연구논문

삼보광산 광산폐기물 적치장의 침출수 발생현황 및 하류수계의 오염도 평가

윤경욱¹⁾ · 정명채^{1)*} · 김정욱¹⁾ · 전순원¹⁾ · 한수호¹⁾ · 이진수²⁾ · 지원현²⁾ · 권오훈²⁾

Environmental Assessment of Water Quality Affected by Mine Drainage from Tailings Dam in the Sambo Pb-Zn Mine

Kyung Wook Yoon, Myung Chae Jung*, Jeong Wook Kim, Soon Won Jeon, Su Ho Han,
Jin Soo Lee, Won Hyun Ji and Oh Hoon Kwon

(Received 17 December 2019; Final version Received 7 January 2020; Accepted 21 February 2020)

Abstract : This study was focused on evaluating mine drainage that has leached out from a tailings dam in the Sambo Pb-Zn mine in South Korea. The effluent water exceeded the environmental water quality guidelines for Al, Cd, Fe, Mn, Ni, Zn, and F. In addition to stream waters being influenced by the mining effluent, concentrations of Cd, Mn, Pb, Zn, and F were also found to exceed the guidelines for agricultural usage and the maximum allowable concentrations permitted by the Food and Agricultural Organization (FAO) were found. Furthermore, sediment samples taken in the study area also contained elevated levels of these metals. Therefore, it is strongly recommended that remediation programs be established in the study area, including a water treatment system.

Key words : Sambo mine, tailings dam, mine drainage, stream water, sediment remediation

요 약 : 이 연구에서는 삼보광산 광물찌꺼기 적치장에서 발생하는 침출수에 의한 하류 수계 오염도를 평가하였다. 침출수는 Al, Cd, Fe, Mn, Ni, Zn, F 등의 항목이 기준치를 초과하고 있으며, 하천수는 건기에 오염부하가 높으며, Cd, Mn, Pb, Zn, F 등의 항목이 농업용수 수질기준 및 FAO 최대 권고치를 초과하는 것으로 확인되어 농업용수로 활용이 부적합한 것으로 확인되었다. 퇴적토는 전체 구간에서 약간 나쁨에서 매우 나쁨 단계로 확인되어 추가적인 조사 및 관리 등의 조치가 필요한 상황으로 판단된다. 또한 내리지역보다 상리지역에서 오염부하가 높으며, 오염물질이 하류로 확산되는 경향이 높기 때문에 해당지역의 수처리시설 개선 및 적절한 광해방지사업이 필요한 것으로 판단된다.

주요어 : 삼보광산, 광산폐기물 적치장, 침출수, 하천수, 퇴적토

서 론

국내에는 약 2,000 개소 이상의 휴·폐금속광산이 전국적으로 산재하여 분포하고 있으며, 갱내수, 광물찌꺼기, 폐(광)석, 침출수 등 다양한 오염원이 함께 존재하고 있다(MIRECO, 2010). 이러한 광산개발지역 및 오염원은 지형적으로 대부분 임야 또는 계곡의 상류지역에 위치하고 있어 수계를 따라 하류지역에 지속적으로 피해를 주고 있다.

특히 광물찌꺼기 적치장 내부로 유입된 물이 외부로 유출되는 침출수에 의한 하부 수계의 오염이 확인된 바 있으며, 광산폐기물 적치장 구조물의 침식 및 변형을 초래하는 요인으로 작용하여 사고를 발생시키며, 환경적, 인명적, 재산적 피해를 미치는 것으로 확인되었다(MIRECO, 2019; Park *et al.*, 2018; WMTF, 2019).

국내에서는 1990년대 후반부터는 광산이 소재한 관할 지자체에서 자체적으로 광해방지사업을 수행하였으며, 대부분 광산폐기물(광물찌꺼기, 폐(광)석 등)을 과거 광산개발 구역에 단순 매립하는 방식으로 처리하였다. 2005년 이후에는 한국광해관리공단(Korea Mine Reclamation Corporation, MIRECO)을 중심으로 광해방지사업이 이루어지고 있으며, 수질개선, 토양 오염개량·복원, 광물찌꺼기 유실방지, 산림복구, 폐석유실방지, 지반안정, 폐시설물 철거, 소음·진동·먼지날림방지 등 광해 유형을 다양한 분야로 구분하

1) 세종대학교 에너지자원공학과
2) 한국광해관리공단 기술연구소 광해방지연구실
수질토양기술연구팀

*Corresponding Author(정명채)

E-mail; jmc65@sejong.ac.kr

Address; Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

고, 휴·폐광산 뿐만 아니라 가행광산에서 발생하는 광해 유형을 포함하여 보다 전문적인 광해방지사업 및 광산지역의 종합적 관리를 추진해 나가고 있다. 그러나 주로 지정폐기물로 구분된 광물찌꺼기의 경우 광구로 지정된 구역 내에서 이송과 보관이 가능하지만 외부지역으로는 반출 및 반입 등의 행위를 금지하고 있기 때문에 현재까지도 광산지역에 매립을 수행하고 있다. 또한 과거 조성된 광물찌꺼기 적치장 보다 차수시설 및 토목, 건축기술 등이 개선된 형태로 시공되었지만, 적치장의 지리적 위치가 대부분 계곡을 매립한 계곡형으로 조성되었거나 계곡부와 접하여 사면형 또는 평지형의 형태로 조성되어 있기 때문에 강우 및 하천수에 의한 침출수가 불가피하게 발생하고 있는 실정이다.

