

Evaluating Ecotoxicity of Surface Water and Soil Adjacent to Abandoned Metal Mines with *Daphnia magna* and *Eisenia fetida*

Dae-Bok Kim, Won-Suk Choi, Young-Kyu Hong, Soon-Oh Kim¹, Sang-Woo Lee¹, Byung-Tae Lee², Sang-Hwan Lee³, Mi-Jung Park³, and Sung-Chul Kim*

Department of Bio-Environmental Chemistry, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

¹Department of geology, Gyeongsang National University, Jinju, 52828, Korea

²School of Environmental Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju, 61005, Korea

³Mine Reclamation Corporation, Wonju, 26464, Korea

(Received: 17 December 2015, Revised: 14 January 2016, Accepted: 20 February 2016)

Heavy metal pollution in agricultural fields at the abandoned metal mines has been serious problems in Korea. In order to manage heavy metal pollution in surface water and soil, numerous remediation strategies have been established. Therefore, main purpose of this research was to examine feasibility of ecological toxicity assessment for establishing management strategy in heavy metal polluted agricultural fields. Heavy metal concentration in surface water and soil was monitored along with ecotoxicity experiment with *Daphnia magna* and *Eisenia fetida*. Result showed that high toxicity was observed in heavily polluted agricultural field with heavy metals. In case of mortality of *Daphnia magna* (85%) and *Eisenia fetida* (6.7%), the highest ratio was observed when heavy metal concentration in surface and soil was high. Calculated ecotoxicity index (EI) ranged 0.06-0.30 and the highest EI was observed in heavily polluted sites among 5 abandoned metal mines. Overall, ecological toxicity assessment is necessary to evaluate heavy metal pollution in agricultural fields near at the abandoned metal mines along with chemical concentration analysis.

Key words: Heavy metals, Surface water, Soil, Earthworms, Ecotoxicity index



Image of *Daphnia magna* for toxicity test of heavy metals in surface water.

*Corresponding author: Phone: +82428216737, Fax: +82428216731, E-mail: sckim@cnu.ac.kr

§Acknowledgement: This research was supported by "Establishing integrated management system for risk assessment in mining region" through the Mine Reclamation Corporation (MIRECO) funded by the Ministry of Trade, Industry, and Energy.

Introduction

광산지역에 주로 발생하는 중금속에 의한 환경오염은 주변의 환경 (수질 및 토양) 뿐만 아니라 궁극적으로는 인간의 건강에까지 악영향을 미칠 수 있다 (Fairbrother et al., 2007; Gills et al., 2006). 최근 국내의 광산 지역에 대한 환경조사 결과를 보면 2009년의 경우 총 110개의 광산에 대해 수질과 토양에 대한 중금속 농도를 조사한 결과 약 95%인 105개의 광산에서 수질에 대한 중금속 기준을 초과한 것으로 나타났다. 따라서 이에 대한 대책이 필요한 상황이며 보다 효율적인 관리 시스템 구축이 필요한 실정이다.

오염지역에 대한 관리방안은 복원뿐만 아니라 관리 또는 평가시스템을 구축하는 것이 제안되고 있다. 특히 광산지역의 중금속에 대한 위해성평가 시스템을 구축하는 방안이 제시되고 있는데 이는 오염물질의 농도에 국한된 관리 시스템보다는 현장의 오염도 및 독성학적 또는 생태학적 특성을 복합적으로 고려한 시스템을 구축하는 것이다. 선진국에서는 1970년부터 생태 위해성 평가를 위한 시스템을 구축하고 있다. 미국의 경우 RBCA (Risk Based Corrective Action)의 개념을 이용하여 단계별 생태위해성 평가 시스템을 구축하여 superfund 지역에 적용하였다 (USEPA 1996, 2012 a, b, c). 캐나다 역시 지역별 특성을 고려한 단계적 생태위해성 평가 시스템을 구축하여 사용하고 있으며 호주의 경우 토양의 중금속 농도, 생태독성 평가 DB, 및 생태학적 특성을 고려한 위해성 평가 시스템을 운영하고 있다 (FCSAP, 2012). 특히 네덜란드의 경우 2002년부터 지속적인 연구사업을 통해 생물에 흡수되는 생물유효도를 고려한 오염물질의 농도뿐만 아니라 생태에 미치는 독성학적 특성, 그리고 오염물질의 농도에 따른 주변 환경의 생태학적 특성을 고려한 복합적 생태위해성 평가 시스템을 구축하여 운영하고 있다 (Jensen and Mesman, 2006; Gutierrez et al., 2015).

