

(사) 한국 토양환경학회 1997년  
춘계학술발표회 논문집 5월16일

## 폐금속광산이 주변 토양계에 미치는 환경적 영향 -오염범위 및 복구-

나훈기·송재준  
목포대학교 환경공학과

## Environmental impacts on the soil system of abandoned metal mine - pollution extent and remediation -

Choon-Ki Na · Jee-Jun Song  
Dept. of Environmental Eng. Mokpo Natl. Univ.

### 요 약 문

폐금속 광산 주변 및 광산 하부 농경지 토양에 대한 중금속 오염원으로서 폐금속 광산 주변에 방치된 폐석의 영향을 고찰하고 오염토양에 대한 복구방법으로서 반전객토의 효율성을 검토하기 위하여 동진금·은·동 광산 주변토양과 하부 농경지 중 오염된 논, 객토된 논 및 오염되지 않은 논을 선정하여 각각의 토양과 벼에서 보여지는 금속원소의 함량과 분포특성을 비교·고찰한 결과, 동진광산에 주변에 방치된 폐석은 폐광된지 30여년이 지난 지금에도 주변토양 및 수계 하부의 농경지에 강한 중금속 오염원으로 작용하고 있음을 보여 이들의 광해를 방지하기 위해 적절한 복구대책이 필요한 것으로 판명되었다. 오염토양의 복구법으로서 반전객토법은 비록 토양 중의 오염성분을 제거한다는 측면에서는 완전치 못하였으나 반전객토지에서 산출된 나락의 중금속 함량(Cd 0.015ppm, Cr 0.07ppm, Cu 0.567ppm)은 비객토 오염지(Cd 0.096-0.215ppm, Cr 0.195-0.275ppm, Cu 1.085-1.151ppm)에 비해 대부분의 원소에서 2배 이상 낮은 값을 보이고 있어 농작물에의 중금속 전이를 억제하는 데는 상당히 효율적임을 시사했다. 이러한 결과는, 단순히 토양의 물리성 개선 및 이에 따른 토양환경의 변화 등에 의한 일시적 효과일 수 있음을 배제할 수 없지만, 적어도 반전객토법이 토질개선 방법 중 가장 간편하고 오염된 토양부분의 배출도에 대한 처리문제 및 이로 인한 이차오염문제 등을 고려하지 않아도 된다는 점을 감안할 때 소규모 금속광산 주변으로 비교적 오염정도가 약한 토양을 정화법으로 이용될 수 있음을 시사한다.

주제어: 금속광산, 토양생태계, 중금속오염, 반전객토

## 서 론

금속광산의 폐석은 인체에 유해한 중금속류를 다량 함유하고 있을 뿐만 아니라 대부분 유화광물을 다량으로 함유하고 있어 풍화시 다량의 수소이온을 방출함에 따라 주변환경을 강하게 산성화시키고 각종 중금속의 이온화를 촉진시켜 환경중에 유해금속원소의 농도를 증가시키는 주된 오염원이 되고 있음이 밝혀지고 있어, 이들 폐광산이 미치는 환경 위해성 방지 및 적절한 복구대책이 요구되고 있다.

본 연구는 소규모 금속광산 주변에 방치되어 있는 폐광석이 하부 농경지를 포함한 주변 토양계에 미치는 환경 위해성을 파악하고, 오염 농경지의 복구대책의 일환으로 수행된 반전객토의 효율성을 검토하여 향후 폐광산 주변 중금속 오염토양의 복구를 위한 기초자료를 얻기 위하여, 동진 금-은-동 광산지역을 대상으로 선정하고, 광산주변 및 하부 농경지에서 채취된 토양과 식물시료(썩 및 농작물)의 원소함량 분포를 조사하여 토양생태계에 대한 폐광석의 영향범위를 추적하였다. 또한 하부 농경지 중 과거 산성수에 의해 침수되었던적이 있는 논(오염지)과 침수된 후 토질개선을 위해 반전객토를 실시한 바 있는 논(반전객토지)에서 채취된 논토양과 벼의 중금속 함량 및 분포유형을 대비 고찰함으로써 오염토양의 정화법으로서 반전객토의 효율성을 검토하였다.