그 동안 광산지역에서 오염도 평가와 관련한 연구는 하류 수계 농경지 주변에 대한 수질 및 토양오염도 평가를 목적으로 연구된 사례가 다수로 존재한다. 몇몇 연구에서는 하류 지역 수계의 하천수 및 퇴적토 오염도를 평가하는 사례가 있으나 주로 중금속만을 분석대상으로 평가하였으며, 오염지수(Pollution Index, PI)를 산출하여 지점별 상대적인 오염부하량만을 평가하는 연구가 이루어졌다(Jung *et al.*, 2008; Jung *et al.*, 2012). 또한 현재 광산지역에서 발생한 침출수에 의한 하류 지역 수계의 하천수 및 퇴적토 오염도를 평가하는 시범사업을 환경부를 중심으로 진행되고 있다(MOE, 2019a; MOE, 2019b).

이처럼 침출수에 의한 하류 지역 하천수 및 퇴적토의 오염도평가 및 연관성을 연구한 사례가 부족하다. 이에 본 연구에서는 국내 대표적 연·아연 광산인 삼보광산 광물찌꺼기 적치장에서 유출되고 있는 침출수에 의한 하부 수계의 영향을 파악하기 위하여 건기와 우기로 구분하여 하천수와 퇴적토를 대상으로 이격거리별 오염도를 평가하였다. 또한 중금속 외 불소 등의 분석대상항목을 추가하여 오염도를 평가하였으며, 퇴적토 오염의 경우 국내 예규를 적용하여 항목별 정량화된 오염도에 따른 퇴적토의 등급과 상태를 확인하였다. 이러한 연구결과는 향후 삼보광산에서 발생하고 있는 침출수의 저감(집수)방안 마련 및 수질오염물질 배출시설인 적치장의 개선·보완 사업, 그리고 나아가 해당지역의 공공수역 관리를 위한 기초자료로 활용 가능할 것이다.

연구방법 및 분석

연구지역

삼보광산은 경기도 화성시 봉담읍 내리와 상리 지역에 소재한 광산으로 일제강점기인 1936년부터 개발을 시작하였으며, 1956년에는 내국인이 광업권을 등록하였다. 이후 1972년 삼한광업(주)이 인수하여 본격적으로 연, 아연 광

종을 개발하였으며, 1999년 광업권 소멸되었다. 해당지역 일대의 지질은 선캄브리아기 경기변성암복합체로 흑운모편암, 백운모편암, 흑운모편마암과 이를 관입한 시대미상의 복운모화강암으로 구성된다. 주요 산출 광물은 황화광물인 섬아연석(Sphalerite, ZnS), 방연석(Galena, PbS) 및 중정석(Barite, BaSO₄) 등이며, 미량으로 황동석(Chalcopyrite, CuFeS₂)과 황철석(Pyrite, FeS)이 산출된다. 맥석 광물은 주로 석영(Quartz, SiO₂)으로 갈슘과 탄산염광물인 능망간석(Rhodochrosite, MnCO₃), 방해석(Calcite, CaCO₃), 형석(Fluorite, CaF₂), 돌로마이트(Dolomite, CaMg(CO₃)₂)도 소량 산출되고 있으며, 그 외 견운모(Sericite), 디카이트(Dickite, Al₂Si₂O₅(OH)₄) 등이 산출되고 있다(Jung and Chon, 1988). 가행 당시 침전지로 활용한 7개의 구역을 1975년부터 1989년까지 광물찌꺼기 적치장 시설로 조성하였으며, 1998년부터 2000년까지 적치장 복토, 초지조성, 배수로공사, 침출수 정화조 설치 등 총 5회의 광해방지사업을 관할 지자체에서 수행하였다. 내리 지역에 위치한 광물찌꺼기 적치장은 세부적으로 3, 4, 5, 6, 7 광물찌꺼기 적치장이 있으며, 54,845 m² 면적에 692,000 톤의 광물찌꺼기

Sambo mine (Nae-ri) Drainage

Sambo mine (Sang-ri) Drainage

Fig. 1. Location of study area Sambo mine.

가 매립되어 있다. 상리 지역에 위치한 광물찌꺼기 적치장은 세부적으로 1, 2 광물찌꺼기 적치장이 있으며, 9,700 m² 면적에 63,000 톤의 광물찌꺼기가 매립되어 있다(MIRECO, 2017). 현재 내리지역에 침출수가 발생하는 지점 직하부에는 수처리 시설이 있다. 내리지역은 Semi-Active 공법(처리용량 : 250 m³/day)으로 조성된 수처리 시설이 있으며, Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn, SO₄²⁻ 등 10가지 항목에 대한 수질정화 처리를 수행하고 있다. 상리지역은 실험용 파일렛 플랜트(생물반응기 및 소택지 등)이 조성되어 있으며, 석회석, 식물 등을 이용한 자연저감방식으로 침출수를 처리하고 있으며 내리지역과 상리지역의 침출수에 대한 현장상황을 Fig. 1에 나타내었다.