국내의 경우 수생 또는 육상 동식물을 이용한 생태독성 평가 시스템은 구축되어 운영되고 있다. 오염물질에 대한 생태위해성 평가의 경우 노출된 오염물질의 농도에 따른 독성을 평가하는 방법이 운영되고 있으며 주로 유기오염물질에 국한되어 있다. 따라서 본 연구에서는 광산지역의 중금속에 대한 생태독성을 평가하기 위해 평가방법을 제시하고 이에 따른 생태독성 위해도를 산정하고자 한다.

Materials and Methods

시료채취 및 분석방법 광산인근 중금속 오염 토양 및 지표수를 대상으로 생태독성평가를 실시하기 위해 5개의 광산지역을 선택하여 시험을 실시하였다. 각 지역에 대한 지리적 정보 및 중금속 오염 현황은 Table 1에 정리하였다.

수질과 토양의 시료 채취 및 분석은 수질오염공정시험방

Table 1. Summary of geological information and heavy metal pollution in selected study mines.

	Name	Location	Heavy metals
A	Samsan jeil	Kyungnam, Gosung	Cd, As, Pb, Cu
B	Daejeong	Kyungnam, Jinju	Cd, As
C	Bong	Kyungnam Hapcheon	Cd, Zn
D	Yanggok	Kyungbuk, Bonghwa	Cd, As
E	Jucheon	Kangwon Youngweol	As

Table 2. Summary of analysis methods and instrument for chemical properties of surface water and soil.

	Items	Method	Instrument
Surface water	Temperature		Thermometer
	pH		pH meter
	Conductivity		EC meter
	DO		DO Probe
	pH	1:5	pH meter
Soil	EC	1:5	EC meter
	Organic matter	Walkley-Black	UV/Vis Spectrophotometer
	Avail. P ₂ O ₅	Bray No.1	UV/Vis Spectrophotometer

법과 토양 및 식물체 분석법을 참조하였다 (Table 2). 수질 시료의 채취 장소는 토양 시료채취 인근 하천수 혹은 갭내수가 유입되는 지역의 시료를 채취하였다. 수질 시료의 경우 약 1 m 간격으로 상류에서 하류지점으로 이동하며 총 3개의 시료를 하나의 시료로 만들었으며 채취병에 채수한 시료는 실험실로 옮겨진 후 0.45 µm 여과지로 여과하여 냉장 보관 (4°C) 하였다. 토양 시료는 표층 15 cm에서 시료를 채취하였으며 동일 필지에서 5개의 시료를 무작위로 채취한 후 하나의 시료로 만들었다. 토양의 경우 대조구 시료는 광산 인근 토양 중 중금속으로 오염되지 않은 토양 시료로 산과 10 km 떨어진 지역과 광산 주변에 하천이 있다면 하천 방향의 반대 방향으로 떨어진 지역에서 채취하였다. 채취된 토양 시료는 105°C 오븐에서 건조시킨 후 2 mm로 체거름하여 토양의 물리, 화학적 특성 분석 및 중금속 분석에 사용하였다.

수질과 토양의 분석 항목 및 분석방법은 다음과 같다. 수질의 경우 pH meter (METTLER TOLEDO, MP200)와 EC meter (METTLER TOLEDO, S230)를 이용하여 pH와 전기전도도를 측정하였으며 DO meter를 사용하여 수질 특성을 분석하였다. 토양의 경우 토양 pH (1:5)와 EC (1:5)는 풍건 토양 10 g에 증류수 50 mL를 가하여 약 120 rpm으로 30분 간 진탕하고 Whatman No. 2로 여과시킨 후 pH meter (METTLER TOLEDO, MP200)와 EC meter (METTLER TOLEDO, S230)를 이용하여 각각 측정하였다. 유기물 함량은 Walkley-black

방법에 따라 1 N $K_2Cr_2O_7$ 을 가하여 반응시킨 후 UV/Vis Spectrophotometer (Schimadsu, UVmini1240, Japan)로 파장 610 nm에서 비색 정량하였다. 유효인산 함량은 Bray No.1 방법으로 추출하여 Ammonium paramolybdate로 발색시킨 후 파장 660 nm에서 UV/Vis Spectrophotometer (Schimadsu, UV 240, Japan)를 이용하여 비색 정량하였다. 중금속 분석은 전함량 분석법을 이용하여 추출한 후 AAS (Atomic Absorption Spectrophotometer, Shimadzu, AA-6800, Japan)로 정량하였다.

