

제2연화광산 직내골 광미장 침출수에 오염된 하천수계의 시·공간적 수질변화 및 중금속 제거효율

이평구¹ · 강민주^{2*} · 최상훈³

¹한국지질자원연구원 지질환경재해연구부, ²한국환경공단 토양지하수처, ³충북대학교 지구환경과학과

Temporal and Spatial Variation and Removal Efficiency of Heavy Metals in the Stream Water Affected by Leachate from the Jiknaegol Tailings Impoundment of the Yeonhwa II Mine

Pyeong-Koo Lee¹ · Min-Ju Kang^{2*} · Sang-Hoon Choi³

¹Department of Geological and Environmental Hazards, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Department of Soil and Ground Water, Korea Environment Corporation

³Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University

ABSTRACT

This study had been carried out to investigate spatial and temporal variations of the concentrations of trace metals for contaminated surface water in creek affected by leachate from the tailings impoundment of the Yeonhwa II mine for about 2 years. It was also to ascertain the metal removal efficiency for potentially deleterious metals by the artificial and natural attenuation processes such as retention ponds and hydrologic mixing of uncontaminated tributaries. The concentrations of As, Pb, Cd, and Cu for leachate in the rainy season were not detected. On the other hand, the concentrations of Zn, Fe, Mn, Al, and SO₄²⁻ in the rainy season for leachate were 2-66 times higher than those in the dry season, due to the oxidation of the sulfide minerals and the dissolution of the secondary minerals. The concentrations of Zn and Cd for leachate and surface water of the upper creek in the rainy season exceeded the criteria of River Water Quality and Drinking Water Quality but in the dry season, those of analyzed all the metals (As, Pb, Cd, Cu, Zn, Cd, Fe, Mn, and Al) for surface water sampled at the study area were below the criteria of River Water Quality and Drinking Water Quality. In regard of the attenuation efficiency for the concentrations of metals, Fe, Mn, Al, Zn, Cd, As, and Cu were removed highly at retention ponds, while the removal efficiency for major cations and sulfate (SO₄²⁻) were related to mixing of the uncontaminated tributaries. Therefore, the major attenuation processes of the metal and sulfate contents in creek affected by leachate from a tailing dump were precipitation (accompanied by metal co-precipitation and sorption), water dilution, and neutralization.

Key works : Tailings impoundment, Leachate, Stream water, Trace elements, Natural attenuation

1. 서 론

폐광석 및 광미 등 광산폐기물이 빗물 혹은 지하수와 같은 물과 반응하게 되면 광산폐기물에 포함된 황화광물을 산화시키거나 혹은 건조기간 동안 형성된 황산염광물(sulphate mineral) 등 2차 광물을 용해시키고 이에 따라 산성의 침출수가 발생하게 된다. 이 침출수는 일반적으로 산도(pH)가 낮고 황산염(SO₄²⁻) 이온과 중금속 등 유해한

미량원소(trace elements)의 함량이 높아 하천 수계에 유입될 경우 하천 생태계에 중요한 환경문제를 발생시킬 수 있다(Fukushi et al., 2003). 침출수가 유입된 하천의 수질은 광산지역에 분포하는 암석의 지구화학적 특성과 광화작용의 특성에 따라 다양한 양상을 보이고(Berger et al., 2000; Howell and Bruce, 1995; Hudson-Edwards et al., 1999) 인위적인 처리를 하지 않아도 오염원으로부터 더 가까운 거리에서 지표수 중 미량원소의 함량이 배경농

*Corresponding author : mj kang@keco.or.kr

원고접수일 : 2010. 7. 15 심사일 : 2010. 7. 15 게재승인일 : 2010. 9. 9
질의 및 토의 : 2011. 4. 30 까지