시료채취 및 분석방법

오염원인 삼보광산 광물찌꺼기 시료는 내리에 위치한 광물찌꺼기 적치장에서 매립심도를 고려하여 약 10 m까지 심도별 시료를 채취하였으며, 건기(4월)와 우기(8월)를 구분하여 침출수(mine drainage), 하천수(stream water) 및 퇴적토(sediment)를 채취하였다(Fig. 2). 침출수는 광물찌꺼기 적치장을 기점으로 내리지역과 상리지역에서 각각 발생하는 침출수를 채취하였다. 내리지역의 침출수는 적치

장에서 유출되는 형태이며, 건기에 약 75 m³/day, 우기에 약 120 m³/day가 유출되고 있다. 상리지역의 침출수는 함몰된 갱구에서 유출되는 갱수가 직하부 계곡을 따라 흐르고 있으며, 소량의 침출수가 계곡으로 합류하는 형태로 건기에 약 60 m³/day, 우기에 약 100 m³/day가 유출되고 있다. 하천수 시료 SW-1, 2, 3, 4 및 퇴적토 시료 SS-1, 2, 3, 4는 각각의 적치장을 기점으로 500 m 간격으로 최대 2.0 km 하류 지역까지 채취하였다. 퇴적토는 하천수와 동일 지점에서 채취하였으며, SW-3(SS-3) 지점과 SW-4(SS-4) 지점은 내리와 상리의 하천수가 합류된 수계에서 채취하였다. 심도별 광물찌꺼기 시료는 혼합 후 교반하여 균질화시키고 동일시료를 T-1, 2, 3으로 분취한 후, 토양오염공정시험기준에 따라 전처리 및 분석을 수행하였다. 침출수, 하천수 및 퇴적토 시료는 휴·폐광산 유출수 현장조사 시행세칙 및 수질오염공정시험기준에 준하여 시료채취, 전처리 및 분석을 수행하였다. 분석항목은 연구지역의 지질대 및 산출 광물을 고려하여 Al, As, Cd, CN, Cr⁶⁺, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn, F 등 총 13종을 대상으로 하였다.

오염도 평가기준 및 방법

광물찌꺼기 시료의 분석결과로 하천수 및 퇴적토에 영향을 미치는 오염원의 미량원소별 함량을 확인하였으며, 침출수 분석결과를 “수질오염물질 배출허용기준(청정지역)”을 적용하여 오염도를 평가하였다. 단, Al 항목의 경우, 기준 값이 설정되어 있지 않기 때문에 기존 연구(MIRECO, 2012)에서 제안된바 있는 1 mg/L 이하를 적용하였다. 하천수 분석결과를 삼보광산 하류 지역의 필지는 대부분 전, 답 등 농경지로 활용되고 있어 사용목적에 따라 환경정책기본법 시행령에 따른환경기준 중 “농업용수 수질환경기준”을 적용하였으며, 분석대상 항목 중 기준치가 있는 As, Cd, CN, Cr⁶⁺, Hg, Pb 등의 항목에 대하여 이격거리별 하천수 오염도를 평가하였다. 또한 기준치가 없는 항목 Zn, Al, Fe, Mn, F 등의 항목은 국제연합식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)의 관개용수 중 최대권고농도(Recommended maximum concentration) Zn 2 mg/L, Al 5 mg/L, Fe 5 mg/L, Mn 0.2 mg/L, F 1 mg/L를 적용하여 평가하였다. 퇴적토 또한 분석대상 항목 중 기준치가 있는 As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn 등의 항목에 대하여 “하천·호소 퇴적물 오염평가기준”을 적용하여 지점별 오염도를 Table 1과 같이 평가하였다.

오염도 평가는 우선적으로 “하천 퇴적물 항목별 오염평가 기준”에 따라 I~IV 등급으로 구분하여 저서생물의 독성발생 가능성을 평가하고, 최종적으로 “하천·호소퇴적물 지점별 오염평가 기준”에 따라 보통(금속류 8 항목 모두 “I” 등급), 약간 나쁨(금속류 8 항목 중 “II” 등급 또는

Fig. 2. Location of study area and sampling points of the Sambo mine.

Table 1. Standard for pollution assessment by category of river sediment

Class	Metals concentration(mg/kg)						
	As	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn
I (less than limit)	15	0.40	112	48	0.07	40	59
II (less than limit)	45	1.87	224	228	0.67	88	154
III (less than limit)	92	6.09	991	1,890	2.14	330	459
IV (limit excess)	92	6.09	991	1,890	2.14	330	459

“III” 등급 항목 1개 이상), 나뭇(금속류 “II” 등급 기준 지수 0.34 이상), 매우 나뭇(“IV” 등급인 항목 1개 이상) 등 총 4 단계로 평가하였다. “II” 등급 기준 지수는 (I)과 같은 식으로 계산하였다.