생태독성평가 방법 수질시료에 대한 생태독성은 물벼룩과 청경채를 이용하여 실시하였다. 각각의 종말점 (end-points)은 물벼룩의 경우 치사율, 청경채의 경우 발아율과 뿌리성장 저해율을 선택하였다. 수질에 대한 생태독성평가를 위해 대표 지표종으로 사용되는 물벼룩, *Daphnia magna*를 이용하여 시험을 실시하였다. 시험에 사용된 *D. magna*는 항균실 (clean room)에서 온도 $25\pm 1^\circ C$ 와 습도 50%를 일정하게 유지시켜 배양하였으며 시험 방법은 미국 환경청 (US EPA)에서 제시한 방법과 선행 연구를 바탕으로 진행하였다 (Kim et al., 2007). 물벼룩을 이용한 독성평가는 24hr 급성 독성평가 방법을 사용하였으며 희석배율을 100, 50, 25, 12.5, 6.25% (v/v)로 사용하여 시험을 실시하였다. 시험 용액은 총 25 mL로 하였으며 농도별로 물벼룩을 5마리씩 노출시켜 4개의 반복시험을 실시하였다 (California EPA, 2009; ASTM 2003).

토양에 대한 생태독성평가는 대표 지표종인 지렁이 (*Eisenia fetida*)를 이용하여 실시하였다. 시험에 사용된 지렁이는 항온실 (온도: $20\pm 1^\circ C$ 와 습도: $70\pm 5\%$)에서 광조건 16 hr과 암조건 8 hr을 유지하면서 2개월간 배양된 성숙한 개체로서 무게가 300-600 mg 정도인 지렁이를 골라 시험에 사용하였다. 시험 방법은 미국 환경청에서 제시한 방법에 준하여 실시하였다. 광산 토양 400 g을 플라스틱 용기에 담은 후 습도를 약 40%로 맞추기 위해 수분을 공급하였다. 미리 정량한 지렁이 10마리를 용기에 넣은 후 통풍이 원활하게 될 수 있는 뚜껑을 덮어 항온실에 보관하였다. 지렁이의 치사율 또는 형태이상 등의 평가는 시험 시작 후 7일과 14일에 각각 시행하였다.

식물체의 발아율과 뿌리생장에 대한 시험은 Port (13 cm \times 13 cm)에 토양 시료 (< 2 mm) 30 g을 넣고, 청경채 종자를 10개씩 일정한 간격으로 심은 후 토양으로 덮었다. 항온실 (온도: $23\pm 1^\circ C$ 와 습도: $70\pm 5\%$)에서 광조건은 16 hr과 암조건 8 hr을 유지하고 토양시료가 마르지 않도록 증류수를 첨가하여 3주 동안 배양하였다. 1일 단위로 발아된 수를 측정하였으며, 3주 배양 후 증류수로 세척한 후 뿌리길이를 측정하였다. 서술한 내용의 시험법은 미국 EPA (1996, 1998, 2012 a, b, c)와 ASTM (2003) 에서 제공한 "Seedling Emergence

test"와 "Root Elongation Test"를 참조하여 시험하였다.

