

폐광산 주변 토양 중금속 오염노출농도 우려기준과 위해성 비교 연구

Comparison of Heavy Metal Pollutant Exposure and Risk Assessments in an Abandoned Mine Site

최진원* · 유근제** · 구명서*** · 박준홍****

Choi, Jinwon · Yoo, Keunje · Koo, Myungseo · Park, Joon-Hong

Abstract

In this study, soil environmental impact assessment using risk-based approach was compared with that using concentration-based approach. For this, heavy metal contaminant exposure was characterized in an abandoned mine area. According to the estimated carcinogenic and non-carcinogenic risks, soil ingestion was identified as the most dominant exposure pathway. When contaminant concentrations exceeded the Korean Soil Contamination Warning Standards, their corresponding risk values also exceeded the Total Soil Risk Standard. Even the cases of satisfying the Korean Soil Contamination Warning Standards mostly showed higher risk levels than the Total Soil Risk Standard, re-confirming a more sensitivity of the risk-based assessment than concentration-based assessment. However, the in-depth analysis of the estimated non-carcinogenic risk values revealed a few cases for soil contact pathway showing contaminant concentrations higher than the Korean Soil Contamination Warning Standards although their non-carcinogenic risk values satisfied the level of Hazard Index Standard. The findings from this study support a necessity of shifting policy paradigm from concentration-based approach into risk-based approach for reliable risk assessment in abandoned mine areas, and also suggest a necessity of further fundamental studies regarding risk factors and standards.

Keywords : Abandoned mines, heavy metal contamination, soil environmental risk assessment

요 지

본 연구에서는 중금속에 의한 토양환경영향평가 시 노출농도 기반의 평가와 위해성 기반의 평가를 비교하였다. 이를 위해서 폐광산 지역에서 중금속 오염노출을 조사하였다. 발암위해도와 비발암위해도 평가 결과, 토양섭취의 영향이 토양접촉의 영향보다 지배적이었고, 우려기준을 초과하는 경우에는 총 위해도도 기준을 초과하였다. 우려기준을 초과하지 않는 경우도 대부분 총 위해도 기준을 초과하였으므로, 위해도 기반의 평가가 노출농도 기반의 평가보다 더 민감한 기준이라는 기존 인식을 확인하였다. 하지만 토양접촉 경로의 비발암위해성 결과들의 심층 분석 결과, 우려기준을 초과함에도 위해도 기준을 초과하지 않는 경우들이 검출되었다. 본 연구에서는 신뢰성 있는 폐광산지역의 토양오염정화사업 타당성 평가를 위해서는 현재 노출농도기반의 평가 위주에서 위해성 기반 평가로의 정책 전환의 필요성이 확인되었고, 위해도 원단위 및 판단기준의 객관적 설정을 위한 연구 필요성이 제시되었다.

핵심용어 : 폐광산, 중금속오염, 토양환경위해성 평가

1. 서 론

토양은 물, 공기와 함께 생태계 순환작용에 있어서 반드시 필요한 요소이다. 토양에는 무기물질과 유기물질이 혼합되어 있고 동물, 식물, 미생물 등의 생명체가 무생물체에 다양하게 서식기를 두고 있어 토양 생태계를 이룬다. 토양은 오염물질이 유입될 경우 스스로의 완충능력을 가지고 있어 환경

오염원을 정화할 수 있는 기능이 있으나, 허용한계 이상의 오염물질이 유입되어 누적되면 토양의 자연 정화기능이 상실된다. 국내 토양환경보전법에 의하면 토양오염이라 함은 산업활동 및 기타 사람의 활동에 따라 토양이 오염되는 것으로서 사람의 건강·재산이나 환경에 피해를 주는 상태를 말한다(환경부, 2009).

토양을 오염시키는 원인들은 다양하나 이들 중 최근 이슈

*연세대학교 토목환경공학과 공학대학원 · (주)서영엔지니어링 환경팀 상무 (E-mail : jwchoi86@seoyeong.co.kr)

