차즈기가 3,430 mg/kg로 가장 높았고 광산 위 SP3지점의 살갈퀴가 294 mg/kg으로 가장 적었으나 이것은 대조구(C-SP)의 차즈기보다도 35배, 3배가 높은 함량이었다.

Cu의 함량 또한 광산 위 SP1지점의 차즈기가 656.5 mg/kg로 가장 높았고 광산 앞 지점(SP5)의 억새가 16.7 mg/kg로 가장 낮았다. 특히 광산 위 지점의 차즈기는 대조구 차즈기보다 약 31배 정도 높은 수치였으며 다른 지점의 썩과 살갈퀴는 대조구보다 약간 높은 수치를 보였다. 썩과 살갈퀴가 분포하고 있는 지역이 서로 근거리임에도 불구하고 중금속 함량에서 현저한 차이를 보인 것은 토양중의 중금속 함량에서도 차이가 있겠지만 중금속에 대한 식물 자체의 흡수성 차이라고 생각되어진다.

Pb는 SP4지점의 차즈기(227 mg/kg)가 가장 높았고 SP5지점의 억새(20.8 mg/kg)가 가장 적었다(Fig. 6).

Kabata-Pendias와 Pendias[10]는 식물체의 독성한계농도를 Cu 20~100 mg/kg, Zn 700~1,000 mg/kg, Pb 30~300 mg/kg으로 제시하였는데 본 조사에서는 SP1과 SP4지점의 차즈기에서 Zn, Cu, Pb가 모두 독성한계범위였고, SP2지점의 썩은 Cu, SP3지점의 살갈퀴는 Cu와 Pb가 독성한계범위였으나 SP5지점의 억새는 독성한계범위보다 낮았다.

Table 2. Concentration of zinc, copper, and lead in 0.1N HCl extraction of rearing site soil (mean±SD, n=3) (mg/kg)

Site	Heavy metal name	Zn	Cu	Pb
C-SP		31.9±2.8	1.8±0.2	1.1±0.2
SP1		537.5±9.6	61.3±2.5	58.2±5.5
SP2		58.5±5.4	5.5±0.3	36.9±3.5
SP3		945.0±10.6	535.0±9.8	141.5±3.6
SP4		342.8±13.2	72.7±5.6	289.5±8.2
SP5		100.0±7.8	34.0±2.5	21.3±1.8

Table 3. Concentration of zinc, copper, and lead in plants (mean±SD, n=3) (mg/kg)

Site	Heavy metal name	Zn	Cu	Pb
C-SP		97±5.6	21±1.5	35.8±1.4
SP1		3,430±31.6	656.5±10.5	161±7.6
SP2		331±20.5	26.3±1.6	21±1.2
SP3		294±10.6	31.8±2.5	40±2.1
SP4		1,992±25.6	152.4±7.4	227±7.5
SP5		571±23.2	16.7±1.2	25±0.8

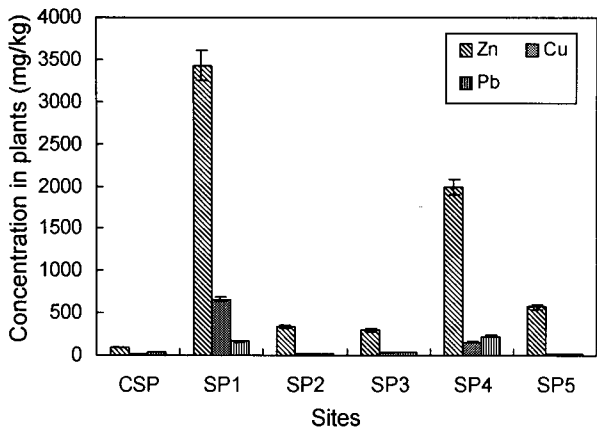


Fig. 6. Concentration of zinc, copper, and lead in plants.