생태독성지수 산정 수질과 토양에 대해 실시한 생태독성평가 결과값을 바탕으로 생태독성지수 (Ecotoxicity Index)를 산정하였다. 생태독성지수는 생태위해성평가를 수행하기 위해 선행되는 평가방법으로 선행연구를 바탕으로 생태독성지수를 산정하였으며 계산된 생태독성지수를 이용하여 지역별 생태독성에 대한 위해도를 산정하였다. 생태지수를 산정하기 위해 네덜란드에서 사용하고 있는 평가 방법을 수정하여 사용하였으며 BKX_Triad 방법을 활용하여 각 독성평가 결과를 0-1 사이의 값으로 지수화를 실시하였다 (Jensen et al., 2006).

$$BKX_{Triad} = 1 - 10^{((-\sum_{i=1}^n \log X_i)/n)} \quad (Eq. 1)$$

n = 독성학적 평가 수

Results and Discussion

수질과 토양의 화학적 특성 광산지역에 대한 대조구 토양의 이화학적 특성 및 중금속 함량은 Table 3에 정리하였다. 수질과 토양에 대한 생태독성 평가를 위해 총 5개의 광산에 대해 조사를 실시하였으며 각 광산별 수질과 토양에 대한 특성을 Table 4와 5에 정리하였다. 수질의 pH는 6.71-7.56 정도의 약산성 또는 중성 조건이었으며 용존산소량은 5.25-7.35 $mg L^{-1}$ 수준으로 농업용수의 하천수 수질 기준에는 모두 적합한 것으로 조사되었다. 토양의 경우 pH의 범위는 5.26-6.42로 약산성 조건이었으며 유기물과 유효인산의 함량은 각각 8.0-24.0 $g kg^{-1}$, 17.2-91.9 $mg kg^{-1}$ 수준이었다. 토양 pH의 경우 국내 농경지의 적정 범위인 6.0-6.5에 비해 약간 낮거나 적정 범위에 속하였으며 유효인산의

Table 3. Chemical properties and total heavy metal concentration of control soil.

	Name	pH	EC	OM	P ₂ O ₅	
			dS m ⁻¹	%	mg kg ⁻¹	
A	Samsan jeil	8.36	0.56	1.0	20.4	
D	Yanggok	7.55	0.26	0.5	38.4	
E	Jucheon	5.59	0.27	1.5	24.4	
Total Heavy Metal						
	Name		Cd	Pb	Cu	Zn
			mg kg ⁻¹			
A	Samsan jeil	2.9	84.8	47.0	277.2	
D	Yanggok	5.4	11.5	0.0	122.4	
E	Jucheon	8.0	46.2	23.5	131.1	

경우 국내 논토양의 적정범위인 80–120 mg kg⁻¹에 비해 삼산제일광산을 제외하고는 모두 낮은 것으로 조사되었다.

수질과 토양의 중금속 농도 수질과 토양의 중금속과 비소의 농도는 Table 6에 정리하였다. 수질의 경우 농업용수 하천수의 기준은 Cd, Pb, As가 각각 0.005, 0.05, 0.05 mg L⁻¹으로 설정되어 있으며 이에 대해 조사 광산 지역의 하천수는 모두 기준 이하인 것으로 조사되었다. 삼산제일광산의 경우 Cu와 Zn의 농도가 각각 48, 151 µg L⁻¹로 조사되었으며 대정광산의 경우 Zn의 농도가 0.03 µg L⁻¹로 조사

되었다.

토양의 경우 토양오염공정기준에 따라 Cd (4 mg kg⁻¹), Pb (200 mg kg⁻¹), As (25 mg kg⁻¹), Cu (150 mg kg⁻¹), Zn (300 mg kg⁻¹)의 오염도는 총 5개의 광산 가운데 각각 4개 (80%), 1개 (20%), 3개 (60%), 1개 (20%), 2개 (40%)의 광산이 기준을 초과하였다. 5개의 광산 가운데 삼산제일광산의 경우 Cd을 제외한 모든 중금속의 오염도가 기준을 초과하였으며 대정광산의 경우 Cd의 경우 기준을 초과하였고 나머지 4개의 중금속에 대해서는 기준 이하로 조사되었다.

Table 4. Surface water quality near at the abandoned metal mines.

Name	Temp	pH	Conductivity	DO
	°C		µS cm ⁻¹	mg L ⁻¹
1 Daejung	22.1	7.26	814	6.47
2 Bong	21.5	7.28	892	6.87
3 Samsan jeil	20.2	7.27	442	5.25
4 Yanggok	20.8	6.71	196.7	6.20
5 Jucheon	20.6	7.56	132.9	7.35

Table 5. Chemical properties of soil.

