

광미로 오염된 논토양에서 재배된 벼의 Pb, Zn, Cd 흡수도

이평구¹⁾, 신영식¹⁾, 연규훈¹⁾, 최상훈²⁾, 염승준¹⁾

1. 서론

광산 활동의 부산물인 광미는 다양한 유해 중금속을 함유하고 있으며, 이런 폐금속광산 지역의 광미장을 농경지로 이용할 경우에는 경작되는 농작물에 다양한 중금속이 흡수되어, 결과적으로 이들 농작물을 섭취하는 인간의 건강에 악영향을 미치게 된다(Jung, M. C. and Thornton, 1997). 이번 연구에서는 폐광된 연-아연광산의 광미장 부지를 복토한 논토양과 이곳에서 재배된 벼의 뿌리, 줄기 및 이삭을 추수 전에 채취하여 화학분석을 통하여 토양에서 뿌리, 뿌리에서 줄기와 이삭으로의 중금속 이동도와 식물 흡수도를 평가하고자 하였다.

2. 연구방법

2001년 10월에 광미장을 복토한 논토양과 그곳에서 재배된 벼시료 7개 및 오염되지 않은 논토양(배경토양)과 벼시료 2개를 채취하였다. 벼시료의 채취 시 뿌리부분의 논토양을 함께 채취하였다. 벼의 경우, 뿌리와 줄기 그리고 이삭 부분으로 구분하였으며, 전처리과정에서 뿌리 부분의 토양을 제거하기 위하여 초음파세척기로 수차례 세척을 하였다. 전함량 분석을 위한 전처리로서 시료 1g에 HNO₃ 5ml를 넣은 뒤 sand-bath를 이용해 110℃의 온도로 가열하여 완전히 증발 시킨 후, 혼합산(HClO₄ : HNO₃ = 5 : 1)을 10ml를 가해 110℃의 온도로 가열해 기화되는 연기가 보이지 않을 때까지 충분히 가열하였다. 잔류물에 6N HCl 10ml를 넣고 30분간 가열한 후, filter(0.45µm)로 여과하였다. 분석은 AAS(perkin elmer 3100, perkin elmer 5100)로 하였다.

3. 본론

1) 오염된 논토양의 중금속 함량

광미에 의해 오염된 논토양의 중금속 총함량 평균은 Zn 1992.2µg/g, Pb 1308.0µg/g, Cu 114.3µg/g, Cd 20.7µg/g, As 70.7µg/g, Ni 37.0µg/g, Cr 18.9µg/g, Mn 4333.0µg/g으로 Zn, Pb 및 Cd가 농집되어 있다. 이는 예상한 바와 같이 채굴 대상 광종이 연-아연이었기 때문인 것으로 생각된다. 배경토양과 비교해본 결과 오염된 논토양은 Zn 20배, Pb 18배, Cu 3배, Cd 16배, As 12배, Mn 6.2배 높게 나타났으며, Ni의 경우는 배경토양과 같은 함량을 보였으며, Cr의 경우는 오히려 배경토양의 함량이 높은 것으로 확인되었다(Table 1).

주요어 : 광미, 논토양, 벼, 중금속 이동도, 식물흡수도

1) 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 (pklee@kigam.re.kr)

2) 충북대학교 지구환경과학과 (cshoon@chungbuk.ac.kr)

2) 비의 기관별 중금속 함량

오염된 논토양에서 채취한 비 뿌리의 중금속 함량 평균은 Zn 7959.8 μ g/g, Pb 5188.6 μ g/g, Cu 594.1 μ g/g, Cd 305.4 μ g/g, As 126.5 μ g/g, Ni 56.7 μ g/g, Cr 15.4 μ g/g, Mn 4724.5 μ g/g으로 확인되었다. 뿌리 역시 오염된 토양과 마찬가지로 Cr를 제외한 모든 원소가 배경토양에서 채취한 비의 뿌리 함량보다 수배에서 수십 배 농집되어 있는 것으로 확인되었다.

