P-24

인대광산 지역에서의 광산배수, 침출수 및 지표수 수질평가

강민주[1),2)]* · 이평구[1)] · 이욱종[1)] · 최상훈[2)]

1. 서론

인대광산을 대상으로 하여 광산지역의 수계를 상부에서 하부로 거리에 따라 광산배수, 침출수 및 지표수를 채취하여 광산배수와 침출수가 폐광산지대 집수유역 수계의 중금속 등 미량원소 오염에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 또한 집수유역 내 하천수의 계절 및 공간적 수질변화를 관찰하여 침출수와 광산배수에 의한 오염범위를 파악하고 하천수에 오염된 미량원소의 자연저감의 주요 요인과 기작을 규명하여 폐금속광산 지역에 자연저감화기술 적용 가능성을 검토하고자 하였다.

2. 시료채취 및 화학분석

2.1. 연구지역

인대광산은 전북 진안군 성수면 도통리(동경 127°22′, 북위 35°41′)에 위치한다. 광산 부근 일대의 지질은 경상계 낙동층군 하부에 속하는 사암, 세일, 역암 등이 넓게 분포하고 있다(대한광업진흥공사, 1987). 광상은 퇴적암층의 열극을 충진한 함금은석영맥으로 4-5개이다. 광석광물은 황동석, 방연석, 섬아연석, 유비철석 및 황철석 등이다.

2.2. 시료 채취 및 분석

하천수계 지표수, 침출수 및 광산배수를 대상으로 2005년 5월부터 2006년 2월까지 건기(2005년 5, 11월 및 2006년 2월)와 우기(2005년 6, 7 및 8월)로 구분하여 7회 채취하였다. 폐광석에 함유된 중금속 등 미량원소의 함량을 측정하기 위하여 제 1-4 폐석장을 대상으로 각 폐석장의 규모를 고려하여 33개 시료를 채취하였다. 5 폐석장은 폐광석의 입도가 자갈 이상의 매우 큰 조립질로 구성되어 있어 화학분석용 시료 채취가 불가능하여 제외하였다. 화학실험용 폐광석 시료는 2 mm 이하로 체질하여 여과한 뒤 오븐에서 50℃에서 건조하였으며, 건조된 시료를 1/4법으로 축분하여 미분쇄하였다.

전함량 분석 방법은 전처리를 거친 시료 1 g에 HNO_3 5 ㎖를 넣은 뒤 110℃에서 완전히 증발시킨 후, $HClO_4$와 HNO_3(1:5 비율)의 혼합산을 10 ㎖를 넣고 연기가 완전히 없어질 때까지 증발시켰다. 마지막으로 6N HCl를 10 ㎖를 넣고 110℃로 30분간 가열시킨다. 이후, 0.45 ㎛ 필터로 여과하였다. 화학분석 시료와 물시료의 양이온 분석은 고려대학교 전략광물센터 ICP-AES(Perkins-Elmer Optima 3000XL), 물시료의 음이온 분석은 한국지질자원연구원의 IC(Model Dionex 120), 수계 침전물은 강원대학교의 산업광물은행의 X-선 회절분석(Rigaku model D/Max-2200)을 이용하였다.

주요어: 인대광산, 하천수, 광산배수, 침출수, 미량원소, 자연저감

1) 한국지질자원연구원 (pklee@kigam.re.kr, 2825lwj@hanmail.net)

2) 충북대학교 지구환경과학과(1nanikka@hanmail.net, cshoon@chungbuk.ac.kr)

3. 연구 결과 및 토의

3.1. 인대광산의 주요 오염원 및 오염 확산 경로

3.1.1. 오염원 : 폐광석 및 침출수/광산배수

인대광산에서 채취한 폐광석시료에서 함량이 가장 높은 원소는 As로 평균 24,215±16,371 ㎍/g(105-64,035 ㎍/g)이었다. 이외, Pb는 평균 3,065±2,159 ㎍/g(142-8,169 ㎍/g), Zn은 평균 1,129±2,179 ㎍/g(65-12,750 ㎍/g), Cd은 평균 573±362 ㎍/g(3.0-1,584 ㎍/g) 및 Cu은 평균 527±362 ㎍/g(131-2,107 ㎍/g)이 검출되었다.