### 대상지역의 환경지질적 배경

동진광산은 전주시로부터 동남쪽으로 약 50km 떨어진 전북 진안군 성수면 내동산의 정상부근에 위치하고 있는 금·은·동광산으로 1965년경까지 매우 활발하게 채굴된 후 광산주변에 다량의 폐광석을 방치한채 폐광되어있다. 이 광산은 내동산 정상부근에 위치하여 이를 중심으로 도통리 중평마을 쪽으로 연결된 북쪽사면과 구신리 염북마을 쪽으로 연장되는 남쪽사면으로 나누어지나 대부분의 폐석은 남쪽사면에 광범위하게 방치되어 있다. 방치된 폐석에서 관찰되는 주된 광석광물은 황철석, 황동석, 섬아연석, 휘수연석 등이며 그의 유비철석, 방연석, 자류철석, 휘동석 등도 소량 포함되어 있다. 이 지역의 수계는 내동산 정상부근에서 스며나오는 지하수를 발원수로 하는 하천수계가 남, 북측사면에 방치된 폐석더미로 복류된 후 그 하부에서 다시 스며나와 표류수를 형성하는 소규모의 영구천으로 구성되어 있으며 그 하부에 수계를 중심으로 양변에 발달된 계단식 논이 주 수원으로 이용되고 있었다. 이들 논은 토질은 자갈을 다량 함유하는 사질 산간토양으로 매우 척박하여 식물생산기반으로서 그 질은 매우 낮은 것으로 판단되었다.

## 재료 및 방법

동진광산에 방치된 폐광서더미가 주변 토양 및 식물에 미치는 중금속 오염범위 및 정도를 파악하기 위하여 동진광산을 축으로 동서 3.6km× 남북 4.6km의 면적을 대상으로 총 61개의 토양(10-20cm)과 썩(잎)을 채취했으며 또한 하부 농경지 중 비오염지, 오염지 및 반전객토지의 심도별 논토양(5-10cm 간격)과 벼포기를 각각 채취하였다. 토양 및 식물시료는 각 채취점을 대표할 수 있도록 1m<sup>2</sup> 정도의 면적에서 소량씩 채취하여 혼합한 것을 한 채취점의 시료로 하였다. 모든 시료는 1996년 9월 중순에서 10월 하순사이에 채취되었다. 채취된 토양은 실험실에서 완전 건조시킨 다음 10mesh 이하의 입도로 분리하였다. 원소분석을 위한 토양의 전처리법은 완전용해법(HNO<sub>3</sub>+HF+HClO<sub>4</sub>)과 0.1N(Cu)과 1N HCl(As) 용액을 이용하여 추출하는 공해공정시험법, 다양한 시약에 의한 연속추출법에 의해 수행하였다. 식물시료는 시료의 표면에 부착되어있는 분진이나 불순물을 충분히 제거한 다음 전기 건조기를 이용하여 완전 건조시킨 후 적량을 자기증발접시에 취해 전기로를 이용하여 약 400℃에서 6시간 정도 회화시켜 그 회분을 혼합산으로 처리하여 용해시켰다. 원소분석은 ICP-AES와 Graphite furnace-AAS를 이용하여 실시하였다.