결과 및 고찰

삼보광산 광물찌꺼기 미량원소 함량

삼보광산 적치장에서 채취한 광물찌꺼기 시료에서는 해당 지역 지질대의 영향에 의하여 Table 2와 같이 Al, Fe, Mn, Pb, Zn, F 등의 항목이 높게 부하되어 있으며, As, Cd, CN, Cu, Ni 항목도 소량 검출되고 있다. 그 외 Cr⁶⁺, Hg 등의 항목은 불검출로 확인되었다.

삼보광산 광물찌꺼기 적치장 침출수의 오염도 평가

내리지역에서 발생한 침출수와 상리지역에서 발생한 침출수의 건기 및 우기시료 분석결과를 Table 3에 정리하였

다. 내리지역에서 발생하는 침출수의 건기 pH는 6.47, Ec는 1,296 μ S/cm 이며 우기 pH는 6.13, Ec는 1,230 μ S/cm의 값을 나타낸다. 기준치 초과항목은 Al, Fe, Mn, Zn, F 항목으로 확인되었으며, Ni 항목은 건기에만 기준치를 초과하는 농도로 검출되었다. 상리지역에서 발생하는 침출수의 건기 pH는 6.77, Ec는 433 μ S/cm 이며 우기 pH는 6.23, Ec는 419 μ S/cm의 값을 나타낸다. 기준치 초과항목은 Al, Fe, Mn, Zn, F 항목으로 확인되었으며, Cd 항목이 건기, 우기 모두 기준치에 근접한 수치로 검출되었다. 내리 및 상리지역에서 발생하는 침출수 모두 건기보다 상대적으로 강우량 및 침출수의 발생량이 많은 우기시료에서 미량원소의 검출 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 단, Zn, F 항목의 경우 우기시료에서 유사하거나 오히려 높은 함량으로 검출되었다. 이는 일반적으로 pH 5~8 정도의 산화상태인 지표환경에서 Zn, F 항목의 원소별 상대적 이동도(mobility) K=1~10으로 moderately mobile로 구분되며(Perel'man, 1967), 분석 대상 원소들 중 이동성이 가장 높은 원소들이기 때문에 우

Table 2. Concentration of trace elements in tailings from the Sambo mine

Sample	Trace elements concentration (mg/kg)												
	Al	As	Cd	CN	Cr ⁶⁺	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn	F
T-1	2,560	9.47	2.48	0.50	N.D.	49.9	7,200	N.D.	1,350	5.4	456	1,520	950
T-2	2,350	6.84	2.19	0.40	N.D.	40.1	6,560	N.D.	1,180	5.0	389	1,370	989
T-3	2,070	7.30	2.59	0.40	N.D.	43.5	7,020	N.D.	1,200	4.9	402	1,670	1,010
Mean	2,320	7.87	2.42	0.43		44.5	6,930		1,240	5.1	416	1,520	984
±SD*	±244	±1.40	±0.21	±0.06	-	±5.0	±329	-	±90	±0.3	±36	±149	±32

N.D. = Not detected.

* = arithmetic mean ± standard deviation.

Table 3. Concentration of trace elements in drainage from tailings of the Sambo mine

Sites	Season	Concentrations of Chemical species												
		Standard(mg/kg)												
		Al	As	Cd	CN	Cr6+	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn	F
Nae-ri	Dry	3.6	N.D.	0.013	N.D.	N.D.	N.D.	6.3	N.D.	49.1	0.103	0.05	49.1	7.5
	Rainy	3.3	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	10.6	N.D.	45.0	0.094	N.D.	45.0	9.1
Sang-ri	Dry	3.5	N.D.	0.018	N.D.	N.D.	0.16	11.5	N.D.	6.2	0.027	0.31	1.9	5.1
	Rainy	1.0	N.D.	0.017	N.D.	N.D.	0.03	2.6	N.D.	5.3	0.024	0.07	16.0	5.4

N.D. = Not detected.

기에 높게 검출된 것으로 판단된다. 또한 내리지역의 침출수는 적치장에서 유출되고 있지만, 상리지역의 침출수는 함몰된 갯내수와 적치장에서 발생한 소량의 침출수가 합류 후 외부로 유출되고 있기 때문에 내리지역의 침출수 내 Zn 항목은 유사한 값으로 검출되지만, 상리지역의 침출수는 갯내수의 비중이 높기 때문에 지질적인 특성으로 인하여 이동성이 높은 원소들이 우기에 더욱 많이 검출되는 것으로 판단된다.

내리지역 광물찌꺼기 적치장 침출수에 의한 하천수 및 퇴적토 오염도 평가

내리지역에 위치한 적치장에서 발생한 침출수와 하류 방향으로 이격거리별 하천수 및 퇴적토의 원소별 분석결과를 Fig. 3에 도시하였다. 침출수가 수질오염물질 배출허용기준(청정지역)을 초과한 항목은 Al, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, F 등으로 이들 항목의 하천수 및 퇴적토의 분석결과는 전체적으로 침출수 발생지점에서 이격거리가 증가할수록 하천수의 농도는 감소하는 경향을 보였다. 우기에 비하여 건기에

Fig. 3. Concentration of drainage and stream water, sediments with different distances from the Sambo mine (Nae-ri).

