

## 비소를 포함한 중금속으로 오염된 토양 정화를 위한 석회석( $\text{CaCO}_3$ ) 안정화 효율 규명

이민희<sup>1)\*</sup> · 강현민<sup>1)</sup> · 김인수<sup>1)</sup> · 장영진<sup>1)</sup>

### 1. 서 론

현재 국내의 휴/폐광산의 수는 약 2000 여개로 추정되며, 광업 행위를 중지하면서 적절한 오염 방지 대책이나 복원 대책을 세우지 않고 채광 현장, 광미 및 폐석 적치장, 광산 시설물들을 그대로 방치하기 때문에, 이들에 의한 자연 환경과 생활 환경상의 위해는 매우 심각한 수준이다. 특히 금속광산에서 발생하는 대표적인 광해 현상은 산성 갱내 침출수의 유출, 광폐석 적치장으로부터 침출수의 누출, 광산 폐기물 (광미, 광폐석등)의 유실, 광미의 비산, 지반 침하 등으로서, 이들 중 중금속을 함유한 산성 배수의 유출과 광산 폐기물의 유실, 침출수의 유출 현상이 주변 하천, 토양, 생태계에 가장 큰 영향을 끼치고 있다. 따라서 광해에 대한 원인과 현상을 조사하여 환경적인 대책을 수립하고, 복원 사업을 수행함으로써 오염원을 제거하는 것은 폐광산 주변 환경 개선을 위해 매우 중요하다.

실제로 국내 휴/폐광산 주변 지역의 토양 오염 정밀 조사를 실시하여보면, 대부분의 경우 오염 농도차이에 따라 오염 지역을 나눌 수 있으며, 오염원인 광산 주변에 근접한 토양들은 오염 농도가 매우 높으나 광산 근처에 한정되어 있고, 오염원으로부터 멀어질수록 저농도를 나타내며 매우 넓은 지역에 걸쳐 오염 토양이 존재하는 오염 분포 양상을 나타낸다. 최근 조사된 국내 폐광산 주변 오염도 결과를 보면, 토양오염우려기준과 대책기준사이에 해당되는 오염면적이 토양오염대책기준을 초과하는 면적보다 보통 10 - 20배 이상 나타난다. 따라서 이러한 오염 토양의 분포 특성상, 중금속의 농도가 토양오염대책기준이하를 나타내나 매우 광범위하게 오염되어 있는 오염토양에 대하여 고가의 복원방법을 사용한다는 것은, 복원 비용의 증가를 초래하여 복원 사업 자체의 활성화를 방해하게 되고, 이러한 부지에 비원위치(Ex-Situ) 복원 방법의 적용은 대부분의 오염지역이 현재 농경지로 이용되고 있다는 점을 감안하면 현실적으로 적용하는데 제약이 있다. 따라서 복원 시간, 복원 한계 농도, 비용등을 고려하여 볼 때, 오염 농도의 범위에 따라 적절한 복원 방법을 선택하여 사용하는 것이 바람직하다.

토양 복원 방법 중에서, 오염 지역을 크게 훼손하지 않으며 복원이 가능한 원위치(In-Situ)방법이 가장 친 환경적이라고 할 수 있으나, 휴/폐광산의 주된 오염원인 중금속들은 자연적인 정화가 거의 이루어지지 않으며, 토양 내 흡착능이 커서 원위치 방법에 의한 복원은 매우 힘들다. 그러나 이러한 제약에도 불구하고, 토양 안정화 방법은 토양 개량제를 이용하여 오염토양 내 중금속 농도를 감소하고, pH 조절에 의한 오염 중금속의 용출율을 줄임으로써 주변 하천이나 지하수로의 오염 중금속의 이동을 제한하는 원위치 방법으로 복원 비용이 적게 들며, 오염 면적이 넓으나 오염 농도가 비교적 낮은 오염지역에 효과적으로 적용될 수 있는 가능성을 가지고 있다.