본 연구에서 일부 지점에서 쭉이 중금속 함량이 높게 측정되었는데 이는 정 등[7]의 연구에서 국화과 식물인 쭉, 씀바귀 등의 Zn 함량이 높게 측정된 것과 비슷한 결과였다.

본 연구와 동일 식물 종은 아니지만 김 등[12]은 광미 퇴적장에 있는 골풀 중 건체 중량 100톤을 채배·수거할 경우 아연 2.4 kg, 구리 1.4 kg, 납 2 kg을 제거하는 효과가 있다고 보고하였는데 본 연구결과를 환산해 보면 SP1지점과 SP4지점의 차즈기는 각각 아연 343 kg, 구리 65.65 kg, 납 16.07 kg 과 아연 199.2 kg, 구리 15.24 kg, 납 22.7 kg을 제거하는 효과가 있을 것으로 생각되며 SP2지점의 쭉의 경우는 아연 33.1 kg, 구리 2.63 kg, 납 2.08 kg의 제거가 가능할 것으로 생각되는데 이는 김 등[11]이 연구한 결과와도 일치하였다. SP5지점의 억새는 아연 57.1 kg, 구리 1.67 kg, 납 2.46 kg의 제거 효과가 있을 것으로 생각된다.

**생육지 토양의 중금속 함량과 우점 식물체내 중금속 함량의 관계**

Zn에 대한 토양과 식물체내 함량비는 SP1지점과 SP4지점의 차즈기, SP2지점의 쭉, 그리고 SP5지점의 억새는 토양에서보다는 식물체내의 농도가 높은 것으로 나타났고, SP3지점에서는 식물체보다 토양에 농도가 높은 것으로 나타났다. Cu와 Pb의 함량비는 SP1지점의 차즈기에서 가장 높았고, SP3지점의 살갈퀴가 가장 낮았다. 또한 SP4지점의 차즈기는 식물체보다 토양에서의 중금속 함량이 높았는데 이는 어느 정도 식물체 내에 축적하고 나면 더 이상 축적될 수 없는 한계성 즉 식물의 흡수한계로 생각되며 SP3지점의 살갈퀴의 경우 Zn, Cu, Pb 등의 중금속이 식물체내보다는 토양에서 많은 함량을 보였는데 이는 본 식물이 다른 식물들에 비해 중금속 축적률이 매우 낮은 것으로 판단된다.

이상에서 본 바와 같이 토양보다 식물체내에서 중금속이 함량이 높았는데 이것은 식물조직에 축적되는 중금속의 양이 중금속의 토양 중 함량, 산성, 이동도, 식물의 습취능력 등의 영향을 받으면서 토양에서보다 많은 양의 원소를 체내에

축적하게 된다는 Thornton[33]의 결과와 일치하였으며 토양 중금속 함량에 대한 식물체내의 중금속 함량을 비교해 볼 때 식물체내의 중금속 함량은 차즈기 > 쭉 > 억새 > 살갈퀴 순으로 조사되었다(Fig. 7).

**우점 식물에 의한 토양 중금속의 연간 제거율**

식물에 의한 Zn과 Pb의 토양 중금속의 연간 제거율은 차즈기(1.68%, 0.34%)가 가장 높았고 억새(1.58%, 0.33%), 쭉(1.57%, 0.16%), 살갈퀴(0.09%, 0.08%) 순이었다. Cu의 연간 제거율은 차즈기가 1.70%로 가장 높았으나 쭉(1.33%), 억새(0.14%), 살갈퀴(0.03%) 순으로 조사되어 Zn, Pb의 제거율과는 다르게 조사되었다(Table 4).

서와 조[31]는 단풍잎돼지풀을 대상으로 연구한 바 본 연구와의 직접적인 비교는 될 수 없지만 그 효율성을 평가해 볼 때 단풍잎돼지풀의 연간 중금속 제거율이 Zn 0.52%, Cu 0.52%, Pb 0.03%이었음을 감안해 볼 때 본 연구에서의 차즈기가 연간제거효율이 아주 높음을 알 수 있었다.