오염된 토양의 비 줄기에 농집된 중금속 함량은 평균 Zn 285.0 μ g/g, Pb 82.5 μ g/g, Cu 9.8 μ g/g, Cd 5.6 μ g/g, As 10.3 μ g/g, Ni 6.3 μ g/g, Cr 2.1 μ g/g, Mn 1855.5 μ g/g으로, 배경토양에 비해서 Zn과 Pb의 함량은 5배, 8배 높으나 나머지 원소들은 배경토양에서 채취한 비의 줄기와 비슷한 함량인 것으로 확인되었다. 한편 Mn의 경우는 오히려 오염된 토양에서 채취한 시료가 낮게 검출되었다. 오염된 토양에서 채취한 비 이삭의 평균 함량은 Zn 44.8 μ g/g, Pb 5.3 μ g/g, Cu 24.9 μ g/g, Cd 0.6 μ g/g, As 1.4 μ g/g, Ni 1.6 μ g/g, Cr 1.3 μ g/g, Mn 45.1 μ g/g으로 확인되었다(Table 1).

3) 네덜란드 guideline(기준값)과 비교

우리나라에는 아직 광미로 오염된 토양에서 재배된 농작물의 생체흡수도 및 오염평가를 위한 기준이 확립되어 있지 않다. 따라서 네덜란드 기준값을 이용하여 광미로 오염된 논토양의 오염정도를 비교하여 보았다. 배경토양의 경우는 target value와 유사하거나 낮은 함량인 것으로 확인되었으나, 오염된 토양의 경우는 Ni과 Cr을 제외한 나머지 원소들은 target value보다 수배에서 수십 배 이상 초과하는 것으로 확인되었다. 오염된 토양 내 비의 경우 뿌리에서 Ni와 Cr를 제외한 모든 원소가 intervention value를 초과하였고, 줄기에서는 Zn과 Pb가 target value(목표기준) 초과하였으며, 이삭의 경우는 target value(목표기준) 보다도 낮은 함량인 것으로 확인되었다(Table 1). 따라서 비의 뿌리와 줄기를 퇴비 및 가축의 사료로 이용은 위험성이 있을 것으로 사료된다.

4) 작물(비)의 식물흡수도(bio-availability) 평가

오염된 논토양으로부터 비의 뿌리-줄기-비이삭(쌀)로 이동되는 중금속에 대한 흡수도를 평가하기 위하여, 오염된 토양과 비의 뿌리, 줄기, 이삭 내 중금속 총합량을 이용하여 각각의 흡수된 비율을 다음과 같이 계산하였다.

$$\text{토양에서 뿌리로의 식물흡수도(bio-availability fraction soil-root) (\%)} = \frac{(M)_{\text{뿌리}}}{(M)_{\text{토양}}} \times 100$$

$$\text{뿌리에서 줄기로의 식물흡수도(bio-availability fraction root-trunk) (\%)} = \frac{(M)_{\text{줄기}}}{(M)_{\text{뿌리}}} \times 100$$

$$\text{뿌리에서 이삭으로의 식물흡수도(bio-availability fraction trunk-rice) (\%)} = \frac{(M)_{\text{이삭}}}{(M)_{\text{뿌리}}} \times 100$$

오염된 논토양에서 뿌리로의 식물 흡수도는 Cd이 1476%로 가장 높은 이동도를 보이고 Cu 519%, As 439%, Zn 399%, Pb 397%, Ni 153%, Mn 109%, Cr 82%인 것으로 확인되었다. 뿌리에서 흡수된 중금속이 줄기로 이동된 함량비를 비교하면, Ni(11%), Cr(13%), Mn(39%)를 제외하면 최소 1.6%(Pb와 Cu)에서 최대 3.6%(Zn)으로 나타나 대부분의 중금속이 뿌리에서 줄기로 이동하면서 체내 흡수도가 급격히 감소하는 것이 확인되었다. 줄기에서 이삭으로 이동되는 중금속의 비율은 Cu가 최대 254.0%이며 Mn이 2.4%로 가장 낮은 이동성을 가진 것으로 확인되었다(Table 2). 이처럼 오염된 토양에서 뿌리로 흡수되는 양은 토