Name	pH	EC	OM	P ₂ O ₅
		dS m ⁻¹	%	mg kg ⁻¹
1 Daejung	5.47	0.28	1.8	29.7
2 Bong	6.42	0.11	1.0	17.2
3 Samsan jeil	6.13	0.16	2.4	91.9
4 Yanggok	5.63	0.43	0.8	45.9
5 Jucheon	5.26	0.20	1.2	158.4

Table 6. Heavy metal concentration in surface water and soil.

Name	Cd	Pb	As	Cu	Zn	
	µg L ⁻¹					
Surface water	Daejung	< LOD ¹⁾	< LOD	< LOD	0.03	
	Bong	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	
	Samsan jeil	< LOD	< LOD	< LOD	48.00	
	Yanggok	< LOD	< LOD	28.72	< LOD	
	Jucheon	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	
	mg kg ⁻¹					
Soil	Daejung	4.4	21.3	21.39	83.7	241.6
	Bong	6.1	121.3	14.15	32.6	261.8
	Samsan jeil	2.5	1205.4	397.36	825.7	323.7
	Yanggok	4.9	59.1	84.69	74.3	450.9
	Jucheon	5.9	10.3	123.35	26.8	112.4

¹⁾LOD: Limited of Detected

생태독성 평가 수질과 토양에 대한 생태독성 시험의 결과는 각각 Table 7과 8에 정리하였다. 물벼룩 치사율의 경우 대조구와 비교하였을 때 모든 광산에 대해 치사율이 나타나지 않았으나 삼산제일광산의 경우 물벼룩의 치사율이 85%로 나타났다. 농업용수의 하천수에 대한 중금속 농도가 모두 기준이하였던 점을 감안하며 삼산제일광산의 경우 물벼룩에 대한 치사율이 높은 결과는 구리와 아연의 농도에 의한 것으로 판단된다 (Gills et al., 2006). 특히 구리의 경우 아연에 비해 독성이 더 높으며 반치수농도인 LC₅₀의 경우 약 26 µg L⁻¹으로 삼산제일광산의 경우 48 µg L⁻¹로 조사되어 이에 따른 물벼룩의 치사율이 높은 것으로 사료된다 (Gutierrez et al., 2015).

발아시험의 경우 대정광산, 봉광산, 삼산제일광산에서 93.9, 93.3, 97.3%의 발아율을 보였으며 나머지 2개의 광산에서는 모든 발아가 진행되었다. 뿌리생장 저해율의 경우 대조구의 뿌리생장율과 비교하여 산출하였으며 총 5개의 광산 중 가장 저해율이 높은 광산은 삼산제일광산으로 대조구 (1.13 cm)에 비해 약 85%의 뿌리 생장 저해를 나타냈다.

토양의 경우 봉광산과 양곡광산을 제외한 나머지 3개의

Table 7. Result of ecotoxicity test for surface water near at the mining sites.

Mines	Sites	<i>Daphnia magna</i> mortality (%)	Germination (%)	Inhibition of Root elongation (%)
Daejung	Control	0.0	100	-
	Site	0.0	93.3	3.39
Bong	Control	0.0	100	-
	Site	0.0	93.3	0.00
Samsan jeil	Control	0.0	100	-
	Site	85.0	97.8	84.96
Yanggok	Control	0.0	100	-
	Site	0.0	100	11.28
Jucheon	Control	0.0	100	-
	Site	0.0	100	21.05

Table 8. Result of ecotoxicity test for soil near at the mining sites.

Mines	Sites	Earthworm (<i>Eisenia fetida</i>) mortality (%)	Germination (%)	Inhibition of Root elongation (%)
Daejung	Control	0.0	73	-
	Site	3.3	53	68.04
Bong	Control	0.0	85	-
	Site	0.0	70	10.64
Samsan jeil	Control	0.0	50	-
	Site	6.7	43	27.44
Yanggok	Control	0.0	97	-
	Site	0.0	60	20.47
Jucheon	Control	0.0	73	-
	Site	6.7	73	7.96