도까지 낮아지기도 한다(강민주 외, 2006; 2007; Berger et al., 2000; Chapman et al., 1983; Kimball et al., 1994). 이것은 지역적인 수문학적 특성에 의하여 오염되지 않은 지표수와 합류되어 발생한 희석(dilution)과 같은 물리적인 요인과 pH 및 Eh의 변화에 따라 용해되었던 미량원소가 2차 광물로 침전(공침)되거나 침전된 다른 광물에 흡착되어 자연적으로 저감되는 화학적인 요인이 있다(Courtin-Nomade et al., 2003; Dold and Fontboté, 2002; Frau, 2000; Lee et al., 2005; Mascaro et al., 2001; McGregor et al., 1998; Shaw et al., 1998). 따라서 금속광산을 폐광함으로 인하여 발생한 환경오염 문제를 경제적으로 복원 혹은 복구하기 위해서는 유해한 미량원소의 오염원(source) 및 오염 확산경로(pathway)에 대한 정확한 부지특성평가를 수행하여야 할 뿐만 아니라 미량원소의 오염확산을 제어하는 메커니즘(희석, 침전, 흡착, 치환 등)에 대한 규명이 필요하다.

2002년 태풍 “루사”의 최대1일강우량은 870.5 mm(강릉 지역)이었고 2003년 태풍 “매미”의 순간최대풍속은 60 m/s(시속 216 km/h, 제주도 고산)으로 한국 기상관측사상 각각 일최다강수량과 순간최대풍속을 기록하였다. 이들 “루사”와 “매미” 등 대형 태풍이 제2연화광산 광미적치장이 위치해 있는 지역을 통과해 계곡에 설치되어 있었던 2개의 광미적치장 중 콘크리트 댐으로 건설된 “뽕골” 광미적치장 하부에서 대량의 광미 유출 사고가 발생하였고 “뽕골” 광미적치장 하부에 설치된 폐광석적치장에 있던 폐석의 대부분이 유실된 사고가 발생하였다. 이로 인하여 막대한 양의 광미 및 폐광석이 가곡천에 유입되어 가곡천뿐만 아니라 가곡천이 유입되는 동해 해안지역까지 광범위한 지역에 환경오염 사고가 발생하였다. 한편 같은 지역에 있는 제2연화광산의 “직내골” 광미적치장은 붕괴되지 않았으나 막대한 강우유출수의 영향으로 광미적치장 하부에 설치된 배수로(하수관)의 일부가 훼손되어 태풍발생 이후 침출수가 유출되고 있는 실정이다. 이 침출수의 영향으로 계곡에 흐르는 지표수의 수질이 악화되고 하천 바닥에는 산화철 광물이 피복되고 있어 환경오염 확산문제가 꾸준히 제기되어 오고 있는 실정이었다.

이번 연구는 2002년 태풍 “루사”와 2003년 태풍 “매미” 등 대형 태풍의 영향으로 인해 지속적으로 침출수가 발생되고 있는 제2연화광산의 “직내골” 광미적치장과 집수구역의 하천수계를 대상으로 오염거리 및 시기별 Zn, Cd, Cu, Pb 및 As 등 미량원소의 오염 확산을 평가하고자 수행하였다. 이를 위하여 오염원인 제2연화광산의 “직내골” 광미적치장의 광미시료와 이로부터 지속적으로 연중

유출되는 침출수, 저류조수 및 광산수계 지표수를 채취하였다. 특히 기존에 설치된 저류조의 수질에 대한 장기적인 건기 및 우기의 수질 모니터링 자료는 저류조의 수질 정화 효과를 평가하는데 활용될 것이다. 한편 침출수가 유입되는 집수구역 내 지표수의 미량원소에 대한 수질변화를 시기 및 공간적으로 관찰하여 미량원소의 오염범위를 파악하고 유해한 미량원소를 제거하는 주요 요인과 기작을 규명하고자 하였다.

2. 제2연화광산 지질 및 광상

제2연화광산은 행정구역상으로 강원도 삼척군 원덕읍 풍곡리에 위치한다. 광산 부근의 지질은 함백향사의 동단부에 속하고 선캠브리아기의 화강편마암을 기반으로 그 상부에 캠브리아기-오르도비스기의 양덕통 장산규암층과 묘봉슬레이트층, 대석회암통의 풍촌석회암층, 화절층, 동점규암층 및 두무동층 등이 분포되며 이들을 관입한 화강반암 및 석영반암으로 구성된다. 지질구조는 EW 방향의 향사축을 갖는 함백향사가 NS계의 역단층에 의해 서측이 상승하고 동측이 하강한 단층의 동측부에 해당한다(대한광업진흥공사, 1981).