인대광산 폐석장으로부터 용출되는 침출수의 pH는 3.1-6.1, Eh 173-559 mV 및 SO42- 함량 5-310 ㎎/ℓ이었으며, Fe 함량은 0.017-8.730 ㎎/ℓ(평균 2.892±3.202 ㎎/ℓ), Zn 0.045-13.909 ㎎/ℓ(평균 5.926±4.847 ㎎/ℓ), Cu 0.010-4.154 ㎎/ℓ(평균 1.863±1.650 ㎎/ℓ) 및 Cd n.d.-0.077 ㎎/ℓ(평균 0.034±0.026 ㎎/ℓ)으로 계절 및 공간적인 변화가 심한 것으로 나타났다. 인대광산 광산배수의 수질은 건기와 우기와 상관없이 채취시기 동안 항상 일정한 것으로 나타났으며, pH 6.5-7.0, Eh 119-165 mV 및 SO42- 237-279 ㎎/ℓ을 보이고 있다. 미량원소의 함량은 Zn이 평균 6.604±1.422 ㎎/ℓ, Cd가 평균 0.026±0.007 ㎎/ℓ, Fe가 평균 0.480±0.666 ㎎/ℓ, Cu는 평균 0.069±0.039 ㎎/ℓ이었으며, Pb, As는 검출한계 이하였다(Table 1). Pb와 As가 검출되지 않는 것은 철수산화광물에 흡착되었기 때문인 것으로 해석된다.

Table 1. Mean and range of physicochemical parameters, major anions, and trace elements in water samples within Indae mine area

		Field parameters			Major anions(㎎/ℓ)		Trace elements(㎎/ℓ)					
		pH	EC (㎲/cm)	ORP (mV)	NO_3^-	SO_4^{2-}	Fe	Zn	Cd	Pb	Cu	As
leachate	mean	3.9	286	432	5.52	116	2.59	5.36	0.03	0.00	1.70	0.02
	range	3.1 - 6.1	39 - 652	174 - 559	3.88 - 8.42	5 - 290	0.02 - 7.72	0.05 - 13.34	0.00 - 0.07	0.00 - 0.02	0.01 - 4.09	0.00 - 0.12
mine drainage	mean	6.5	459	130	0.57	255	0.67	6.79	0.02	0.00	0.07	0.00
	range	5.7 - 7.0	438 - 487	87 - 165	0.00 - 0.87	237 - 279	0.00 - 1.46	4.40 - 10.11	0.00 - 0.04	0.00 - 0.00	0.00 - 0.14	0.00 - 0.00
upstream reach	mean	4.5	235	326	4.28	136	0.14	4.44	0.02	0.01	0.77	0.00
	range	3.8 - 7.0	86 - 423	91 - 498	0.61 - 7.40	31 - 275	0.00 - 0.46	1.70 - 6.59	0.00 - 0.03	0.00 - 0.08	0.04 - 1.33	0.00 - 0.11
downstrea m reach	mean	5.5	123	265	5.07	50	0.02	1.48	0.00	0.00	0.22	0.00
	range	4.2 - 7.4	54 - 374	93 - 446	0.00 - 14.73	13 - 286	0.00 - 0.08	0.04 - 5.36	0.00 - 0.03	0.00 - 0.02	0.00 - 0.83	0.00 - 0.03
tributary	mean	6.6	57	192	6.36	8	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	range	5.7 - 7.2	12 - 128	72 - 297	0.38 - 14.12	1 - 18	0.00 - 0.05	0.00 - 0.01	0.00 - 0.00	0.00 - 0.00	0.00 - 0.00	0.00 - 0.00

3.1.2. 오염확산 경로: 지표수 오염

상류의 수질은 Zn 1.698-5.830 ㎎/ℓ, Cd 0.010-0.031 ㎎/ℓ, Cu 0.210-1.333 ㎎/ℓ, Fe 0.015-0.456 ㎎/ℓ, Pb n.d.-0.077 ㎎/ℓ 및 As n.d.-0.108 ㎎/ℓ이 검출되었으며, Zn, Cu 및 Cd은 시료채취 시기 및 위치에 따른 함량 변화가 거의 없는 것으로 나타났으나 Pb와 As는 시료채취 시기에 따른 함량의 변화가 매우 큰 것으로 나타났다. 하류는 광산지대를 경유하지 않은 지류와 합류된 후 pH는 급격히 증가하고 SO42- 및 미량원소 함량은 크게 감소하였다. Zn 0.060-2.718 ㎎/ℓ, Cd n.d.-0.015 ㎎/ℓ 및 Cu n.d.-0.506 ㎎/ℓ이었다. Pb와 As는 거의 검출되지 않았다(Table 1).

