

폐광산 주변 토양의 중금속 농도 분포에 관한 연구

A Study on the Distributions of Heavy Metal Concentration in a Soil near Abandoned Mine

양 천 회* · 고 장 석**

Chun-Hoi Yang · Jang-Seog Go

(1998년 7월 9일 접수, 1998년 11월 4일 채택)

ABSTRACT

This study was investigated the distributions of heavy metal concentration in a soil near abandoned mine in Chung Chong Nam Do. The abandoned mines were Gubong gold mine and Sinsung coal mine. The results were as follows :

- 1) The concentration of As and Pb in Gubong mine were 309.2mg/kg and 1163.5mg/kg, that is exceeded the countermeasure criteria. Cadmium concentration was 14.70mg/kg, that is exceeded anxiety criteria. But all items in Sinsung coal mine was detected below criteria.
- 2) The heavy metals contamination of riverbed soil by gold mine showed higher than coal mine.
- 3) The heavy metals contamination in the vicinal paddy and dry field soil area was higher than other mine. Arsenic concentration was 29.29mg/kg, that is exceeded the anxiety criteria as 10.22mg/kg.

1. 서 론

폐광에 따른 토양오염 현상은 폐광의 광미사 등에 축적된 중금속이나 용출수와 같은 오염물질들이 지하수, 강수 및 비산분진등에 의해 광범위한 지역으로 확산되는 것으로 밝혀지고 있

다^{1~2)}.

폐광에 의한 토양오염의 확산과정 및 이에 대한 생물군의 반응 등에 대한 연구는 산업안전 측면에서 폐광의 사후처리 대책을 수립하는데 우선적으로 고려되어야 할 사항이지만 휴·폐광 이후 관리부재로 인하여 고농도의 오염물질들이

* 대전산업대학교 화학공학과

** 충청남도 보건환경연구원

자연 생태계에 침투되어 심각한 사회 환경문제로 제기되고 있다³⁾. 특히 금속광산의 선광시설에서 배출되는 중금속 오염물질들이 전국적으로 산재되어 있고 휴·폐광산에 방치된 광재 또한 토양을 산성화시킬 뿐만 아니라, 각종 유해 중금속의 이온화를 촉진시킴으로써 주된 중금속 오염원으로 작용하고 있다^{4,5)}. 이온화된 중금속 원소들은 자연수를 매개로 이동하여 주변 토양 및 하상 퇴적물에 가용성 염으로 농축되거나 주변 하천의 하류에 있는 농경지로 유입되게 된다⁶⁾.

광재로 인한 중금속 오염 물질의 농도 분포를 파악하는 방법에는 몇 가지 방법이 있다⁷⁾. 기상(氣相)이나 오염 배출량 등 각종 입력자료를 이용한 분산 모델법, 이화학 실험자료를 기본으로 응용 통계를 이용한 수용 모델법, 오염물질을 직접 채취하여 오염 농도를 측정하는 실측조사법 등이 있다. 분산 모델법은 모델 내에서 발생 가능한 자연 현상을 단순화시켜 수학적으로 표시한 만큼 현실과 다른 많은 제약점을 가지고 있다. 또한 수용 모델법은 현장에서 측정이 가능한 장치를 이용하여 직접 조사함으로써 가장 정확하게 목적을 달성할 수 있고 대기 중으로 확산된 확산 분진들의 상태를 파악하는데 적합한 방법이다. 그러나 광재는 입자가 커서 비산에 의한 확산 가능성이 적기 때문에 시료의 실측에 의한 조사방법이 가장 타당하다고 생각되어 본 연구에서는 실측조사법을 사용하였다.

폐광산의 갱이나 광미사의 퇴적장으로부터 유출되는 유해 중금속들로 인한 토양오염은 주변 하천의 농업용수를 오염시켜 농작물에 피해를 주게 되므로 농작물의 생육에 지장을 가져올 뿐만 아니라 수확량이 감소하게 되고 또 오염된 농작물을 섭취하는 인간이나 동물들에게 만성적인 장애를 일으키기도 한다⁸⁾.