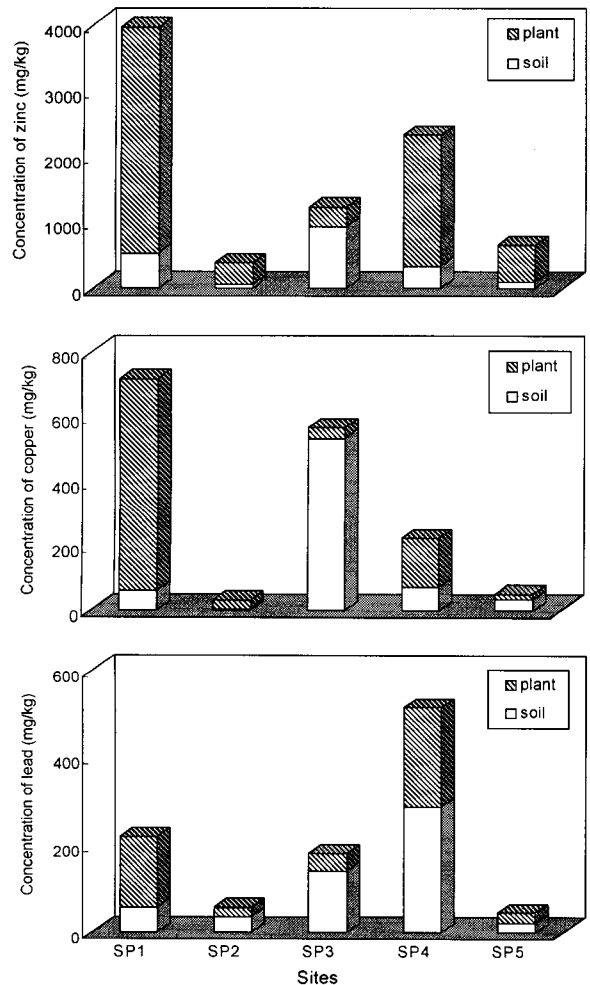


Fig. 7. Relationship of heavy metal concentration between soils and plants in the sampling sites.

Table 4. An annual exclusion ratio by plants (mean±SD, n=3) (%)

Scientific name	Heavy metal	Zn	Cu	Pb
<i>Artemisia princeps</i>		1.57±0.04	1.33±0.07	0.16±0.01
<i>Vicia angustifolia</i> var. <i>segetilis</i>		0.09±0.01	0.03±0.01	0.08±0.01
<i>Miscanthus sinensis</i>		1.58±0.03	0.14±0.01	0.33±0.01
<i>Perilla frutescens</i> var. <i>acuta</i>		1.68±0.02	1.70±0.06	0.34±0.01

또한 차즈기는 Zn, Cu, Pb 등이 많이 축적되어 있고 연간 제거효율도 좋은 것으로 보아 중금속 오염토양을 복원하는 식물치유법(phytoremediation)에서도 널리 이용할 가치가 있는 식물이라 판단된다.

현재까지 폐광산 주변 환경 오염에 관한 주된 연구가 하상퇴적물, 토양 등에 대한 중금속 오염정도 파악, 오염경로와 확산범위 및 존재형태 등을 규명하는데 주력해 왔고 이것들은 주로 물리·화학적인 토양정화 기술방법에 국한된 것으로 실제로 생태계의 영향을 파악할 수는 없다. 따라서 앞으로의 연구 방향은 본 연구와 같은 기초적인 연구를 바탕으로 생물학적 방법을 응용하는 다양한 방법이 연구되어야 할 것으로 생각되며 특히 토양 환경을 정화하는 방법으로 광산 주변의 야생식물들을 이용한다면 저렴한 비용으로 좋은 효과를 기대할 수도 있을 것이다. 뿐만 아니라 본 연구 결과에서 조사된 바와 같이 광산 주변에 우점하는 차즈기의 생리학적 연구를 통하여 정화 및 오염토양 복원 식물로서의 가능성이 지속적으로 연구된다면 폐광산의 효율적 정화를 위해 많은 도움이 될 것으로 생각된다.