지렁이 치사율은 3.3–6.7%로 조사되었다. 청경채를 이용한 발아율과 뿌리생장 저해율의 경우 지렁이 치사율에 비해 광산별 편차가 크게 나타났다. 발아율의 경우 대조구에서의 발아율 범위는 50–97%였으며 중금속 오염 농경지에 대한 발아율의 범위는 43–73%로 조사되었다. 삼산제일광산의 경우 농경지의 발아율이 43%로 가장 낮았으며 주천광산의 발아율이 73%로 가장 높았다. 뿌리생장 저해율 역시 광산별로 편차가 크게 나타났다. 총 5개의 광산에 대한 저해율의 범위는 10.64–68.04%로 나타났으며 대정광산의 경우 뿌리생장 저해율이 대조구 (8.75 cm)에 비해 약 68%가 저해되어 가장 높은 저해율을 나타냈다. 수질에서 가장 높은 저해율을 나타냈던 삼산제일광산의 경우 뿌리생장 저해율이 약 27%로 총 5개의 광산 중 2번째로 높은 저해율을 나타냈으며 봉광산의 뿌리생장 저해율이 가장 낮은 약 11%를 나타냈다.

생태독성 지수값 산정 수질과 토양의 생태독성 지수값 (EI, Ecotoxicity Index)을 이용하여 0–1 사이의 값으로 지수화로 변환한 결과는 Fig. 1에 나타내었다. 대정광산의 경우 수생태에 대한 EI (0.02)에 비해 토양의 EI (0.39)가 약 20배정도 높았으며 삼산제일광산의 경우 수생태의 EI (0.52)

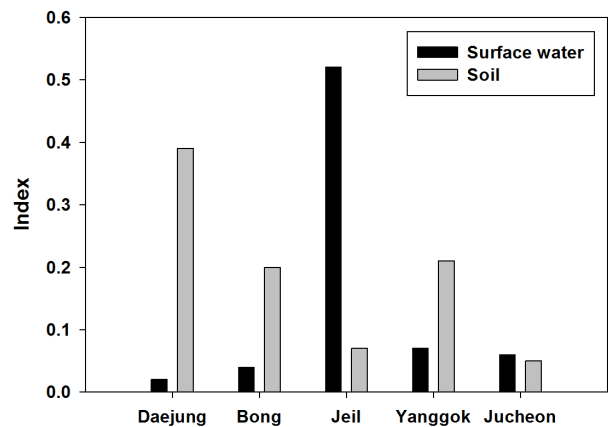


Fig. 1. Calculated ecotoxicity index for both surface water and soil.

가 토양의 EI (0.07)에 비해 약 60배 정도 높았다. 삼산제일광산을 제외하고는 4개의 광산에서는 토양의 EI 값이 수생태의 EI값에 비해 높았으며 주천광산의 경우 수생태와 토양의 EI 값이 모두 2번째로 낮았다.

수생태와 토양의 EI 값에 대하여 산술평균을 한 결과 삼산제일광산 (0.30) > 대정광산 (0.21) > 양곡광산 (0.14) >

봉광산 (0.12) > 주천광산 (0.06)으로 산출되었다. 삼산제일광산의 평균 EI 값이 5개의 광산 중 가장 높았으며 주천광산의 평균 EI 값이 가장 낮았다.

중금속 오염 기준과 계산된 EI 값을 비교하였을 경우 삼산제일광산은 수생태에서의 Cu, Zn 농도가 높았으며 토양에서는 Cd를 제외한 나머지 4개의 중금속에 대해 기준을 초과하였다. 따라서 중금속의 농도와 생태위해성 평가의 EI값을 비교하였을 경우 가장 오염이 심한 삼산제일광산의 위해도가 가장 높은 것으로 조사되었다.

하지만 대정광산의 경우 수질의 중금속 농도와 토양의 Cd를 제외한 나머지 중금속 농도가 기준 이하였으나 생태위해도는 삼산제일광산에 비해 두 번째로 높게 계산되었다. 대정광산의 생태위해도 평가값 중 가장 높은 값은 뿌리성장 저해율이었으며 이는 대조구의 뿌리성장율과 비교하였다. 대정광산의 대조구에 대한 뿌리생장은 8.75 cm로 이는 나머지 4개 광산의 대조구에 대한 뿌리성장 평균값인 3.16 cm에 비해 약 2.76배 정도 높았다. 대정광산 시험구에서의 뿌리생장이 2.80 cm로 시험구의 평균 성장인 3.24 cm에 비해 약 0.86배 정도 낮은 점을 감안하면 대정광산의 대조구에서의 높은 뿌리 성장율에 의해 뿌리 성장 저해율이 높아진 것으로 사료된다.