3.2. 하천수 중금속 오염범위 및 자연저감

인대광산에서 침출수 및 광산배수의 영향으로 오염이 심화되는 구간은 연구대상 수계의 상류인 해발 약 490m에서부터 해발 약 750m 구간인 것으로 확인되었으며, 해발 약 420m와 해발 약 325m 구간에서 지류와 합류되면서 수계의 수질은 배경값과 거의 유사한 수준까지 회복되었다. 따라서 인대광산의 폐광석 및 광산배수에 의해 오염된 수계 구간은 해발 약

490-750m 구간이며, 해발 약 355m 구간 이후부터는 주요 오염원인 침출수와 광산배수의 영향이 거의 없는 것으로 판단된다.

침출수의 경우, 하천수 수질기준(사람의 건강보호 기준: As 0.05 mg/l, Cd 0.005 mg/l, Pb 0.05 mg/l)을 초과하는 원소는 Cd이며, As와 Pb는 기준을 초과하지 않는다. 오염물질배출허용기준(청정지역 : As 0.1 mg/l, Cd 0.02 mg/l, Cu 1.0 mg/l, Pb 0.2 mg/l, Zn 1.0 mg/l)과 비교한 경우, Zn 및 Cd은 기준을 초과하였으나 Cu와 As는 일부 시료에서만 기준을 초과하였다. 한편 Pb는 모든 시료에서 기준을 초과하지 않았다. 광산배수의 경우, Cd이 하천수수질기준(사람의 건강보호기준)을 초과하였고 Pb와 As는 기준보다 낮은 함량을 보였다. 오염물질배출허용기준(청정지역)과 비교한 경우, Zn와 Cd이 기준을 초과하였으며 Cu, Pb 및 As는 모두 기준보다 낮은 함량이 검출되었다.

지표수의 경우, 하천수수질기준(사람의 건강보호기준)과 비교하면 Pb는 광산배수에 영향을 받는 지점에서 기준을 초과하였다. Cd 경우, 건기에는 광산배수로부터 영향을 받는 해발 약 355-575m, 우기에는 해발 약 355-650m 구간에서 초과하였다. As의 경우, 광산의 영향을 받는 구간보다는 마을 앞에서 채취한 시료에서 기준을 초과하였다. 오염물질배출허용기준(청정지역)과 비교한 경우 Pb는 모든 수계에서 기준을 초과하지 않았다. Zn은 우기와 건기 모두 해발 약 355-650m 구간에서 초과하였다. Cd은 건기에 490-575m, 우기에 490-650m 구간이 초과하였다.

광산배수가 유출되는 갱입구와 하천수계가 혼합되어진 곳에서 침전된 침전물은 모두 비정질의 페리하이드라이트(ferrihydrite)와 침철석 등이었으며, 일부 슈워트마나이트(schwertmannite)가 관찰되었다.

인대광산에서 광산배수와 합류된 수계의 지표수 시료의 미량원소 함량과 각 시료 채취 지점의 침전물에서의 함량을 비교하면, Zn와 Cu의 경우 용해된 상태로 존재하는 함량에 비교하여 침전물에 흡착된 함량이 매우 높은 것으로 나타났다(Table 2). 이러한 결과는 용해된 상태로 존재하는 Zn와 Cu가 대부분 침전물에 의해 자연적으로 흡착되어 제거되고 비교적 낮은 함량만이 용해된 상태로 남아있는 것임을 지시하고 있다. 또한, 광산배수와 지표수에는 As와 Pb의 함량이 검출한계 이하였으나 침전물에서 매우 높은 함량이 검출된 것은 용해된 상태로 존재하던 이들 원소들이 침전물에 흡착되어 자연적으로 완전하게 제거된 것으로 해석된다.