## 요 약

식물 비생육지 토양의 깊이별 중금속 함량은 S1지점의 경우 1996년 오염토양 개선사업으로 S1지점 바로 위에다 남은 광미를 복토함으로써 광미 중금속이 강우에 의해 용탈되어 토양에 축적되기 때문에 오염되고 있는 것으로 판단되었고 S2지점은 오염토양 개선사업의 효과로서 표토에서 Zn과 Pb가 토양오염 우려기준을 초과하지 않았으며 Pb의 경우 30~50 cm에서 토양오염 우려기준을 초과한 것은 광맥의 영향 때문이며 구리의 경우는 광산의 채광물로서 오염 정도가 심각하였다. 생육지 토양의 중금속 함량은 같은 표토상에 위치한 광산 위 지점(SP1, SP2, SP3)에서 볼 때 SP1지점에서는 Zn의 함량이 537.5 mg/kg로 가장 높았고, SP3지점에서는 Cu와 Pb의 함량이 가장 높았는데 이는 폐광산에 복토 사업을 했더라도 아직 토양 복원이 완전히 이루어지지 않아 강우와 풍화에 의한 광미의 영향때문인 것으로 생각되며 SP2지점은 다른 지점보다 지대가 높아 광미의 영향을 적게 받는 것으로 생각된다. 식물체내의 중금속 함량은 차즈기 > 쑥 > 억새 > 살갈퀴 순으로 조사되었고 식물에 의한 연간 중금속 제거율 역시 차즈기가 가장 좋은 것으로 조사되었다. 특히 차즈기는

다량의 중금속이 축적되어 있고 중금속 오염 지역에 내성이 있는 지표종으로 생각될 수 있으며 본 식물의 중금속 축적 능력에 대한 더 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

- Bowen, H. J. M. 1979. *Environmental chemistry of the elements*. pp. 333, Academic Press, New York.
- 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. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* **21**, 451-456.
- Grill, E., W. Gekeler, E. L. Winnacker and H. H. Zenk. 1986. Homo-phytochelations are heavy metal-binding peptides of homo-glutathione containing fabales. *Federation of European Biochemical Societies* **205**, 47-50.
- Hale, M. G. and D. M. Orcutt. 1987. *The physiology of plants under stress*. pp. 77-92, John Wiley & Sons Inc., New York.
- Jackson, P. J., P. J. Unkefer, E. Delhaize and N. J. Robinson. 1990. Mechanisms of trace metal tolerance in plant. pp. 231-255, In Katterman F. (eds.), *Environmental injury to plants*, Academic Press Inc., New York.
- Jung, K. C., 1999. *Environment Earth Science*. pp. 601, Sigma Press, Seoul.
- 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.
- Jung, M. C. 1999. Investigation on soil contamination and its remediation system in the vicinity of abandoned Au-Ag mine in Korea. *Econ. Environ. Geol.* **32**, 73-82.
- Jung, M. C. and I. Thornton. 1996. Heavy metal contamination of soils and plants in the vicinity of a lead-zinc mine, Korea. *Applied Geochemistry* **11**, 53-59.
- Kabata-Pendias, A. and H. Pendias. 1992. *Trace elements in soils and plants*. pp. 315, CRC press, Boca Raton.
- Kim, H. A., B. H. Bae, Y. Y. Chang and I. S. Lee. 2002. A study on the heavy metal accumulation of plants at iron mines and a military shooting range. *Korean J. Ecol.* **25**, 7-14.
- Kim, J. K., 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.
- Kim, S. H. and H. T. Chon. 1993. Contamination of heavy metals in soil in the vicinity of the Sambo pb-zn-barite mine. *J. of Mineral and Energy Resources* **30**, 228-237.