## 결과 및 고찰

**폐광석의 영향범위:** 0.1N HCl에 의해 추출된 토양 중의 Cu함량은 0.18-110ppm으로 매우 다양한 범위를 보였으나 대부분 환경부의 토양측정망에서 측정된 우리나라 토양의 Cu 평균치 5.24ppm 보다 낮았고 단지 폐광석 주변 및 남측사면 하부 농경지 주변 토양에서만 토양오염기준치(Cu=40-50ppm)을 초과하는 범위를 보였다. 한편 완전용해법에 의해 수행된 Cu분석값은 4-850ppm의 범위로 0.1N HCl 추출량과 유사한 Cu 부화대를 형성하면서도 양자간의 상관성은 매우 낮았다. 이는 추출함량이 가용성분의 이동에 의해 지배되는 반면 총함량은 대부분 쇄설성 이동에 의해 운반된 폐광석광물의 풍화생성물의 존재여부에 의해 지배되고 있기 때문인 것으로 판단된다. 1N HCl용액으로 추출된 토양중의 As함량(0.03-352ppm) 역시 Cu와 마찬가지로 광산주변 및 남쪽 수계사면의 토양에서는 급격히 높아지는 경향(>12ppm)을 보였다. 특히 폐광석 주변 및 하부 농경지 주변 토양에서는 100ppm 이상의 As함량을 보이고 있는 곳도 있어 오염정도가 매우 심각함을 보였다. 토양과 동일지점에서 채취된 썩 중의 Cu 함량은 7.57-55.2ppm의 범위를 보였으며 토양과 마찬가지로 광산의 남쪽사면을 중심으로 강하게 농축된 경향을 보였다. 특히 주목할만한 사실은 토양에서 보여지지 않던 북쪽사면의 수계하부에서 부화대가 형성된다는 점이다. 이는 썩 중에 함유된 Cu의 오염기준치가 설정되어있지 않은 관계로 상부의 폐광석에 의해

북쪽사면의 하부지역이 오염되었는지 여부는 판단할 수 없지만 적어도 북쪽사면의 하부지역 역시 남쪽사면과 마찬가지로 상부의 폐광석에 의해 얼마간 영향을 받고 있음을 추정할 수 있게 한다. 결과적으로 토양 및 축에서 보여지는 원소들의 공간적 분포양상은 동진광산에 방치된 폐석의 환경적 영향범위가 광산주변은 물론 남쪽사면의 하부 농경지에 까지 확산되어 있음을 보이고 있어 농작물에 대한 광해 및 중금속 오염을 방지하기 위한 적절한 대책이 필요함을 나타내고 있다. 한편 공해공정시험법에 따라 추출 처리하여 얻은 토양 중의 Cu함량은 완전용해처리하여 얻은 토양의 Cu함량에 비해 축과의 상관성이 오히려 더 낮아지는 경향을 보여, 광산주변 토양 중의 중금속 함량으로부터 농작물 등 식물계의 중금속 농축정도를 예측하고자 하는데 있어 공해공정시험법은 완전용해법과 비교하여 뚜렷하게 효율적이지 못함을 시사하고 있어 그 개선이 요구되고 있다.

**논토양에서의 원소분포특성:** 완전용해법에 의해 처리된 각 논토양의 평균 원소함량은 오염지>반전객토지>비오염지순으로 낮아지는 경향을 보였다. 각 원소의 심도별 변화거동은, Mn과 Fe의 경우 각 농경지별 뚜렷한 차이가 없었으나, Cu와 Zn은 오염지의 경우 표층부에서 부화되고 지표하 15cm 이하부터는 낮아지는 역 S자형 분포를 보이는 반면 반전객토지는 오염지의 평균치에 가까운 함량범위에서 불규칙하면서도 일정한 함량분포를 보여 서로 상이한 수직적 분포특성을 보였다. 특히 오염 농경지의 토양은 반전객토지나 비오염지에 비해 환경중에서 이동하기 쉬운 가용성염형과 탄산염으로 존재하는 중금속의 존재비가 상대적으로 높아지는 특성을 보였다. 이러한 결과는 반전객토에 의해 오염토양을 개량하고자 할 경우 바로 반전시키기보다는 오염된 표층토를 10~20cm 정도 걷어내고 반전시키는 배출토-반전객토 쪽이 훨씬 효율적일 수 있음을 시사한다.