**정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 대학원 · 박사과정 (E-mail : whitespear82@naver.com)

*** (주)서영엔지니어링 환경팀 전문 (E-mail : mskoo@seoyeong.co.kr)

****정희원 · 교신저자 · 연세대학교 토목환경공학과 교수 (E-mail : parkj@yonsei.ac.kr)

가 되고 있는 오염원은 우리나라 전국에 산재되어 있는 휴·폐광산이다(안주성 등, 1999; 김정대, 2005). 휴·폐광산 지역에는 대부분 갯도와 폐석, 광미 등과 같은 광산폐기물적치장이 존재하고 있으며, 이로 인한 광산주변 지역에 산성광산배수(Acid mine drainage, AMD)의 배출, 폐광석과 광미적치장 침식에 의한 폐기물의 물리적 유실 등은 물과 바람 등에 의해 토양, 지표수, 지하수 등 광역에 걸쳐 지속적으로 오염을 확산시켜 심각한 사회적 문제로 대두되고 있다(정명채, 1996; 안주성 등, 1999; 김정대, 2005; 박정훈, 2009). 폐광산의 방치로 인한 토양오염이 사회적 문제로 대두됨에 따라 정부에서는 1992년부터 전국 휴·폐금속 광산 936개소 중 2009년까지 529개소에 대해 정밀조사를 실시하였으며, 연차별로 정밀조사사업 지속 추진 및 광해방지사업을 추진하고 있다(환경부, 2009). 폐광산의 영향으로 인한 토양오염의 경우, 대부분 광산의 하부지역에는 농경지가 발달되어 있어 폐광산에서 유입된 산성폐수와 중금속 확산 등에 따른 경작지 토양의 오염은 물론 농작물로의 중금속 축적 및 생육장애 등을 야기하며, 그로 인해 사람의 건강에 직접적인 영향을 끼칠 수 있다(Thornton, 1995; Jung 등, 1996; Aslibekian and Moles, 2003; Liu 등, 2005; 이준수, 2008). 따라서 이들 지역들의 유독성 중금속의 존재나 처리방법 등의 오염도 평가뿐만 아니라, 중금속에 노출됨에 따라 발생 가능한 인체영향에 대한 정도와 심각성을 정량적으로 산정하는 인체위해성 평가시스템이 오염물질의 관리 및 오염환경 복원 전략에 있어서 매우 중요한 과정으로 인식되고 있다(이진수 등, 2007; 이준수, 2008).

해외의 경우 오염된 토양, 지하수 및 농작물 등의 환경매체 내 유해오염물질들이 인간의 건강에 미치는 독성 및 발암성을 정량적으로 평가하는 위해성평가 시스템의 개발이 선진국으로 진행되고 있다(US EPA, 1996; Kolluru 등, 1996; Akagi 등, 2000; Paustenbach, 2002; Sekhar 등, 2003; US EPA, 2008). 하지만, 국내의 경우 토양 중금속들의 환경성평가 시에 중금속의 노출농도 기반으로만 고려하고 있어, 위해성 차원에 대한 고려가 미흡하다. 토양환경보전법에서는 중금속 농도기반의 토양오염우려기준과 토양오염대책기준을 제시하여 이를 환경성평가에 고려하고 있다. 반면 토양오염 위해성 평가는 연구에만 국한되었으며(이진수 등, 2001; 오창환 등, 2001; 이진수와 전효택, 2004, 2005; Lee 등, 2005; 박정훈, 2009), 환경관리를 위한 위해도 분석 시스템의 활용이 선진국에 비해 다소 미흡한 실정이고, 제도적 지원이 부족한 상황이다. 2006년 9월에 환경부 토양오염 위해성평가지침이 제정(2009년 8월 개정)되어 인체 위해성 평가에 활용하고 있다(환경부, 2009). 그 절차가 환경부 지침으로 제시되어 있으나, 사전 환경성평가에 적용하는 목적보다는 사후 토양오염 정화사업에 적용하는 목적에 제한되어 있다. 중금속의 비발암 및 발암 위해성의 인체에 미치는 중대한 영향을 고려한다면, 사전 환경성평가에서도 위해성 평가의 개념이 정책적으로 반영이 되어야 할 것이다. 여기서 핵심문제는 현재 토양환경보전법에서 제시하는 중금속 농도기반의 기준으로 현지조사를 했을 때, 그 위해성의 정도가 안전하기이다. 이러한 근본적인 이슈를 정책과 연계하기 위해서는, 현재의 많은 기초연구들(이진수 등, 2001; 이진수와

전효택, 2004, 2005; Kim 등, 2005; Lee 등, 2005; 이준수, 2008)도 유용하지만, 현재의 농도기반의 기준을 만족하는 경우에도 안전한 인체 위해성 수준을 만족하는가에 대한 현지 기반의 사례연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 현재 농도기반의 토양 중금속 기준과 위해성 기반의 중금속 인체 안전도 비교를 위한 현지 기반의 사례연구 제시이다. 이를 위해서 본 연구에서는 폐금속광산 지역 부근에서 토양오염정밀조사를 체계적으로 수행한 결과를 활용하여 해당 지역에서 토양중금속 오염 노출농도 기반과 위해성 기반으로 평가한 결과를 비교분석하였다.