Conclusion

광산인근 농경지의 토양과 하천수에 대한 생태독성평가를 실시하여 생태위해성 지수값 (EI)을 산정하였다. 하천수의 경우 농업용수의 중금속 기준에 대하여 모두 기준이하로 분석되었으며 토양의 경우 광산에 따라 차이가 있었다. 총 5개의 평가대상 광산 중 Cd의 농도가 초과한 광산이 총 4개 광산으로 가장 많았으며 다음으로는 As의 농도를 초과한 광산 수가 총 3개로 많았다. 수질과 토양에 대한 생태독성평가는 물벼룩, 지렁이, 그리고 청경채를 이용한 발아율과 뿌리성장 저해율에 대해 평가하였다. 평가결과 물벼룩과 지렁이의 경우 중금속 오염도가 가장 높았던 삼산제일광산의 독성이 각각 85%, 6.7%로 가장 높았으며 나머지 광산의 경우 치사율이 낮았다. 발아율의 경우 수질에서는 모두 95% 이상의 발아율을 보인 반면 토양의 경우 광산에 따라 편차가 심하였으며 삼산제일광산의 발아율이 43%로 가장 낮았다. 수질과 토양의 생태위해 지수값을 평균한 결과는 오염도가 가장 심했던 삼산제일광산이 0.30으로 가장 높았으며 오염도가 가장 낮았던 주천 광산이 0.06으로 5개 광산 중 가장 낮았다. 본 연구 결과를 바탕으로 광산 인근 농경지에 대한 중

금속 농도의 오염도뿐만 아니라 생태독성 평가를 통한 관리 체계 수립이 필요하며 이에 대한 기초자료 구축이 시급할 것으로 사료된다.

References

- ASTM. 2003. Standard guide for risk-based corrective action for protection of ecological resources.
- California Environmental Protection Agency, 2009. Soil toxicity and bioassessment test methods for ecological risk assessment.
- Fairbrother, A., R. Wenstel, K. Sappington, and W. Wood. 2007. Framework for metals risk assessment, *Ecotox. Environ. Safety*, 68:145-227.
- Federal contaminated sites action plan (FCSAP), 2012, Government of Canada.
- Gills, P.L., C.M. Wood, J.F. Ranville, and P. Chow-Fraser. 2006. Bioavailability of sediment associated Cu and Zn to *Daphnia magna*. *Aquatic Toxic.* 77:402-411.
- Guidelines for ecological risk assessment, 1998, US EPA
- Guidance for ecological risk assessment at hazardous waste sites and permitted facilities: Overview, 1996, State of California.
- Gutierrez, L., C. Garbisu, E. Ciprian, J.M. Becerril, M. Soto, J. Etxebarria, J.M. Madariaga, I. Antiguada, and L. Epelde,. 2015. Application of ecological assessment based on a novel TRIAD-tiered approach to contaminated soil surrounding a closed non-sealed landfill. *Sci. Total Environ.* 514:49-59.
- Jensen, J and M. Mesman,. 2006. Ecological risk assessment of contaminated land; Decision support for site specific investigations.
- Kim, K.I., B.C. Lee, D.W. Kim, and S.D. Kim. 2007. Ecological risk assessment of abandoned mine drainage in Korea based on *Vibrio fischeri*, *Selenastrum capricornutum*, and *Daphnia magna*. *J. Korean Soc. Environ. Eng.* 29:163-168.
- US Environmental Protection Agency. 1996. Ecological effects test guidelines; OCSPP 850.1010 Aquatic invertebrate acute toxicity test, freshwater daphnids.
- US Environmental Protection Agency. 2012a. Ecological effects test guidelines; OCSPP 850.4230 Early seeding growth toxicity test.
- US Environmental Protection Agency, 2012b. Ecological effects test guidelines; OCSPP 850.3100 Earthworm subchronic toxicity test.
- US Environmental Protection Agency, 2012c. Ecological effects test guidelines; OCSPP 850.4100 Seedling emergency and seedling growth.