본 연구는 충청남도 내에 있는 폐광산중 금속광산과 석탄광산의 광재와 유출수로부터 발생된 주변토양의 중금속 오염도를 조사·분석하여 폐광산의 종류에 따른 오염인자의 특징과 그 문제점을 찾아 향후 폐광산의 관리 대책을 세우는데 기초자료로 삼고자 한다.

2. 실험 및 방법

2.1 시료채취

본 연구의 대상은 충청남도 내에 위치하고 있는 금속(금) 광산인 구봉광산('71년도 폐광)과 석탄광산인 신성탄광('93년 폐광) 등 2개의 폐광산을 대상으로 하여 광산내의 광재와 반경 1 Km이내 논 토양, 밭토양, 하천 저질 등을 100m 단위로 나누어 지그재그형으로 여러 곳에서 4회 걸쳐 시료를 채취하여 분석하였다.

대조토양은 오염원인 광미사의 영향을 가장 적게 받을 것으로 판단되는 지역을 선정하여 토양을 채취한 후 비교·분석을 하였다.

2.2 분석방법

채취한 시료는 균일하게 혼합하여 직사광선이 닿지 않는 장소에서 자연 건조시킨 후 8mesh체를 통과한 미분쇄 토양을 분석시료로 사용하였다.

광재와 주변 농경지 토양, 하천저질 및 대조토양은 토양오염 공정시험법에 따라 전 처리한 후 원자흡광도계(Perkin Elmer 373)를 사용하여 Cu, Cd, Pb, Zn을 측정하였고, As는 UV/VIS Spectrophotometer(Perkin Elmer Lambda 2), Hg은 Mercury Analyzer(Mercury Detector MDA: NIC), pH는 pH Meter(HANNA HI 8418)를 사용하여 측정하였다⁹⁾.

3. 결과 및 고찰

3.1 토양중 중금속의 자연부존량과 기준

토양중 중금속 오염 기준은 대책기준과 우려기준으로 나누어 설정하고 있는데, 중금속 오염 정도가 사람과 동·식물의 생육에 지장을 초래할 우려가 있어 토지의 이용 중지나 시설의 설치 금지 등 규제조치가 필요한 정도의 오염상태를 토양오염 대책기준으로, 더 이상 오염이 심화되는 것을 예방하기 위하여 대책기준의 약 40% 정도를 토양오염 우려기준으로 구분하여 설정하였으며 또한 대상지역을 토양의 용도에 따라 농경지, 공장·산업지역으로 구분하여 기준을 설정하여 비교하고 있다^{9,10)}.

Table 1 The results of solid analysis network from '92 to '93 and standard of soil to contamination on soil environment conservation law in Korea⁹⁻¹⁰⁾

(unit : mg/kg)

Investigation an agency	Area	As	Cd	Cu	Pb	Zn	Hg	pH
Anxiety criteria	Agriculture	6	1.5	50	100	600	4	-
	Factory · Industry	20	12	200	400	1500	16	
Countermeasure criteria	Agriculture	15	4	125	300	-	10	-
	Factory · Industry	50	30	500	1000	-	40	
Conservation content in soil		0.505	0.212	5.063	5.375	-	-	-
'92~'93 Environment hall data	The whole country avg.	0.51	0.205	4.874	7.144	8.69	0.111	5.9
	Nature content	0.56	0.135	3.995	5.375	4.362	0.085	5.7
Average		0.861	0.536	10.024	16.705	20.666	0.165	5.7

3.2 광미사의 중금속 농도

금속광산의 광미사는 원래 광물에 포함된 각종 금속성분이 지하에 매장되어 있는 것을 파내어 잘게 부수고 파쇄하여 가루로 만들어 필요한 금속성분을 추출하는 선광과정에서 금속성분을 100% 추출하지 못하고 모래나 돌가루에 미량씩은 남아있는 상태로 버려지게 된다.

이 광미사가 자연의 물리적인 힘에 의해 농경지에 유입되었거나 혹은 하천의 저질토양에 퇴적되면서 중금속 성분이 물에 용출되어 수로를 통하여 논이나 밭에 유입될 경우 농경지가 오염되는 것으로 알려져 있다. 이들 폐광지역에서 광재의 pH와 중금속 평균 함량을 Fig. 1에 나타내었다.