2. 연구방법

2.1 연구 대상 지역

본 연구 대상지역은 XX 폐금속광산 인근지역으로서 1972년에 폐쇄된 광산으로 주요광종은 Cu, Pb, Zn이며, 지질은 선캄브리아기의 편마암류와 이를 후기에 관입한 화성암류로 구성되어 있다. 광상은 석회규산염 및 편마암내 발달된 절리에 열수용액의 주입으로 형성된 산포상 광상이다. 현장 토양 중금속 노출농도 분석을 위해서 2010년에 토양 정밀조사를 실시하였고 전체 조사구역을 4구역(A-D구역)으로 세분화하였다. A구역과 B구역은 폐금속광산의 오염발생원에 가깝고, C구역과 D구역의 경우 과거 광미장의 광미찌꺼기 등이 유실되어 소하천 및 하천으로 유입, 범람, 확산된 지역으로 기 파악되었다.

2.2 시료 채취 및 중금속 농도 분석

A구역에서는 72지점에서 120점의 시료를, B구역에서는 72지점에서 123점의 시료를, C구역에서는 100지점에서 224점의 시료를, D구역에서는 210지점에서 405점의 시료를 채취하였다. 토양시료채취 심도는 1,2심도의 경우 30 cm 간격으로 0-30 cm, 30-60 cm에서 채취하였고, 이후 3심도부터는 50 cm 간격으로 채취하였다. 이는 향후 오염토양 정화시 굴착가능심도를 고려한 것이다. 토양시료 채취 방법은 hand auger를 활용하였으며, 고심도 시료채취는 수동타격식(Manual Geoprobe)을 이용하였다.

중금속 대상 항목은 Cd, Cu, Pb, As, Zn 이었고, 토양오염 공정시험법을 사용하였다(환경부, 2009). 채취한 시료는 염산과 질산으로 산분해하는 전함량법으로 전처리하였으며, 전처리한 시료의 분석은 토양 중에 금속류를 측정하는 방법인 ICP (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry)법에 따라 수행하였다.

2.3 토양오염 위해성 평가 방법

토양노출경로는 2차 타오염매체를 통하지 않고 1차 오염매체인 토양으로부터 직접적으로 노출되는 '토양 섭취'와 '토양 접촉' 2가지 경로를 본 연구에서 고려하였다. 토양 섭취로 인한 위해도 계산에 필요한 인체노출량(IS, mg/kg-day)은 토양오염 위해성평가지침(환경부, 2009)의 계산식을 준용하였고, 식에 사용되는 인자값은 토양오염도(C_s, mg/kg)의 경우 정밀조사 결과치를 이용하였으며, 토양섭취량(CR_s)은 주/승의 성인기준인 100 mg soil/day을, 섭취흡수계수(FI)는 1

을, 노출빈도(EF)는 주/년의 365 days/year를, 노출기간 (ED)은 발암의 경우 기대수명인 79.6년, 비발암의 경우 성인기준인 30년을, 체중(BW)은 5차 인체치수조사에 따라 성인 62.6 kg을, 평균노출시간(AT)은 KNSO2010의 76.5일을 적용하였다(통계청, 2010). 토양 접촉으로 인한 위해도 계산에 필요한 피부흡수량(DAD, mg/kg-day)은 토양오염 위해성평가 지침의 계산식을 준용하였고, 식에 사용되는 인자값은 노출체표면적(SA_e, cm²)의 경우 US EPA 자료(US EPA, 2006, 2008)에 의거, 성인 5,700 cm²를, 토양-피부간 흡착계수(AF)는 성인 0.07 mg/m²를, 피부흡수계수(ABS_d)는 Cd, Cu, Pb, Zn 0.001, As 0.03을 적용하였으며, 그 외 인자값은 토양 섭취로 인한 인체노출량 계산시의 인자값과 동일하게 적용하였다. 또한, 위해도 계산을 위한 발암계수(SF) 및 비발암 참고치(RfD)는 미국 EPA의 자료를 활용하였다(US EPA, 2006, 2008).