Fig. 3. Concentration of drainage and stream water, sediments with different distances from the Sambo mine (Nae-ri). (Continued)

하천수의 미량원소 농도가 높게 검출되며, Ni, Pb 항목은 하천수의 농도가 기준치 미만 또는 불검출로 확인되었다. Fe 항목의 경우 1.5 km 지점에서 농도가 높게 검출되는데 이는 상리지역과 합류하는 지점으로 상리지역에서 발생한 침출수의 영향으로 판단된다. 상기 항목 중 농업용수 수질

기준을 초과한 지점은 없었으나, Mn 항목은 건기, 우기 모두 1.5 km 지점까지, F 항목은 건기에 최대 2.0 km 지점까지 FAO 최대 권고치를 상회하는 수준으로 검출되었다. 퇴적토의 경우 건기와 우기 모두 유사한 농도를 보이고 있으며, 이격거리에 따른 농도변화의 특이점을 보이고 있지 않

Table 4. Trace elements in sediment from Nae-ri in the study area

Season	Sample	Trace elements concentration(mg/kg)												
		Al	As	Cd	CN	Cr ⁶⁺	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn	F
Dry (Apr.)	SS-1	9,878	2.8	2.36	N.D.	N.D.	16	19,384	N.D.	3,459	14.0	79	728	482
	SS-2	12,659	3.7	3.51	N.D.	N.D.	28	24,809	N.D.	3,358	19.6	151	1,899	592
	SS-3	8,453	3.1	2.54	N.D.	N.D.	22	20,534	N.D.	3,023	16.1	42	975	249
	SS-4	13,441	7.0	3.86	N.D.	N.D.	31	31,513	N.D.	9,242	33.1	50	2,939	102
Rainy (Aug.)	SS-1	20,430	4.7	1.47	N.D.	N.D.	16	24,287	N.D.	3,079	21.0	51	2,130	708
	SS-2	11,913	5.4	1.00	N.D.	N.D.	24	20,747	N.D.	2,078	20.2	37	945	205
	SS-3	14,349	5.8	2.00	N.D.	N.D.	28	23,298	N.D.	506	25.7	49	1,327	250
	SS-4	11,697	5.9	1.10	N.D.	N.D.	32	18,655	N.D.	555	14.0	94	541	202

N.D. = Not detected.

Table 5. Assessment and categorization class of sediment from Nae-ri in the study area

		Metals concentration(mg/kg)						
Class		As	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn
I (less than limit)		15	0.40	112	48	0.07	40	59
II (less than limit)		45	1.87	224	228	0.67	88	154
III (less than limit)		92	6.09	991	1,890	2.14	330	459
IV (limit excess)		92	6.09	991	1,890	2.14	330	459
Dry (Apr.)	SS-1	2.8	2.36	N.D.	16	N.D.	14.0	79
	SS-2	3.7	3.51	N.D.	28	N.D.	19.6	151
	SS-3	3.1	2.54	N.D.	22	N.D.	16.1	42
	SS-4	7.0	3.86	N.D.	31	N.D.	33.1	50
Rainy (Aug.)	SS-1	4.7	1.47	N.D.	16	N.D.	21.0	51
	SS-2	5.4	1.00	N.D.	24	N.D.	20.2	37
	SS-3	5.8	2.00	N.D.	28	N.D.	25.7	49
	SS-4	5.9	1.10	N.D.	32	N.D.	14.0	94

N.D. = Not detected.

Table 6. Assessment and class II criteria index of sediment from Nae-ri in the study area

		Metals concentration(mg/kg)								Class II criteria index	Sediment appraisal
Metals		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn		
Dry (Apr.)	SS-1	0.063	1.262	0.0	0.071	0.0	0.160	0.511	0.622	0.336	slightly worse
	SS-2	0.083	1.877	0.0	0.122	0.0	0.224	0.983	1.623	0.614	worse
	SS-3	0.070	1.358	0.0	0.095	0.0	0.184	0.273	0.833	0.352	worse
	SS-4	0.157	2.064	0.0	0.134	0.0	0.378	0.326	2.512	0.696	worse
Rainy (Aug.)	SS-1	0.106	0.786	0.0	0.069	0.00	0.240	0.332	1.821	0.419	slightly worse
	SS-2	0.121	0.535	0.0	0.105	0.00	0.231	0.238	0.808	0.255	slightly worse
	SS-3	0.129	1.070	0.0	0.124	0.00	0.294	0.315	1.134	0.383	worse
	SS-4	0.132	0.588	0.0	0.139	0.00	0.160	0.610	0.463	0.261	slightly worse

으며, 각 지점별 하천수의 상관성도 낮은 것으로 확인된다. 단, Zn 항목은 우기에 지점별 하천수와 퇴적토의 농도 변화가 유사한 경향을 나타내고 있으며, F 항목은 건기와 우기 모두 유사한 경향을 보이고 있다.