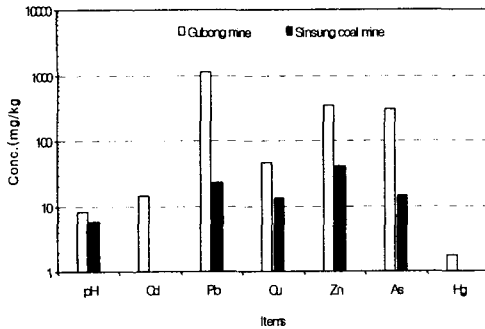


Fig. 1 The pH and heavy metal concentration in a mine dross near abandoned mine

pH의 경우, 금속광산(구봉광산)의 광미사는 평균 8.3, 석탄광산(신성탄광)의 광재는 평균 5.8로 나타나 금속 광산은 알칼리성을, 석탄광산은 약한 산성을 나타내었다.

Cd와 Pb는 구봉광산의 경우 14.70mg/kg과 1163.48mg/kg, 신성탄광의 경우에는 0.26mg/kg과 23.41mg/kg으로 큰 대조를 보였는데, 신성탄광은 주생산품이 석탄이기 때문에 중금속함량이 적은 것으로 판단할 수 있고, Cu, Zn, As도 금속광산이 석탄광산보다 높은 함유량을 보였으며, Hg 또한 신성탄광의 경우 0.078mg/kg인데 반해 구봉광산은 1.733mg/kg으로 금속광산의 중금속 함량이 두드러지게 많은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 국내 다른 탄광에서도 비슷한 현상으로 나타났다²⁾.

3.3 대조토양의 중금속 농도

대조지점 토양은 폐광산에서 배출되는 광석의 퇴적물이나 광미사등의 물리적·자연적인 영향을 가장 적게 받는다고 판단되는 폐광산주변의 농경지 토양을 채취·분석하였는데 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

대조토양에서의 중금속 함량 분포를 살펴보면, 구봉광산의 경우 Zn>Pb>Cu>As>Cd>Hg 순으로 나타났고, 신성탄광의 경우에는 Zn>Cu>Pb>As>Cd>Hg의 순으로 농경지 토양에서와 같은 순위를 보였다.

대조토양에서는 Pb와 As는 구봉광산의 경우

4.46mg/kg과 0.59mg/kg, 신성탄광의 경우에는 0.48mg/kg과 0.09mg/kg으로 금속광산이 석탄광산보다 농경지와 대조토양에서도 주변 토양에 대한 오염부하량이 상대적으로 높게 나타났다.

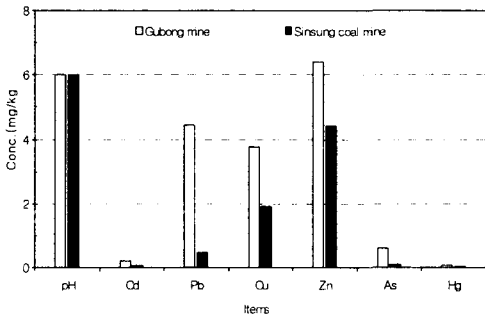


Fig. 2 The pH and heavy metal concentration in contrast soil near abandoned mine

3.4 농경지의 중금속 농도

조사지역 주변 토양의 pH와 Pb, Cd, Cu, Zn, Hg, As등의 중금속 함량을 Fig. 3에 나타내었다.

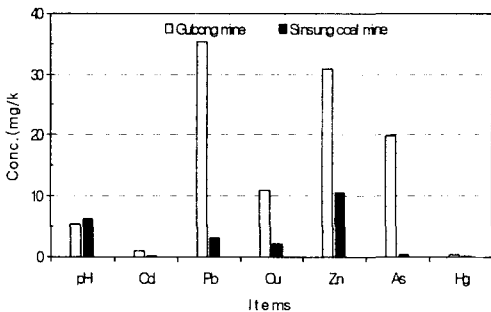


Fig. 3 The pH and heavy metal concentration in a paddy and dry field soil near abandoned mine

구봉광산의 경우, 주변 농경지 토양의 pH는 평균 5.5로 대조토양의 6.0보다 더 강한 산성을 나타내었다. 광재는 알칼리성이 강한 8.3인데 비해서 농경지의 토양의 pH가 더 낮은 것은 광미사등에 함유된 황화광물들의 산화작용이 빠르게 진행되기 때문으로 사료되며 신성탄광의 경우에는 대조토양과 pH농도가 비슷하게 나타났다¹¹⁾.