광상은 NS 역단층과 NW 습곡축에 따른 단층을 따라 화성암이 관입하여 주변 석회암을 교대하여 형성된 전형적인 스키른형 광상이다. 광체는 모두 12개 이상으로 모암 및 화성암의 관계에 따라 하반광체군(월곡하반광체), 상반광체군(월곡상반광체) 및 선곡광체로 크게 3개 그룹으로 구분된다(한갑수, 1972). NW습곡축에 따른 단층을 중심으로 서쪽은 월곡구, 동쪽은 선곡구로 구분되고 월곡광체는 화강반암과의 접촉부에 발달되는 광체이며 선곡광체는 화강반암의 관입방향 및 풍촌석회암층, 묘봉층의 석회암 주변부에 발달되는 광체이다(대한광업진흥공사, 1981).

광석광물은 섬아연석, 방연석, 황동석 및 자류철석 등이다. 제2연화광산은 1961년 (주)영풍광업이 1969년 개발을 착수한 뒤 월 50,000 톤 규모로 개발하였고 1983년까지 5,349,000 톤을 처리하여 499,364 톤의 정광(연 18,007 톤, 아연 476,208 톤, 동 5,149 톤)을 생산하였다.

3. 시료채취 및 분석

3.1. 침출수 및 하천수계 지표수의 시료 채취

제2연화광산의 “직내골” 광미적치장으로부터 유출되는 침출수의 영향을 직접적으로 받는 하천수계의 공간적 및

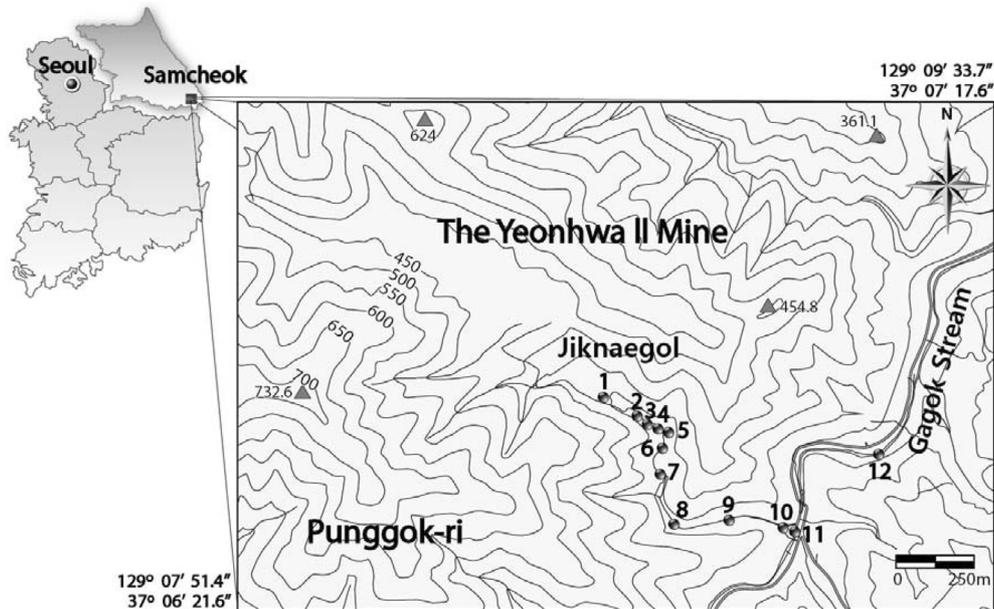


Fig. 1. Location map showing the studied area in relation to the Yeonhwa II Mine district. Numbers indicate waster sample sites.