조사구역(A-D구역)별, 중금속 항목별(Cd, Cu, Pb, As, Zn)로 산정한 노출량에 발암계수(SF) 및 비발암 참고치(RfD)를 적용하여 발암위해도(CR) 및 비발암위해도(HQ)를 계산하였으며, 위해성 판단기준과 비교하여 발암 또는 비발암 위해성 여부를 판단하였다. Cu와 Zn은 발암성이 없는 것으로 일반적으로 알려져 있으므로, 발암위해도 계산시 제외되었고, Cd의 발암위해성 및 Cu의 비발암위해성은 발암계수 또는 비발암참고치에 대한 자료가 국내외적으로 미흡하여 제외하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 토양노출농도

해당 연구지역의 구역별 토양오염노출 농도의 평균치와 범위를 표 1에 나타내었다. 우려기준을 초과하는 중금속오염노출의 검출빈도(초과빈도 %)는 A구역에서는 Cd의 초과빈도가 상대적으로 높고, B구역, C구역, D구역은 Zn의 초과빈도가 높은 것으로 나타났으며, 구역별로는 B구역과 D구역의

초과빈도가 다른 구역에 비해 높은 것으로 확인되었다.

3.2 발암 및 비발암 위해도

총 발암위해도(평균값)는 A구역 5.60E-03, B구역 6.83E-03, C구역 4.91E-03, D구역 5.75E-03으로 4구역 모두 허용 가능한 초과발암위해도(10^{-6} - 10^{-4})를 초과하여 발암 위해성이 있는 것으로 산정되었다. 이는 발암성이 없는 Cu, Zn과 발암위해성이 있으나 원단위 자료가 미비한 Cd을 영(0)으로 가정한 결과이므로 모든 구역에서 발암 위해성 초과검출 결론은 보수적인 것이라고 할 수 있다. 원소별 발암위해도 분석으로는 A구역 95.36%, B구역 92.68%, C구역 93.89%, D구역 92.17%가 As에서 기인하는 것으로 확인되었고, 노출 경로별로는 섭취에 의한 경로가 A구역 89.82%, B구역 90.04%, C구역 90.02%, D구역 90.09%로 접촉에 의한 경로 보다 발암 위해성에 매우 높게 기여하는 것으로 나타났다(그림 1).

총 비발암위해도(평균값)는 A구역 2.94E+01, B구역 5.10E+01, C구역 3.16E+01, D구역 4.51E+01으로 4구역 모두 비발암 위해성 판단기준 1을 초과하여 비발암 위해성이 있는 것으로 판단되었다. 이는 원단위 비발암위해도 자료의 미흡으로 Cu의 비발암위해도를 최소 위해도 영(0)으로 가정한 것이므로, 모든 구역에서 비발암 위해성 초과검출 결론은 유효하다고 할 수 있다. 원소별로는 Pb이 A구역 79.93%, B구역 86.47%, C구역 84.18%, D구역 88.25%로 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, As, Cd, Zn순으로 나타났으며, 노출경로별로는 섭취에 의한 경로가 A구역 97.96%, B구역 98.63%, C구역 98.42%, D구역 98.67%로 발암 위해성과 마찬가지로 섭취 경로가 접촉에 의한 경로 보다 비발암 위해성에 매우 높게 기여하는 것으로 분석되었다(그림 2).

3.3 오염농도 기반 기준과 위해성 기반 기준 비교분석

환경노출농도 기반인 토양오염우려기준 초과 여부와 위해성 기반의 기준 초과여부 간의 차이점을 발암위해성과 비발

표 1. 구역별 중금속 토양노출농도와 우려기준 초과 빈도

구분		Cd	Cu	Pb	As	Zn
A구역	시료수(N)	120	120	120	120	120
	토양노출농도 (mg/kg)	2.84* (0.18~11.16)	49.87 (20.27~214.28)	51.24 (8.20~372.90)	5.24 (0.00~22.81)	145.21 (55.95~708.45)
	초과빈도(%)	13.33	2.50	5.00	0.00	8.33
B구역	시료수(N)	123	123	123	123	123
	토양노출농도 (mg/kg)	3.32 (0.22~23.00)	61.02 (7.65~506.83)	95.96 (6.26~876.86)	6.21 (0.72~44.47)	244.64 (29.81~2,571.17)
	초과빈도(%)	13.01	11.38	11.38	7.31	15.45
C구역	시료수(N)	224	224	224	224	224
	토양노출농도 (mg/kg)	2.24 (0.00~28.31)	38.57 (0.00~383.72)	57.90 (0.00~738.93)	4.53 (0.00~26.83)	183.35 (21.85~1,906.97)
	초과빈도(%)	9.38	5.80	7.14	0.89	10.71
D구역	시료수(N)	405	405	405	405	405
	토양노출농도 (mg/kg)	1.41 (0.00~20.47)	51.52 (0.05~696.59)	86.65 (0.62~1,254.63)	5.20 (0.00~52.65)	287.70 (0.05~2,448.52)
	초과빈도(%)	8.89	6.17	11.60	1.48	25.93