중금속의 용해도는 pH가 낮아질수록 증가하

기 때문에 토양 중에서 중금속의 용해성이 커질 수가 있다. 중금속 오염도를 측정한 결과, 금속광산 주변 농경지의 오염도가 석탄광산 주변의 농경지보다 훨씬 심한 것으로 나타났는데 이것은 광재가 산화물 또는 각종 염의 형태로 존재하고 있지만 황화물 또는 황산염의 형태가 많아 이로인하여 주변 토양의 중금속 함량에 관련이 깊은 것으로 판단된다⁴⁾.

대조지역과 비교해 볼 때 pH는 거의 변화의 폭이 크지 않았으나 중금속 농도는 대조지역에 비해 3배에서 높은 것은 7~8배 이상의 차이를 보였다.

농경지 토양에서의 중금속함량 분포는 구봉광산의 경우 Zn>Pb>Cu>As>Cd >Hg 순으로 나타났고, 신성탄광의 경우에는 Zn>Cu>Pb>As>Cd>Hg의 순으로 나타나 광종이 서로 다른 광산주변의 농경지 토양에서 중금속 분포도는 광산지역 평균 함유량의 농도 순위인 Zn>Pb>Cu>As>Cd>Hg와 비슷한 경향을 보였다¹²⁾.

Cu는 구봉광산의 경우, 논토양은 평균 10.58 mg/kg, 밭토양은 평균 11.05mg/kg을 나타내어 다른 지역 광산의 평균함량과 비슷한 경향을 보였다.

신성탄광의 경우에는 논·밭토양은 광재에 함유된 Cu함량이 2.04mg/kg을 나타내어 오염농도의 상관성이 비교적 낮았는데 이것은 석탄광재에 함유된 Cu의 함량이 높지 않기 때문이다.

As는 금속광산의 경우, 논 토양은 평균 10.22 mg/kg으로 토양오염 우려기준을 1.7배 초과하고 있으며, 밭토양은 평균 29.29mg/kg의 검출량을 보여 농수산물 재배 등을 제한할 수 있는 토양오염 대책기준을 약 2배가량 초과하고 있었다. 석탄광산에서 논 토양은 0.29mg/kg으로 천연부존량을 밑돌고 있으며 밭토양에서는 0.27~0.77mg/kg으로 천연부존량을 넘어서는 지점도 있었다¹⁰⁾. 논·밭토양은 점오염원인 광산에서 거리가 멀어질수록 농도는 낮아졌으나 광미사의 영향으로 생각되는 방대한 오염지역을 형성하고 있기 때문에 추가적인 정밀조사를 통하여 대책이 강구되어야 할 것으로 판단되었다.

Cd은 구봉광산의 경우, 농경지 토양에서 평균 0.95mg/kg으로 광산지역 평균 함유량의 1.4배,

밭토양은 평균 1.148mg/kg으로 2.1배를 나타내어 전 지점에서 광산지역 Cd의 평균 함량보다 높은 검출량을 보였다. 신성탄광의 경우 농경지 토양은 0.17mg/kg으로 전국 토양중의 자연부존량과 비슷한 농도를 보였고, 밭토양은 평균 0.128 mg/kg으로 자연부존량보다 낮은 농도를 나타내어 석탄광재에 함유된 Cd는 금속광산의 광재와는 달리 농경지에 큰 오염원으로 작용하지 않는 것으로 판단된다.

논·밭토양의 경우에 거리가 멀어질수록 Cd의 함유량은 낮아지는 경향을 보여 거리별에 따른 농도의 상관성이 있는 것으로 나타났다. 점오염원의 영향으로 Cd에 대한 오염부하량이 거리가 가까울수록 높아져 토양에서 Cd의 이동속도가 느린 것으로 판단된다¹³⁾.