Table 2와 Table 4을 비교해보면, 퇴적토의 분석대상 항목의 전체적인 농도는 광물찌꺼기의 원소별 농도와 유사하거나 오히려 높게 검출되었다. 또한 하천 퇴적물 항목별 오염평가 기준을 적용한 결과 Cd, Pb, Zn 등의 항목이 II 등급 또는 III 등급으로 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있거나 비교적 높은 수준으로 확인되었다(Table 5). 하천 호

소퇴적물 지점별 오염평가 기준을 적용하여 오염도를 최종 평가한 결과, 하류로 갈수록 건기에는 약간 나쁨에서 나쁨 단계로 오염부하가 증가하는 것으로 확인되었으며, 우기에는 이격거리별 약간 나쁨 > 나쁨 > 약간 나쁨 단계로 오염도가 다소 높게 나타나 건기에 오염부하가 증가된 것으로 확인되었다(Table 6).

상리지역 광물찌꺼기 적치장 침출수에 의한 하천수 및 퇴적토 오염도 평가

상리지역에 위치한 적치장에서 발생한 침출수와 하류방

Fig. 4. Concentration of drainage and surface water, sediments with different separation distances from the Sambo mine (Sang-ri).

Fig. 4. Concentration of drainage and surface water, sediments with different separation distances from the Sambo mine (Sang-ri). (Continued)

향으로 이격거리별 하천수 및 퇴적토의 분석결과를 Fig. 4에 도시하였다. 침출수가 기준치를 초과한 항목은 Al, Cd, Fe, Mn, Pb, Zn, F 등의 항목이며, 침출수 발생지점에서 이격거리가 증가할수록 하천수의 농도는 감소하는 경향을 보였다. 또한 전체적으로 우기보다 건기에 농도가 높게 검출되었으며, 특히 침출수 발생지점에서 약 0.5 km 하류지점의 하천수 농도가 침출수 농도와 거의 유사한 수준으로 높게 검출되었다. 이는 상리지역에 위치한 수처리시설이 소택지(retention pond)의 형태로 정화효율이 낮은 것으로 판단되며, 강우로 인한 침출수 발생량이 많은 우기에 이러한 경향은 더욱 뚜렷하게 나타난다. 분석대상 항목 중 농업용수 수질기준을 초과한 항목은 Cd, Pb으로, 건기에 Cd 항목이 최대 1.0 km 지점까지 기준을 초과하였으며, 우기에는 Cd, Pb 항목 모두 0.5 km 지점에서 기준을 초과하였다. Mn 항목은 건기와 우기 모두 최대 1.5 km 지점까지 FAO 최대 권고치를 상회하는 수준으로 검출되었으며, Zn 항목은 건

기에 1.0 km 지점까지, F 항목은 건기에 전체구간에서 FAO 최대 권고치를 상회하는 수준으로 검출되어 우기보다는 건기에 오염부하가 높은 것으로 확인되었다.

Table 2와 Table 7을 비교해보면, 퇴적토의 분석대상 항목의 전체적인 농도는 광물찌꺼기의 원소별 농도와 유사하거나 오히려 높게 검출되었다. 또한 하천 퇴적물 항목별 오염평가 기준을 적용한 결과, Ni 항목은 건기에 II 등급으로 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있는 것으로 확인되었으며, Cu 항목은 II 등급, III 등급으로 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있거나 비교적 높은 수준으로 확인되었다(Table 8). 또한 Cd, Pb, Zn 등의 항목은 최대 IV 등급으로 건기와 우기 모두 전체 구간에서 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 비교적 높거나 매우 높은 수준으로 확인되었다. 하천·호소퇴적물 지점별 오염평가 기준을 적용하여 오염도를 최종 평가한 결과 하류로 갈수록 건기에는 매우 나쁨에서 나쁨 단계로 확인되었으며, 우기에는 매우 나쁨에

Table 7. Trace elements in sediment from Sang-ri in the study area

Season	Sample	Trace elements concentration(mg/kg)												
		Al	As	Cd	CN	Cr ⁶⁺	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn	F
Dry (Apr.)	SS-1	17,653	11.1	40.94	N.D.	N.D.	605	37,173	N.D.	35,047	41.0	1,632	19,686	755
	SS-2	11,123	8.4	11.22	N.D.	N.D.	114	22,494	N.D.	7,113	20.8	541	4,939	283
	SS-3	8,453	3.1	2.54	N.D.	N.D.	22	20,534	N.D.	3,023	16.1	42	975	249
	SS-4	13,441	7.0	3.86	N.D.	N.D.	31	31,513	N.D.	9,242	33.1	50	2,939	102
Rainy (Aug.)	SS-1	15,956	13.5	19.50	N.D.	N.D.	235	30,782	N.D.	18,158	30.9	763	11,649	770
	SS-2	12,971	11.3	2.50	N.D.	N.D.	51	24,134	N.D.	640	21.6	152	1,996	211
	SS-3	14,349	5.8	2.00	N.D.	N.D.	28	23,298	N.D.	506	25.7	49	1,327	251
	SS-4	11,697	5.9	1.10	N.D.	N.D.	32	18,655	N.D.	555	14.0	94	541	202

N.D. = Not detected.