주요어 : 안정화, 석회석, 오염 토양, 중금속 용출, 토양 복원

1) 부경대학교 환경지질과학과 (heelee@pknu.ac.kr)

최근 석회를 이용한 토양 객토와 복토법에 대한 연구가 진행되고 있으나 석회를 이용하는 경우 토양 및 토양수의 pH 상승에 의한 농작물 성장의 피해 및 비소나 크롬과 같은 음이온상태의 용출 증가가 문제시 되고 있다. 따라서 오염토양 내 중금속의 용출을 제한하여 주변으로의 오염 확산을 방지하되 급속한 pH 증가를 일으키지 않는 안정화제의 개발이 매우 필요하며, 본 연구에서는 국내에서 채굴한 석회석(CaCO<sub>3</sub>)의 중금속 용출률 감소 효율을 실내 실험을 통하여 검증하여 안정화제로써의 석회석 사용 가능성을 평가하고자 하였다.

## 2. 본 론

석회석을 토양 안정화제로 사용하여 폐광산 주변 중금속 오염 토양으로부터의 중금속 용출을 감소하는 칼럼실험을 실시하였다. 석회석은 강원도 OO지역에서 채굴한 입상석회석(한일회사 제품: 직경 0.4 - 0.6 cm)을 사용하였으며, 경상북도 OO 폐광산 하부 농경지 표토를 오염 토양으로 사용하였다. 표 1에 오염 토양의 중금속 농도와 해당 중금속의 토양오염기준치를 나타내었다. 파일럿규모의 아크릴 칼럼(직경 19cm, 높이 30cm)을 사용하였다. 0, 2, 5 w.t. %의 입상석회석과 오염토양을 혼합한 후, 칼럼의 10cm 높이까지 충전하였으며, 칼럼 상하부에는 Ottawa 조립사로 2cm 높이로 충전하여 배수가 용이하도록 하였다. 오염 농경지 지역의 한달 평균 강수량이 단위 면적당 91 mm임을 감안하여 강수량의 33%에 해당하는 인공강우(pH 6으로 조정된 증류수)를 칼럼 상부로부터 약 200ml/min 속도로 스프링클러를 이용하여 주입하였다. 12시간 마다 달평균 강수량의 33%를 주입하였으며, 총 60회 주입하였다(30일 주입하였으며, 실제로 약 5년 동안의 강수량에 의한 중금속 용출을 모사한 것임). 인공강우 주입과 동시에 칼럼 하부로부터 배출되는 배출수를 채수하여 배출수의 중금속 농도를 ICP/OES로 분석하여 시간에 따른 토양으로부터의 중금속 용출농도 및 양을 계산한 후, 석회석 첨가 %에 따른 용출농도 차이를 비교하였다.

Table 1. Properties of the farmland soil for the experiment

	Heavy metal concentration (mg/kg)				pH
	As	Cd	Pb	Zn	
Contaminated farmland soil	198.15	8.36	790.90	486.87	5.3
KSPWL	6.00	1.50	100.00	300.00	-

\* KSPWL: Korea Soil Pollution Warning Limit

## 3. 결과 및 토의

파일럿규모의 칼럼 실험 결과를 그림 1에 나타내었다. 석회석을 안정화제로 사용하지 않은 칼럼의 경우 비소의 용출농도는 최대 172.3 µg/L이었으며 점차 감소하여 5년 동안 약 40 - 50 µg/L을 유지하였다. 그러나 2%의 석회석 첨가만으로도 비소의 용출농도는 10 µg/L 이하로 감소하였으며, 5년 동안 안정화제를 사용하지 않은 오염 토양의 용출량의 53%까지 감소하였다. 카드뮴과 아연의 경우에는 석회석의 용출률 감소 효과가 훨씬 뛰어나 2%의 석회석 첨가에 의해서 용출량은 97%까지 감소하였다. 석회(CaO)를 안정화제로 토양에 첨가하는 경우 2%의 첨가만으로도 토양수의 pH는 11 이상을 유지하게 되지만, 비슷한 중금속 용출을 감소 효과를 가지는 석회석 첨가의 경우 5년 동안 토양수의 pH는 6-7을 유지하는 것으로 나타나(그림 2), 석회석을 안정화제로 이용하는 것이 석회보다 훨씬 친 환경적인 것으로 나타났다.