*해당구역의 특정 중금속노출농도 평균값 (괄호안의 값은 최소치와 최대치)

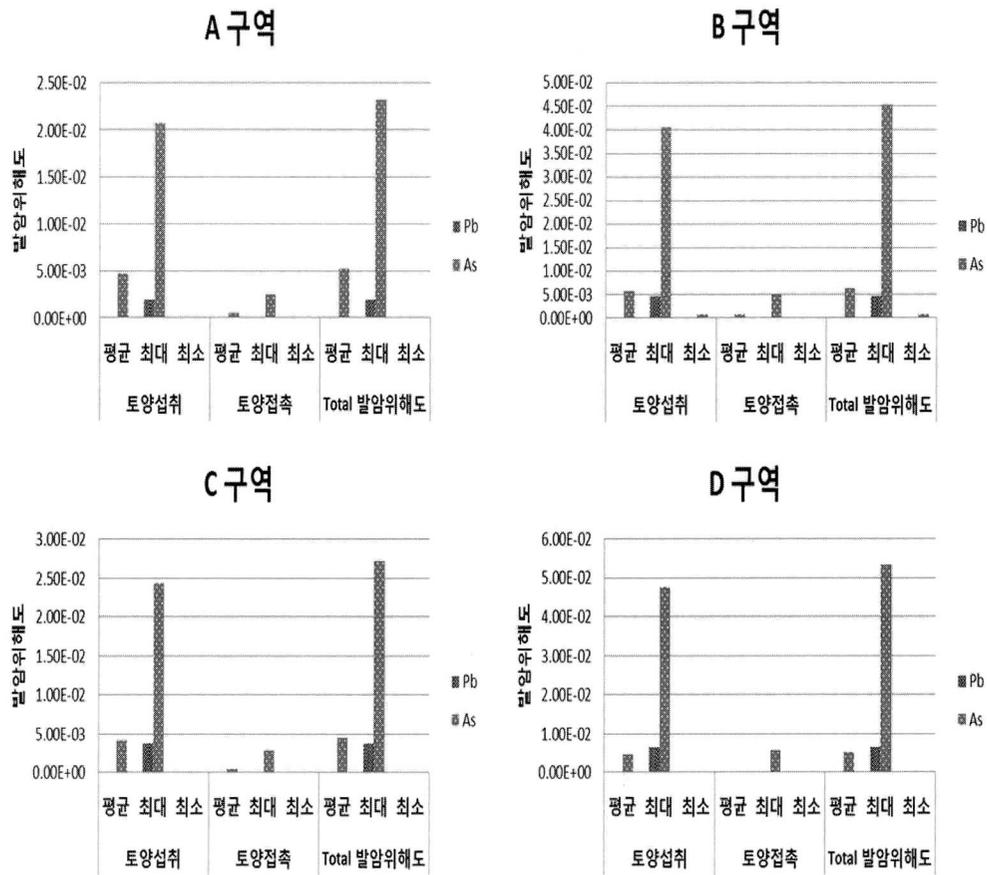


그림 1. 구역별 발암위해도 계산결과

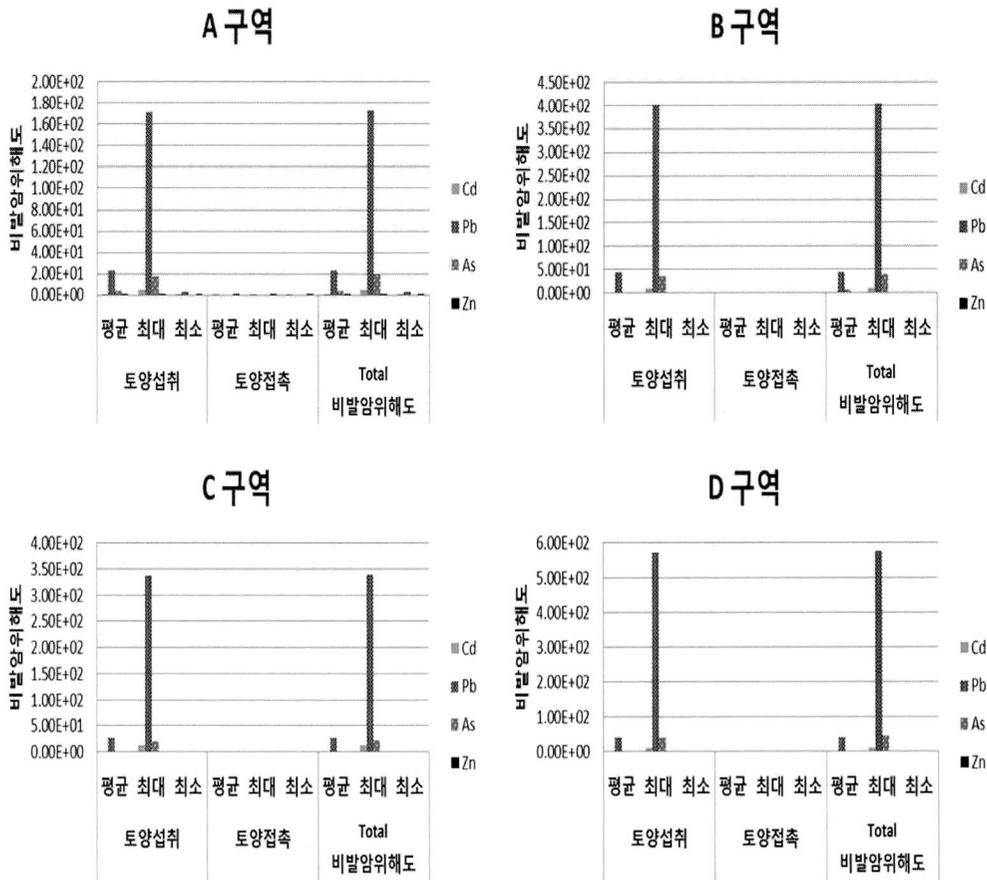


그림 2. 구역별 비발암위해도 계산결과

암위해성에 대해서 각각 비교분석을 수행하였다. 우선 발암위해성 판단기준과 토양오염우려기준 간의 결과를 각 구역별로 비교 분석해 보면(표 2), 우려기준 초과한 경우는 모두

발암위해성 판단기준을 초과한 것으로 나타났고, 우려기준을 초과하지 않고 발암위해도 판단기준을 초과하는 경우의 수가(발암위해도 초과 경우의 수 - 중복초과 경우의 수) 전체

표 2. 토양 중금속 우려기준 초과 빈도와 발암위해도 기준 초과 빈도결과

구역	시료수	토양섭취			토양접촉			전체		
		우려기준 초과	발암 위해도 초과	두 기준 동시 초과	우려 기준 초과	발암 위해도 초과	두 기준 동시 초과	우려 기준 초과	발암 위해도 초과	두 기준 동시 초과
A	120	20	120	20	20	119	20	20	120	20
B	123	20	123	20	20	123	20	20	123	20
C	224	26	222	26	26	202	26	27	222	27
D	405	107	405	107	107	391	107	107	405	107

표 3. 토양 중금속 우려기준 초과빈도와 비발암위해도 기준 초과 빈도수