14. Kim, S. T., Y. H. Yoon, J. A. Park and U. S. Shim. 1999. Analysis of mine tailings, field soils, and paddy soils around Jingok abandoned mine. *J. of KoSES* **4**, 175-183.
15. Kloke, A. 1979. Content of arsenic, cadmium, chromium, fluorine, lead, mercury, and nickel in plants grown on contaminated soil. pp. 325. UN-ECE Symp., Geneva.
16. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. 1964. Geologic map of Korea Yeongsando sheet 6920-III.
17. Lee, J. Y., I. H. Lee and S. Y. Lee. 1996. Geochemical study on pollution of heavy metals in soils, plants and streams in the vicinity of abandoned metal mines -Dalseong and Kyeongsan mines-. *Econ. Environ. Geol.* **29**, 597-613.
18. Lee, K. C., S. K. Lee, I. H. Han, K. H. Choi and D. Y. Chung. 1999. Distribution of heavy metals in soils around the Keum-Jung mine and remediation. *J. of KoSES* **4**, 25-34.
19. Lee, M. H., H. I. Rhu and Y. S. Suh. 1994. Vertical distribution of heavy metals in paddy soil adjacent to Lead and Zinc mining sites and their relation to soil characteristics. *J. of Kor. Soc. Groundwater Environ.* **1**, 80-84.
20. Lee, T. B. 1980. *Illustrated flora of Korea*. pp. 990, Hyangmoon publishing Co. Ltd., Seoul.
21. Lee, Y. N. 1996. *Flora of Korea*. pp. 1237, Kyo-Hak Publishing Co. Ltd., Seoul.
22. Lee, Y. U., J. I. Chung and Y. H. Kwon. 2001. The characteristics of heavy metal contamination in tailings and soils in the vicinity of the Palbong mine, Korea. *Econ. Environ. Geol.* **34**, 271-281.
23. Ministry of Environment. 1999. Soil Environmental Protection Law.
24. Ministry of Environment. 1996. Standard test method for soil pollution. pp. 480.
25. National Institute of Agricultural Science and Technology. 1988. Methods of soil chemical analysis. pp. 60.
26. Park, C. Y., Y. S. Park and Y. J. Jeong. 1995. Contamination of heavy metals in soil in the Kwangyang mine area. *J. of Mineral and Energy Resources* **32**, 163-174.
27. Park, S. H. 2002. Contamination pattern of soils and surface water in abandoned mine vicinity : Guundong mine in Miryang. pp. 31, Ms. thesis, Miryang National University.
28. Park, Y. H. 1994. Management practices of inactive and abandoned metalliferous mine areas in Korea. Korean Environment Technology & Research. KETRI/1994/ RE-14, Seoul, Korea.
29. Park, Y. S. and J. Kim. 2000. A study on the horizontal and vertical distribution of heavy metal elements in slime dump from Dukum mines, Korea. *Econ. Environ. Geol.* **33**, 91-100.
30. Robinson, N. J. and P. J. Jackson. 1986. "Metallothio-like" metal complexes in angiosperms : their structure and function. *Physical Plant* **67**, 499-506.
31. Seo, S. H. and K. H. Cho. 2002. Removal efficiency of heavy metals by *Ambrosia trifida* in the landfill soils. *Korean J. Ecol.* **25**, 51-55.
32. Smilde, K. W. 1981. Heavy metal accumulation in crops grown on sewage sludge amended with metal salts. *Plant and Soil* **62**, 3-14.
33. Thornton, I. 1983. *Applied environmental geochemistry*. pp. 231-266, Academic presss, London.
34. Yoo, S. H., K. J. Ro, S. M. Lee, M. E. Park and K. H. Kim. 1996. Distribution of cadmium, copper, lead, and zinc in paddy soils around an old zinc mine. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* **29**, 424-431.