실험 결과로부터 석회석의 경우 중금속 오염 토양으로부터의 중금속 용출을 감소시키기 위한 안정화제로의 사용 가능성이 매우 높은 것으로 나타났다.

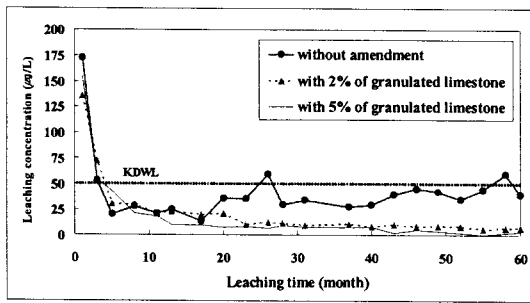
#### 4. 참고 문헌

Korean Ministry of Environment, Final Report of Environmental Investigation for Abandoned Mine in Korea, 2005.

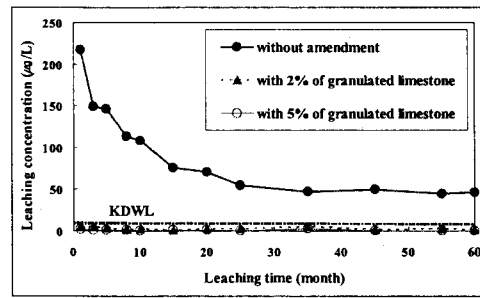
M.A. Yukselen, B. Alpaslan, Leaching of metals from soil contaminated by mining activities, J. Hazard. Mater. 87 (2001) 289-300.

V. Schifano, C. MacLeod, N. Hadlow, R. Dudeney, Evaluation of quicklime mixing for the remediation of petroleum contaminated soils, J. Hazard. Mater. (2007) in press.

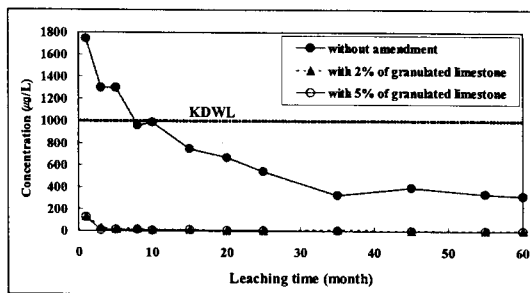
M. Lee, I.S. Paik, I. Kim, H. Kang, S. Lee, Remediation of heavy metal contaminated groundwater originated from abandoned mine using lime and calcium carbonate, J. Hazard. Mater. (2007) in press.



(a) arsenic leaching



(b) cadmium leaching



(c) zinc leaching

Fig. 1. Results of column experiments with limestone mixing.

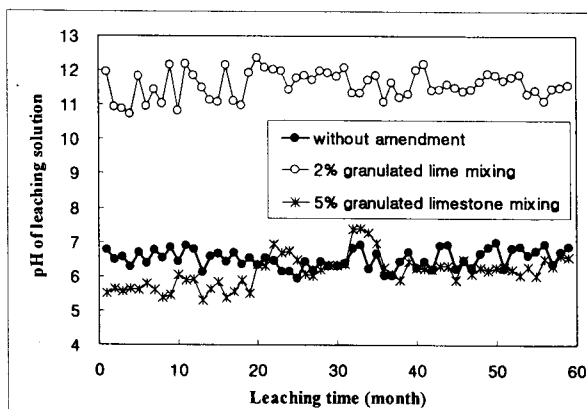


Fig. 2. pH change of leaching solution from the column.