구역	시료수	토양섭취			토양접촉			전체		
		우려 기준 초과	비발암 위해도 초과	두 기준 동시 초과	우려 기준 초과	비발암 위해도 초과	두 기준 동시 초과	우려 기준 초과	비발암 위해도 초과	두 기준 동시 초과
A	120	20	120	20	20	15	8	20	120	20
B	123	20	123	20	20	15	14	20	123	20
C	224	27	223	27	27	25	16	27	223	27
D	405	107	404	107	107	56	40	107	404	107

표 4. 중금속 1개 이상 우려기준 초과하고 비발암위해도기준 만족 빈도수

우려기준	비발암 위해성 판단기준	A 구역	B 구역	C 구역	D 구역
초과	만족	12	6	10	67

시료수의 최소 70% 이상을 다수 차지하는 것으로 나타났다. 이는 구역별 결과에서 공통적으로 확인되었다. 이러한 결과는 농도기반의 우려기준을 통과하였다 하더라도 발암위해성에 대한 고려를 해야 한다는 점을 시사하고 있다. 농도기반의 우려기준과 발암위해도 판단 기준을 모두 만족하는 경우에 대해 중금속 검출내역을 심층분석한 결과, A 구역의 토양접촉에서 1 경우, C 구역의 토양섭취에서 2 경우, 토양접촉에서 22 경우, D 구역의 토양접촉에서 14 경우에서 두 기준을 모두 만족하였는데, As 불검출이 공통적으로 나타났다. 이는 As의 불검출 여부가 농도기반 기준이나 발암위해성 기준 모두 만족 여부를 결정하는 주요 중금속 검출인자로 파악되었다.