시간적인 수질변화를 관찰하기 위하여 침출수(YH 1), 침출수가 유입된 지표수의 수질을 정화하기 위하여 설치된 저류조(retention pond)의 물시료(YH2, YH3, YH6, YH7), 광산 수계의 지표수(YH4, YH8, YH9, YH10), 오염되지 않은 지류(drainage : YH5, tributary : YH 11) 및 가곡천에 합류되어 희석으로 인하여 수질이 급격하게 회복되는 하류(downstream : YH12)로 구분하여 시료를 채취하였다(Fig. 1). 이들 시료채취 위치를 대상으로 2005년 7월부터 2007년 8월까지 건기(2006년 6월; 2006년 11월; 2007년 2월)와 우기(2005년 7월, 8월; 2006년 4월, 8월 2차례; 2007년 5월, 7월, 8월)로 구분하여 11회 채취하였다. 물시료는 0.45 μm 의 멤브레인 필터로 여과한 후 폴리에틸렌병에 보관하였고 양이온 측정을 위해 바로 초순수 질산을 가해 pH 2 이하로 처리하여 산화, 흡착 및 침전을 방지하였으며 질산을 가하지 않은 음이온시료와 함께 분석 전까지 냉장 보관하였다. 그리고 음이온 중 중탄산이온(HCO_3^-) 함량은 현장에서 pH 종말점을 4.3으로 하는 적정법을 이용하여 측정하였다. 수소이온농도(pH), 온도, 산화환원전위(Eh) 및 전기전도도(EC) 등은 시료채취 시 현장에서 측정하였다. pH는 Orion사의 측정기이고 원충용액(pH = 4, 7, 10)으로 보정하여 사용하였다. DO, EC 및 Eh는 TOA사의 측정기를 이용하였다.

3.2. 광미 및 하천 수계에 침전된 침전물 시료 채취

제2연화광산의 “직내골” 광미적치장에 적치된 광미에

포함된 Zn, Cd, Cu, Pb 및 As 등 미량원소의 전함량을 분석하기 위하여 2007년 8월에 3개 지점에서 시추를 실시하여 6개의 시료를 채취하였다. 시추코어를 관찰한 결과, 수직적으로 광미적치장 지표로부터 약 수십 cm에서 최대 2-3 m 깊이로 산화대가 형성되어 있다. 산화대 하부에는 산화되지 않은 광미가 신선한 상태로 관찰되어 광미가 적치된 이후 지금까지 산화된 심도는 최대 2-3 m 정도인 것으로 확인되었다. “직내골” 광미적치장의 산화대 하부에서 산화작용을 받지 않아 풍화되지 않은 신선한 상태를 유지하고 있는 광미를 대상으로 시료를 채취하였다. 제2연화광산의 “직내골” 광미적치장으로부터 유출되는 침출수의 영향으로 집수구역 내 하천 바닥에는 노란색의 2차광물이 침전되어 있었으며 이들 2차 광물을 침출수가 배출되는 지점(YH2-1), 첫 번째 침전조 벽면(YH2-2), 두 번째 침전조 벽면(YH2-3) 및 두 번째 침전조 이후 광산 수계(YH2-4) 등 4개 지점에서 채취하였다.

화학실험용 광미는 각각 2 mm 이하로 체질하여 여과한 뒤 광미시료는 풍건하였고 2차광물시료는 냉동건조하였다. 건조된 시료를 1/4법으로 축분하여 -100 mesh(< 150 μm) 이하의 입도로 미분쇄하였다.

3.3. X-선회절분석

하천 수계에서 채취한 침전물의 광물학적 조성을 규명하기 위해 X-선 회절분석(Rigaku model D/Max-2200)을 실시하였다. X-선 회절분석은 CoK α 를 사용하여 40 kV/30

mA의 가속전압 및 전류 조건과 5-80°의 20 범위에서 0.04%/sec 간격의 연속적 주사방식(continuous-scan)으로 실시하였다.

3.4. 화학분석

광미 및 침전물에 함유된 미량원소의 전함량 분석은 국제표준기구(International Organization for Standardization)에서 제안한 왕수(aqua regia: ISO 11466)법을 따라 분석하였다(International Organization for Standardization, 1995). 화학분석용 시료 3 g에 염산(37% HCl)과 질산(70% HNO₃)을 3:1로 혼합한 왕수 28 ml를 섞은 후 실온에서 16시간 동안 반응시킨다. 이후 130°C에서 2시간 동안 용해시킨 뒤, 0.45 µm 필터로 여과하고 0.5 mol/l 질산용액으로 희석하였다.