Pb는 논 토양에서 12.87~50.53mg/kg, 밭토양은 평균 44.28mg/kg을 나타내어 전 지점에서 광산지역의 평균 함량보다 높은 오염도를 나타내었고, Hg은 구봉광산의 경우 논 토양은 평균 0.378 mg/kg, 밭토양은 평균 0.345mg/kg으로 전국 광산지역의 평균 함유량보다 논 토양은 약 2.3배, 밭토양은 약 2.1배의 높은 함유량을 나타내었다.

3.5 하천 저질의 중금속 농도분포

Fig. 4는 폐광 주변 하천저질에 대한 중금속 농도 분포를 나타낸 것이다.

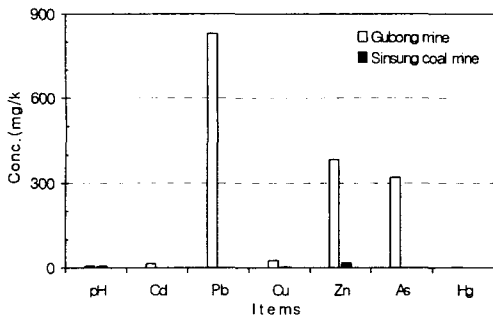


Fig. 4 The pH and heavy metal concentration of bed soil in streams near abandoned mine

금속광산의 하천저질에서 Zn은 평균 385.43 mg/kg으로 광재의 평균 함유량 353.52mg/kg보

다 높은 농도를 나타내었는데 이것은 광재에서 용출된 Zn이 하천의 저질에 퇴적되어 농축되어 있는 것으로 판단된다. 석탄광산 하천저질에서 Zn은 평균 17.16mg/kg으로 탄광재에 함유된 Zn 함량의 44%에 해당되는데 이것은 Zn광물이 주로 용해도가 낮은 황화물의 형태로 존재하기 때문으로 판단된다. 금속광산의 광재와 석탄광산 광재 사이의 Zn에 대한 오염부하량은 금속광산 주변의 하천저질이 약 9배 가량 오염에 노출되어 있다고 할 수 있는데 이것은 금속광산의 광재속에 Zn함유량이 탄광재보다 약 9배정도 높은 것과 일치하였다.

Cu는 금속광산 하천저질의 경우 평균 24.37 mg/kg을 나타내어 광재에 포함된 함유량의 약 52%에 해당되는 농도를 보여 하천을 통해서 농경지로 유입되고 있는 경향을 보였다.

금속광산 하천저질의 Cd은 평균 14.699mg/kg으로 광재의 3.7배 농도로 토양오염 대책기준을 전지역에서 초과하고 있었지만, 거리가 멀어질수록 Cd에 대한 오염부하량은 낮아지는 것으로 나타났는데 이것도 Cd광물이 황화물의 형태로 존재하고 있어 그 용해도와 관련이 있는 것으로 판단되었다. 석탄광산의 하천저질에서는 Cd이 평균 0.351mg/kg을 나타내어 거리에 따른 Cd오염의 상관성이 크게 낮았다.

Pb는 신성탄광의 경우, 하천저질과 농경지 및 대조토양의 전 지점에서 천연부존량보다 낮은 검출량을 보였다. 석탄광재는 금속광산의 광재와는 달리 주변 토양에 대해서 Pb에 대한 오염원으로 작용하지 않고 있다고 판단되었다.

Hg은 금속광산 하천저질의 경우 2.128mg/kg으로 광미사보다 높은 함유량을 나타내었는데 이것은 광미사에서 용출된 Hg이 하천저질의 퇴적물에 무기수은으로 축적·소멸되지 않고 있으며¹³⁾ 이것이 농업용수 사용에 따라 농경지로 유입되면서 오염부하량이 커지는 것으로 판단되었다. 석탄광산의 경우 평균 0.061mg/kg으로 Pb는 석탄광산 주변보다는 금속광산 주변의 하천저질에서 상대적으로 오염부하량이 높은 것을 알 수 있었다.