Table 8. Assessment and categorization class of sediment from Sang-ri in the study area

		Metals concentration(mg/kg)						
Class		As	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn
I (less than limit)		15	0.40	112	48	0.07	40	59
II (less than limit)		45	1.87	224	228	0.67	88	154
III (less than limit)		92	6.09	991	1,890	2.14	330	459
IV (limit excess)		92	6.09	991	1,890	2.14	330	459
Dry (Apr.)	SS-1	11.1	40.94	N.D.	605	N.D.	41	1,632
	SS-2	8.4	11.22	N.D.	114	N.D.	21	541
	SS-3	3.1	2.54	N.D.	22	N.D.	16	42
	SS-4	7.0	3.86	N.D.	31	N.D.	33	50
Rainy (Aug.)	SS-1	13.5	19.50	N.D.	235	N.D.	31	763
	SS-2	11.3	2.50	N.D.	51	N.D.	22	152
	SS-3	5.7	2.00	N.D.	28	N.D.	26	49
	SS-4	5.9	1.10	N.D.	32	N.D.	14	94

N.D. = Not detected.

Table 9. Assessment and class II criteria index of sediment from Sang-ri in the study area

Metals concentration(mg/kg)										Class II criteria index	Sediment appraisal
Metals	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn			
Dry (Apr.)	SS-1	0.249	21.893	0.0	2.653	0.0	0.469	10.598	16.826	6.586	worst
	SS-2	0.187	6.000	0.0	0.500	0.0	0.238	3.513	4.221	1.832	worst
	SS-3	0.070	1.358	0.0	0.095	0.0	0.184	0.273	0.833	0.352	worse
	SS-4	0.157	2.064	0.0	0.134	0.0	0.378	0.326	2.512	0.696	worse
Rainy (Aug.)	SS-1	0.302	10.428	0.0	1.032	0.0	0.353	4.956	9.956	3.378	worst
	SS-2	0.252	1.337	0.0	0.222	0.0	0.247	0.988	1.706	0.594	worse
	SS-3	0.129	1.070	0.0	0.124	0.0	0.294	0.315	1.134	0.383	worse
	SS-4	0.132	0.588	0.0	0.139	0.0	0.160	0.610	0.463	0.261	slightly worse

서 약간 나쁨 단계로 오염도가 감소하며, 건기에 오염부하가 증가되어 있는 것으로 확인되었다(Table 9).

결 론

이 연구에서는 삼보광산 광물찌꺼기 적치장에서 유출되고 있는 침출수의 발생현황과 하부 수계에 미치는 영향을 확인하기 위하여 광물찌꺼기의 오염도를 확인하고, 내리지역과 상리지역에서 발생한 침출수와 이격거리별 하천수 및 퇴적토를 분석하였으며, 그 결과를 종합하면 다음과 같다.

삼보광산 광물찌꺼기에는 Al, Fe, Mn, Pb, Zn, F 등의 항목이 높게 부하되어 있으며, As, Cd, CN, Cu, Ni 항목도 소량 검출되는 것으로 확인되었다. 이에 따라 내리와 상리지역의 침출수에서도 Al, Fe, Mn, Zn, F 등의 항목이 수질오염물질 배출허용 기준치를 초과하고 있으며, Cd(상리지역), Ni(내리지역) 항목도 기준치를 초과하거나 근접한 수치로 검출되었다.

하천수의 경우 우기보다 건기에 오염원소가 심하게 나타나고 있으며, 하류로 갈수록 원소별 검출농도가 감소하는 경향이 나타났다. 내리지역은 Mn, F 항목이 FAO 최대 권고치를 초과하는 수치로 검출되었으며, 상리지역은 Cd, Mn, Pb, Zn, F 등의 항목이 농업용수 수질환경기준 및 FAO 최대 권고치를 초과하는 수치로 검출되어 농업용수로 활용하기 부적합한 것으로 판단된다.

퇴적토의 경우, Al, Fe, Mn 등의 항목은 삼보광산 광물찌꺼기 보다 오히려 높게 검출되고 있으며, Zn, F 항목은 유사한 농도로 확인되었다. 동일지점에서 하천수와 분석결과를 비교해 볼 때 건기, 우기 모두 특이한 양상을 보이지 않으며 상관성이 낮은 것으로 판단된다. 단, 원소의 이동성이 높은 Zn, F 항목의 경우, 두 지역의 침출수 발생특성과 마찬가지로 하천수와 퇴적토의 농도 변화에서도 유사하게 나타나고 있는 것으로 확인되었다. 퇴적토의 오염도 평가 결과

두 지역 모두 건기에 오염도가 높게 나타나며, 약간 나쁨에서 매우 나쁨 단계로 확인되었다. 이에 따라 추가적으로 퇴적토에 대하여 독성시험을 통해 악영향 확인 및 조사범위를 상·하류로 확대하여 오염 규모 파악하고, 중장기적으로 배출시설 및 공공수역 관리가 필요한 것으로 판단된다.