양의 함량을 초과하지만 줄기로 이동하면서 흡수율이 상당히 떨어지게 된다. 한편, 줄기에 축적된 중금속은 최종산물인 이삭으로의 이동성은 좋은 것으로 확인되었으나, 논토양과 비교해 보았을 때 전체적인 중금속의 이동성은 매우 낮음을 알 수 있다. 뿌리에서 줄기에 축적되지 않고 이삭으로 바로 이동되는 원소는 Cu로 줄기에서 이삭으로 이동도도 높지만 줄기에서 축적되어 이동되는 양보다 뿌리에서 바로 이동되는 양이 많은 것으로 확인되었다 (Table 2). 이동 축적된 식물의 체내 흡수도(bio-availability)는 다음과 같다.

토양에서 뿌리(%) : Cd >> Cu > As > Zn = Pb > Ni > Mn > Cr

뿌리에서 줄기(%) : Mn > Cr > Ni > Zn > As > Cd > Pb > Cu

뿌리에서 이삭(%) : Cr > Cu > Ni > Mn > Zn > As > Cd > Pb

5. 참고문헌

1. Jung, M. C. and Thornton, I. 1997. Heavy metal contamination and seasonal variation of metals in soils, plants and waters in the paddy fields around a Pb-Zn mine, Korea. *Sci. Tot. Environ.* V. 198, P. 105-121.
2. Bird, G., Brewer, p. A., Macklin, M. G., Balteanu, D., Driga, B., Serban, M., Zaharia, S., 2003, The solid state partitioning of contaminant metals and As in river channel sediments of the mining effected Tisa drainage basin, northwestern Romania and eastern Hungary. *Appl Geochem.* 18, p. 1583-1595.

Table 1. Mean concentration($\mu\text{g/g}$) of heavy metals in soils, roots, trunks, rice of rice crop from a abandoned lead-zinc mine and the Dutch guidelines for soils and sediments information adapted from Bird et al.(2003).

	sample	Zn	Pb	Cu	Cd	As	Ni	Cr	Mn
background area	soil	90.0	70.0	34.5	1.3	6.0	29.0	44.8	695.0
	root	470.0	182.0	175.0	3.6	32.4	15.2	7.2	1874.0
	trunk	62.0	9.6	7.2	0.8	0.0	2.4	2.4	3570.0
contaminated area	soil	1992.9	1308.6	114.3	20.7	70.7	37.0	18.9	4333.0
	root	7959.8	5188.6	594.1	305.4	310.2	56.7	15.4	4724.5
	trunk	285.0	82.5	9.8	5.6	10.3	6.3	2.1	1855.5
	rice	44.8	5.3	24.9	0.6	1.4	1.6	1.3	45.1
Dutch guideline	Target value	140	85	36	0.8	29	35	100	-
	Intervention value	720	530	190	12	55	210	380	-

Table 2. Average percentage of heavy metals and trace elements bio-availability, compared pollution soil with rice crop in a lead-zinc mine

	Zn	Pb	Cu	Cd	As	Ni	Cr	Mn
root VS soil(%)	399.4	396.5	519.9	1476.2	438.5	153.2	81.8	109.0
trunk VS soil(%)	14.3	6.3	8.6	27.3	14.5	17.0	11.4	42.8
trunk VS root(%)	3.6	1.6	1.6	1.8	3.3	11.1	13.9	39.3
rice VS soil(%)	2.2	0.4	21.8	2.8	1.9	4.2	6.8	1.0
rice VS root(%)	0.6	0.1	4.2	0.2	0.4	2.8	8.3	1.0
rice VS trunk(%)	15.7	6.4	254.0	10.1	13.2	25.0	60.0	2.4