비발암위해성 판단기준과 토양오염우려기준 초과여부의 결과를 각 구역별로 비교 분석하여 보았다(표 3). 토양섭취경로의 경우 발암위해성 결과와 유사하게 시료의 다수가 위해성기준을 초과하였고, 두 기준을 동시에 만족하는 경우는 드물었다. 하지만 토양접촉경로에서는 발암위해성 결과와는 상이하게, 두 가지 기준을 동시에 만족하는 경우가 다수 있었고, 하나의 기준이라도 초과하는 경우가 오히려 소수였다. 발암위해성의 결과와는 달리, 분석대상 중금속 중 1-2개의 항목이 우려기준을 초과하였으나, 중금속별 비발암위해도가 위해성 판단기준을 만족하는 사례가 모든 구역에서 관찰되었다(표 4).

4. 결 론

본 논문에서는 폐광산의 중금속 오염농도와 위해성 기반의 평가를 실제 현장의 토양정밀조사를 통해서 비교분석하였다.

이를 위해서 중금속 토양오염 유형이 다른 4개의 구역에 대해서 정밀조사 결과를 이용해서 노출농도 기반의 우려기준 초과여부와 위해성 기반의 기준 초과여부에 대해서 비교 분석을 실시하였다. 발암위해도와 비발암위해도 평가 결과, 토양섭취의 영향이 토양접촉의 영향보다 지배적이었고, 우려기준을 초과하는 경우에는 총 위해도도 기준을 초과하였다. 우려기준을 초과하지 않는 경우도 대부분 총 위해도 기준을 초과하였으므로, 위해도 기반의 평가가 보다 더 민감한 기준임을 알 수 있었다. 위해성 기반의 평가와 환경노출정도(농도)기반의 평가에 대한 기존 인식과 일치함을 알 수 있다. 하지만 토양접촉 경로의 결과들을 심층 분석해 본 결과, 이러한 기존 인식과 일치하지 않는 사례들이 도출되었다. 특히 우려기준을 초과함에도 위해도 기준을 초과하지 않는 경우들이 비발암위해성 결과에서 도출되었다. 이러한 경우들은 그 검출빈도수를 볼 때 실제 현장에서 발견될 가능성이 높다. 따라서 우려기준을 초과했다고 해서 반드시 비발암위해성이 높다고 평가할 수는 없다는 것을 본 사례연구에서 보였다.

현장조사결과를 근거로 한 본 연구에서는 토양 중금속오염 우려기준을 만족하였다 하더라도 인체위해성이 잔존하는 경우가 폐광지역에 존재할 수 있음을 실증적으로 보였다. 이는 현재의 오염물질농도 기반의 평가에서 추후에 위해성 기반의 평가로 정책 전환의 필요성을 시사한다. 본 연구결과는 이러한 위해성 기반의 토양중금속 평가에서 고려해야 할 사항들을 사례연구기반으로 제시해 주었다. 특히 본 연구는 우려기준을 초과하였다고 하여도 위해성이 높지 않을 수도 있는 가능성을 입증하였고, 보다 신뢰성 있는 위해성 평가를 위해서는 중금속 원소 위해성에 대한 원단위 도출 및 판단 기준 설정에 대한 기초 독성연구의 필요성을 제시하고 있다.