**농작물중의 금속원소함량:** 광산의 남쪽사면 하부에 위치하는 농경지 중 오염지와 객토지에서 채취된 벼포기를 줄기, 잎, 나락으로 분류하고 각각의 원소함량을 분석한 결과, 각 부위별 원소의 농축정도는 농경지 또는 원소에 따라 서로 달라지는 경우가 많아 일관성이 없었다. 특히 이러한 일관성의 결여는 줄기와 잎 사이에서 뚜렷하였으며 나락의 경우는 Cu를 제외한 모든 원소에서 일관적으로 가장 낮게 농축되는 경향을 보였다. 특히 인간생활에 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 나락만을 볼 때 Mn과 Zn을 제외한 모든 원소에서 객토지 나락(Fe=6.24ppm, Cd=0.015ppm, Cr=0.07ppm, Cu=0.567ppm)은 오염지의 나락(Fe=7.86-12.52ppm, Cd=0.096-0.215ppm, Cr=0.195-0.275ppm, Cu=1.085-1.151ppm)에 비해 농도가 현저히 낮아지는 경향을 보였다. 이러한 결과는 중금속으로 오염된 토양을 복구하는데 있어 특히 농작물 중의 중금속 함량을 낮추는데 있어서는 반전객토법이 효율적으로 이용될 수 있음을 시사한다. 그러나 반전객토법은 오염된 토양을 하부의 비오염 토양과 단순히 혼합하는 방법이기 때문에 토양의 분석결과

에서 보였듯이 오염성분을 제거한다는 측면에서는 완전치 못하며 상기와 같은 효과가 단순히 토양의 물리성 개선 및 이에 따른 토양환경의 변화 등에 의한 일시적 효과일 가능성 역시 전적으로 배제할 수 없을 것으로 판단된다. 따라서 오염토양의 복구방법으로서 반전객토법의 유효성을 정확히 평가하기 위해서는 보다 장기적으로 모니터링이 필요할 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 현 자료는 반전객토이 토질개선 방법 중 가장 간편하고 오염된 토양부분의 배출도에 대한 처리문제 및 이로 인한 이차오염문제 등을 고려하지 않아도 된다는 점 등을 함께 고려할 때 복토객토법이나 배출토객토법에 비해 경제적으로나 환경적으로 우수한 방법일 수 있음을 입증하고 있어 소규모 금속광산 주변으로 비교적 오염정도가 심하지 않은 토양을 정화하는데 있어 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 결 론

1) 동진광산은 폐광된지 30여년이 지났음에도 불구하고 그 주변에 방치된 폐광석에 의한 주변 토양 및 식물계의 중금속 오염현상은 여전히 심각한 수준을 유지하고 있었으며 특히 광산의 남쪽사면의 하부 농경지에서 매우 두드러지는 경향을 보여 적절한 광해방지대책이 필요함을 나타내고 있다.

2) 반전객토된 논토양 중의 평균원소함량은 오염 논토양과 유사한 범위를 보였으나 오염 논토양에서 뚜렷하게 나타나는 표층부화현상이 없는 대신 전체적으로 오염 논토양의 평균값과 유사한 농도범위에서 거의 일정한 심도별 함량변화를 보여, 반전객토법을 이용하여 중금속으로 오염된 토양을 개선하고자 할 경우 바로 반전시키기 보다는 중금속이 농축되어 있는 표층토양(10-20cm)을 걷어내고 반전시키는 배출토-반전객토법이 보다 효율적일 수 있음을 시사한다.

3) 반전객토지에서 산출된 나락의 중금속 함량( $Cd=0.015ppm$ ,  $Cr=0.07ppm$ ,  $Cu=0.567ppm$ )은 오염지에 비해 대부분의 원소에서 2배 이상 낮아진 경향을 보여 농작물의 중금속 오염을 억제하는데 있어 반전객토법이 상당히 효율적으로 이용될 수 있음을 시사한다. 따라서 반전객토법은 복토객토법에서의 고비용 문제, 배출토객토법에서의 배출오염토 처리 및 그로 인한 이차오염문제 등을 고려하지 않아도 된다고 하는 점에서 중금속 오염정도가 심하지 않은 소규모 금속광산 주변의 농경지에 대해 유용한 복구수단으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.