Table 2. The total concentrations(μg/g) of trace metals of precipitates(i.e. Fe-oxyhydroxides and geothite) within creeks from Indae mine area

	Na	K	Fe	Mn	Zn	Cu	Cd	Pb	As
ID-7	23	64	383,627	10,762	17,424	19,031	246	298	8,554
ID-8	26	123	352,086	4,571	17,205	25,923	216	580	7,278
ID-10	30	298	313,969	378	2,936	14,965	148	1,288	7,003
mean	26	162	349,894	5,237	12,522	19,973	203	722	7,612

한편 수계의 하류로 가면서 오염되지 않은 하천수의 유입량이 크게 증가하면서 하천수계 오염의 주요 원인인 폐광석으로부터 발생하는 침출수와 광산배수의 영향이 거의 없는 것으로 판단되며, 이는 2차 광물의 침전에 의한 화학적인 요인보다 광산지대를 경유하지 않은 지표수에 의해서 희석되는 물리적인 요인에 의해 자연적으로 저감되는 것으로 해석된다.

3.3. 폐광석 처리방안의 제안

기존의 단순매립 방법은 대기, 지하수 및 지표수와의 화학적 상호작용을 억제할 수 있는 물리적인 차폐저장 처리를 적용하고 있다. 국내 폐금속광산 지역의 폐기물들은 계곡사이에 소규모로 적치된 경우가 많으며 새로이 최하부터 차수시설을 갖춘 공학적 저장시설을 갖추기에는 시공상의 어려움이 따르는 상황이다. 따라서 현 적치상태를 유지하면서 오염물질의 유출을 방지할 수 있는 폐광석 처리시스템이 필요하다. 강민주 외(2003) 및 Lee et al.(2005)의 연구에서 폐광석의 산화작용으로 용해된 미량원소는 폐광석의 표면과 균열 등에 침전된 불용성 철수산화광물에 흡착되어 현장에서 이동이 제어되어 자연적으로 안정화되는 것으로 밝혀졌으며 자연 안정화된 미량원소는 pH 2 이상의 산성환경에서도 재용출되지 않는 것으로 나타났다. 따라서 산사면에 쌓여있는 폐광석은 유실을 방지할 수 있고 산화환경을 유지할 수 있는 단순하고 경제성이 매우 높은 새로운 처리기술을 적용하고 유실된 미세한 입자의 폐광석을 처리하기 위한 옹벽과 사방댐을 설치하는 방법을 검토할 필요가 있다. 침출수의 유량이 많고 오염물질 함량이 매우 심각할 경우 폐기물 상부층 또는 오염물질 유출부에 하드팬(hard pan)을 형성시킬 수 있는 불용화방법을 이용하여 오염물질의 안정화를 증대시키는 방법이 있다.

4. 결론

광산배수의 수질은 계절적인 변화가 거의 없이 일정한 경향을 보이고 있는 반면, 침출수 및 지표수의 화학성분은 시료채취 시기 및 공간적인 변화가 매우 컸으며, 특히 지표수에서는 건기에서 우기로 갈수록 pH은 낮아지고 황산염(SO42-) 및 Zn, Cu 및 Cd 등 미량원소 함량은 높아지는 경향이 뚜렷하였으나 As와 Pb 함량은 미약하거나 검출되지 않았다. 침전 및 흡착 등 화학적인 반응과 오염되지 않은 지표수와의 합류에 의한 희석작용에 의해 지표수의 중금속 등 미량원소가 자연적으로 저감되고 있음이 확인되었다. 산사면에 쌓여있는 폐광석을 단순하고 경제적으로 처리하기 위해서는 폐광석의 유실을 방지할 수 있고 산화환경을 유지할 수 있는 새로운 처리기술을 적용하는 것이 바람직하고 유실된 미세한 입자의 폐광석을 처리하기 위한 옹벽과 사방댐을 설치하는 방법으로 대체하는 것을 검토할 필요가 있다. 한편 침전 및 흡착 등으로 오염이 자연 저감된 지표수의 자연정화를 증대하기 위해서는 오염되지 않은 지표수와 혼합시켜 자연배경값까지 낮아지게 할 수 있는 물리적 희석을 제안한다.

5. 참고문헌

1) 강민주, 이평구, 최상훈, 신성천 (2003) 서보광산 폐광석 내 2차 광물에 의한 중금속 고정화. 자원환경지질, v. 36, p. 177-189.
2) 대한광업진흥공사 (1987) 한국의 광상. v. 10, p. 664-665.
3) Lee, P.K., Kang, M.J., Choi, S.H. and Touray, J.C. (2005) Sulfide oxidation and the natural attenuation of arsenic and trace metals in the waste rocks of the abandoned Seobo tungsten mine, Korea.. Appl. Geochem., v. 20, p. 1687-1703.