침출수, 하천수 및 퇴적토는 전체적으로 주요 산출광물인 섬아연석, 방연석, 중정석 및 맥석광물인 능망간석, 형석 등에 의하여 Al, Mn, Pb, Zn, F 항목의 오염원소가 확인되고 있다. 또한 침출수에 의한 하천수의 오염이 확인되고 있으며, 퇴적토의 경우는 하천수와 상관성이 낮기 때문에 과거 광물찌꺼기가 유출되었거나 침출수와 함께 미량의 광물찌꺼기 입자가 유출되어 하류 수계에 지속적으로 축적된 것으로 추정된다. 내리지역 수계보다 상리지역 수계가 오염도가 높게 나타나며, 파일럿 규모의 실험시설에 의하여 낮은 정화효율 및 침출수의 발생 형태 등의 특성상 오염 확산이 더욱 가중되고 있어 향후 적절한 광해방지사업이 추진될 필요성이 있는 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국광해관리공단의 연구과제(201812104F8-00) “광산폐기물 적치장별 침출수 현황조사 및 특성규명”(2차년도)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Jung, G.B., Kwon, S.I., Hong, S.C., Kim, M.K., Chae, M.J., Kim, W.I., Lee, J.S., and Kang, K.K., 2012. Contamination assessment of water quality and stream sediments affected by mine drainage in the sambo mine creek. *Korean J. Environmental Agriculture*, 31(2), p.122-128.
- Jung, G.B., Lee, J.S., Kim, W.I., Ryu, J.S., and Yun, S.G., 2008. Monitoring of seasonal water quality variations and

- environmental contamination in the sambo mine creek, Korea. *Korean J. Environmental Agriculture*, 27(4), p.328-336.
- Jung, M.C. and Chon, H.T., 1998. Seasonal variation of heavy metal contents and environmental contamination in paddy fields round the Sambo Pb-Zn mine, Korea. *The Korean society for grosys. engineer.*, 35, p.19-29.
- MIRECO(Korea Mine Reclamation Corporation), 2010. *Investigation for evaluation of mines effect in Korea*, Won-ju, Korea, p.1-266.
- MIRECO(Korea Mine Reclamation Corporation), 2012. *Development of ecotoxicity evaluation system for mine drainage*. Won-ju, Korea, 309p.
- MIRECO(Korea Mine Reclamation Corporation), 2017. *Stability Analysis at a tailings dumping site of Sambo mine*, 19p.
- MIRECO(Korea Mine Reclamation Corporation), 2019. *Investigation on characteristic of seepage from various mine*

- waste dumping sites*, Won-ju, Korea, p.1-154.
- MOE(Ministry of Environment), 2019a. *Assessment of pilot monitoring in sediment from abandoned metal mine and Industrial complex in Korea*, Sejong, Korea, p.1-50.
- MOE(Ministry of Environment), 2019b. *Investigation surface water and sediment on upper stream of Nakdong river*, Sejong, Korea, p.1-210.
- Park, C.K., Kim, J.W., Jung, M.C., Park, H.S., Kim, D.K., and Oh, Y.S., 2018. Current occurrence and heavy metal contamination assessment of seepage from mine waste dumping site in Korea. *Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 155(6), p.588-595.
- Perel'man, A.I., 1967. *Geochemistry of Epigenesis*, Plenum Press, New York, 266p.
- WMTF(World Mine Tailings Failures), 2019.09.26., <https://worldminetailingsfailures.org>.

윤 경 욱

현재 세종대학교 에너지자원공학과 석사과정
(本學會誌 第56卷 第6号 参照)

김 정 욱

현재 세종대학교 에너지자원공학과 박사
(本學會誌 第55卷 第6号 参照)

한 수 호

현재 세종대학교 에너지자원공학과 석사과정
(本學會誌 第56卷 第6号 参照)

지 원 현

2007년 고려대학교 공과대학 환경시스템
공학 공학학사
2014년 호서대학교 벤처전문대학원 경영
학과 경영학박사

현재 한국광해관리공단 기술연구소 수질토양기술연구팀 과장
(E-mail; greenidea@mireco.or.kr)

정 명 채

현재 세종대학교 에너지자원공학과 교수
(本學會誌 第55卷 第6号 参照)

전 순 원

현재 세종대학교 에너지자원공학과 박사
(本學會誌 第56卷 第6号 参照)

이 진 수

1990년 이화여자대학교 과학교육과
이학사
1992년 이화여자대학교 과학교육과
교육학석사
1997년 서울대학교 자원공학과 공학박사

현재 한국광해관리공단 기술연구소 광해방지연구실 팀장
(E-mail; jslee@mireco.or.kr)

권 오 훈

2013년 연세대학교 보건과학대학 환경공
학부 공학사
2015년 연세대학교 보건과학대학 환경공
학과 공학석사

현재 한국광해관리공단 기술연구소 광해방지연구실 수질토양기
술팀 주임
(E-mail; ohkwon@mireco.or.kr)