감사의 글

본 연구는 환경부 GAIA Project(과제번호: 173-091-006)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김정대(2005) 강원도 폐금속광산지역의 광미와 주변토양의 중금속 오염현황 및 오염도 평가. *대한광산학회지*, 대한광산학회, 제22권, pp. 207-214.
- 박정훈(2009) 전남 두 곳의 폐금속광산 주변 토양의 위해성평가. 석사학위논문, 전남대학교.
- 안주성, 전효택, 손아정, 김경웅(1999) 구봉 금은광산 주변지역의 비소 및 중금속에 의한 환경오염과 비작물의 흡수특성. *한국자원공학회지*, 한국자원공학회, 제36권, pp. 159-169.
- 오창환, 유연희, 이평구, 박성원, 이영엽(2001) 국내 토양오염 공정시험방법중 중금속 관련 오염평가의 문제점과 개선책. *한국지하수토양환경학회지*, 한국지하수토양환경학회, 제6권, pp. 63-83.
- 이준수(2008) 폐광산 주변 농경지 토양 중 중금속오염에 의한 인체위해성 평가. 석사학위논문, 서울시립대학교.
- 이진수, Ben Klinck, Yvette Moore, 전효택(2001) 다덕광산 주변지역에서의 독성 원소들의 환경오염 및 인체흡수도. *대한자원환경지질학회지*, 대한자원환경지질학회, 제3권, pp. 273-282.
- 이진수, 전효택(2004) 금속광산지역 독성 중금속원소들의 인체위해성 평가. *대한자원환경지질학회지*, 대한자원환경지질학회, 제37권, pp. 73-86.
- 이진수, 전효택(2005) 오염된 토양, 지하수 및 쌀의 인체노출에 따른 비소의 위해성 평가. *대한자원환경지질학회지*, 대한자원환경지질학회, 제38권, pp. 535-545.
- 이진수, 권현호, 심연식, 김태혁(2007) 폐금속광산지역 중금속의 위해성 평가. *한국지하수토양환경학회지*, 한국지하수토양환경학회, 제12권, pp. 97-102.
- 정명채(1996) 달성 Cu-W 광산 주변 수계의 하상퇴적물과 자연수의 Cd, Cu, Pb 및 Zn 오염. *대한자연환경지질학회지*, 대한자연환경지질학회, 제29권, pp. 305-313.
- 통계청(2010) 2010년 인구·가구 생명표: 완전생명표 (<http://kosis.kr>)
- 환경부(2009) 토양환경보전법(법, 시행령, 시행규칙).
- 환경부(2009) 토양보전 기본계획.
- 환경부(2009) 토양정밀조사지침(환경부고시 제2009-181호).
- 환경부(2009) 토양오염 위해성평가지침(환경부예규 제383호).
- Akagi, H., Castillo, E.S., Cortes-Maramba, N., Francisco-Rivera, A. T., and Timbang T.D. (2000) Health assessment for mercury exposure among schoolchildren residing near a gold processing and refining plant in Apokon, Tagum, Davao del Norte, Philippines. *Sci. Total Environ.*, Vol. 259, pp. 31-43.
- Aslibekian, O. and Moles, R. (2003) Environmental risk assessment of metals contaminated soils at silvermines abandoned mine site, Co Tipperary, Ireland. *Environ. Geochem. Health.*, Vol. 25, pp. 247-266.
- Jung, M.C. and Thornton, I. (1996) Heavy metal contamination of soils and plants in the vicinity of a lead-zinc mine, Korea. *Appl. Geochem.*, Vol. 11, pp. 53-59.
- Kim, J.Y., Kim, K.W., Ahn, J.S., Ko, I.W., and Lee, C.H. (2005) Investigation and risk assessment modeling of As and other heavy metals contamination around five abandoned metal mines in Korea. *Environ. Geochem. Health.*, Vol. 27, pp. 193-203.
- Kolluru, R., Bartell, S., Pitblado, R., and Stricoff, R. (1996) *Risk Assessment and Management Handbook*, McGrawHill, New York, N.Y.
- Liu, H., Probst, A., and Liao, B. (2005) Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China). *Sci. Total Environ.*, Vol. 399, pp. 153-166.
- Lee, J.S., Chon, H.T., and Kim, K.W. (2005) Human risk assessment of AS, Cd, Cu, and Zn in the abandoned metal mine site. *Environ. Geochem. Health.*, Vol. 27, pp. 185-191.
- Paustenbach, D. (2002) *Human and Ecological Risk Assessment: Theory and Practice*. John Wiley and Sons, New York, N.Y.
- Sekhar, K.C., Chary, N.S., Kamala, C.T., Rao, V., Balaram, V., and Anjaneyulu, Y. (2003) Risk assessment and pathway study of arsenic in industrially contaminated sites of Hyderabad: a case study. *Environ. Int.*, Vol. 29, pp. 601-611.
- US EPA (1996) Exposure factors handbook, EPA/600/p-95/002Fa (Update to Exposure Factors Handbook, EPA/600/8-89/043). Environmental Protection Agency Region I, Washington, D.C., USA.
- US EPA (2006) Risk Assessment Information System (<http://rais.ornl.gov>).
- US EPA (2008) Intergrated Risk Information System (Electronic data base) [EB/OL] (<http://www.epa.gov/iris>).
- Thornton, I. (1995) Sources and pathways of arsenic in south-west England: health implications, In: Chappell W, ed. *Exposure and Health Effect of Arsenic*. University of Missouri, St. Louis. pp. 93-103.

(접수일: 2012.1.6/심사일: 2012.5.18/심사완료일: 2012.5.31.)