As는 금속광산 하천저질의 경우 평균 321.22 mg/kg을 나타내어 거리가 멀어져도 As의 농도

는 큰 차이를 보이지 않았으며 하천저질의 전 지점에서 토양오염 우려기준 및 대책기준을 초과하고 있는 것으로 보아 하천에 유입된 광재는 계속적으로 하천에 체류하면서 주변 토양오염의 주 이동통로인 것으로 판단되고, 석탄광산 주변의 하천저질은 평균 1.15mg/kg을 나타내어 석탄광재의 함유량에 비해 약 8%의 오염부하량을 보였지만 광산지역 평균 함유량보다 높은 농도를 보였고 거리가 멀어질수록 As의 농도가 높아지는 경향을 보였다. 이것은 하천수의 흐름이 빠르고 퇴적물이 적은 상류보다는 하천수의 흐름이 느리고 하상퇴적물이 많은 하류의 저질토양에 As가 많이 함유되어 있는 것으로 판단된다¹⁴⁾.

4. 결 론

폐광산중 금속광산과 석탄광산 주변토양의 중금속 농도 분포를 조사·분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 광미사 측정 결과, 구봉광산에서 Cd이 14.70 mg/kg, Pb이 1163.48mg/kg, As가 309.20mg/kg이 검출되었고, 신성탄광의 경우에는 극미량만이 검출되었다. 따라서 구봉광산은 As, Pb이 대책기준을, Cd은 우려기준을 초과하였고 신성탄광의 경우에는 모든 항목이 우려기준 이하로 나타났다.
- 2) 하상퇴적물의 오염도 조사 결과, 금속광산의 광재가 석탄광산의 광재보다 하천저질의 토양에 미치는 중금속 오염인자의 영향이 높게 나타났는데 이것은 금속광물의 용해도와 관련이 있는 것으로 판단되었다.
- 3) 논·밭토양의 중금속 함유량 측정결과, 금속광산 주변 농경지에서는 전국 금속광산 지역의 평균량 보다 높게 나타났는데, As는 우려기준을 초과하였다. 탄광주변의 농경지는 자연부존량 보다 낮은 오염부하량을 보여 금속광산의 광재가 주변토양의 중금속 오염원으로 크게 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 1) M.D. Lee, et al., "In-situ restoration tech-

- niques for aquifers contamination with hazardous wastes", *Journal of Hazardous Material*, Vol. 14, pp. 71~82, 1994.
- 2) 정수일등 9명, "전라북도내 휴·폐금속광산 주변지역의 토양 및 수질오염에 관한 연구", 전라북도 보건환경연구원보, 제9권, p. 207, 1996.
- 3) "충남 환경보전 종합대책 기본계획수립", 충남대학교 환경문제연구소 최종보고서, 1996.
- 4) Chih-Huang Weng, "Removal of heavy Metals by Fly Ash", Thesis for Master of Civil Engineering, University of Delaware, p. 61, 1990.
- 5) J.E. Fergusson, *The heavy metal element : "Chemistry, Environmental Impacts and Health Effects"*, Pergamon Press, p. 371, 1990.
- 6) J.S. Devenny, "Subsurface migration of hazardous waste", *Van Nostrand Reinhold*, p. 387, 1990.
- 7) 김동술 외3인, "풍동을 이용한 비산 탄진 농도 분포 파악에 관한 연구", *대한환경공학회지*, 제14권, 제3호, pp. 169~176, 1992.
- 8) 수질오염·폐기물·토양오염 공정시험방법, 동화기술, 1996.
- 9) 환경부, *한국환경연감*, p. 38 1996.
- 10) 환경부, *환경백서*, pp. 184~201, 1996.
- 11) X. Xian, "Effect of pH on chemical forms and plant availability of Cd, Zn and Pb in polluted soils", *Water · Air · Soil Pollution*, Vol. 45, pp. 265~273, 1995.
- 12) S. Kou, "Concurrent Sorption of Phosphate & Zinc, Cadmium or Calcium by Hydrous Ferric Oxides", *Soil Sci. Am J*, Vol. 50, pp. 1412~1419, 1986.
- 13) C. Hinz and H.M. Selim, "Transport of Zinc and Cadmium in Soils", *Soil Sci. Am. J.*, Vol. 58, pp. 1316~1327, 1994.
- 14) 박용하, "중금속 및 비소오염 토양질 평가를 위한 토양오염 지표의 고안과 응용가능성", *한국토양환경학회지*, Vol. 1, No. 1, pp. 47~54, 1996.