광미 및 침전물의 전처리시료와 물시료에 대한 미량원소 분석은 ICP-AES(Perkins-Elmer Optima 3000XL)를 이용하였으며, 분석조건은 RF Power 1300 W, Plasma Flow 15 l/min, Coolant Flow 0.5 l/min, Nebulizer Flow 0.8 l/min이었다. 사용된 시약은 analytical grade(Merck)였고, ICP 분석시 사용된 표준용액은 1,000 ppm stock solution(Merck)을 희석하여 사용하였다. 물시료의 음이온(Cl⁻, NO₃⁻ 및 SO₄²⁻)는 IC(Model Dionex 120)을 이용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 광미시료의 미량원소 함량

제2연화광산의 “직내골” 광미적치장에서 수행한 3개의 시추코아로부터 채취한 6개의 풍화되지 않은 신선한 광미시료를 대상으로 분석된 미량원소 함량을 Table 1에 정리하였다. 미량원소 중 함량이 가장 높은 금속 원소는 Zn으로 5,307-13,854 mg/kg(평균 8,560 mg/kg)이었다. 이외 함량이 높은 순서는 Pb 407-805 mg/kg(평균 567 mg/kg), As 287-568 mg/kg(평균 450 mg/kg), Cu 175-286 mg/kg(평균 217 mg/kg) 및 Cd n.d.-47 mg/kg(평균 14 mg/kg)이었다. 또한 Fe와 Mn 함량은 각각 114,709-154,830 mg/kg(평균 133,409 mg/kg)와 11,708-13,917 mg/kg(평균 13,064 mg/kg)이었다(Table 1). 한편 각 미량원소의 변동계수(coefficient of variation; CV) 값을 보면 Cd 함량만을 제외하고 다른 미량원소 함량은 시료채취 위치에 관계없이 함량의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

4.2. 건기 및 우기에 따른 침출수 및 지표수의 수질 특성 비교

2005년 7월부터 2007년 8월까지 2년 2개월 동안 수계를 따라 12개 지점에서 채취한 침출수, 저류조 시료(pond

Table 1. Mean and range of trace elements in the precipitates and tailings samples of the Yeonhwa II mine

Sample	Ca	Fe	Al	Mn	Zn	As	Pb	Cu	Cd
YH2-1	8,508	459,719	5,962	2,905	1,863	3,363	160	54	64
YH2-2	12,403	406,180	12,434	21,090	2,234	894	0	52	0
YH2-3	14,489	365,991	9,302	69,642	2,239	825	0	63	0
YH2-4	19,952	317,696	7,555	146,924	2,617	1,152	0	55	0
Precipitates mean	13,838	387,397	8,813	60,140	2,238	1,559	40	56	16
min	8,508	317,696	5,962	2,905	1,863	825	0	52	0
max	19,952	459,719	12,434	146,924	2,617	3,363	160	63	64
Stdev	4,770	60,276	2,772	64,349	308	1,211	80	5	32
CV	0.34	0.16	0.31	1.07	0.14	0.78	2.00	0.09	2.00
YHT-0-1	46,573	149,345	9,874	13,455	12,840	307	763	272	39.9
YHT-0-2	44,110	154,830	9,842	13,917	13,854	287	805	286	46.8
YHT-1-1	41,929	129,114	7,344	12,981	5,464	561	407	191	0.0
YHT-1-2	49,399	133,773	8,802	13,876	5,307	568	425	187	0.0
YHT-2-1	43,010	114,709	6,696	11,708	6,899	492	508	193	0.0
Tailings YHT-2-2	52,238	118,685	9,214	12,448	6,996	484	493	175	0.0
mean	46,210	133,409	8,629	13,064	8,560	450	567	217	14.4
min	41,929	114,709	6,696	11,708	5,307	287	407	175	0.0
max	52,238	154,830	9,874	13,917	13,854	568	805	286	46.8
stdev	3,991	16,111	1,325	868	3,787	123	173	48	22.5
CV	0.09	0.12	0.15	0.07	0.44	0.27	0.31	0.22	1.56

Max: Maximum, Min: Minimum, Stdev: Standard deviation, CV: Coefficient Variation (%)

water) 및 지표수 등에 대한 pH, 전기전도도, 산화환원전위, 음이온 및 양이온 함량을 Table 2에 건기와 우기로 구분하여 정리하였다.

제2연화광산 “직내골” 광미적치장으로부터 흘러나오는 침출수(YH01)의 pH는 건기와 우기에 각각 5.9-6.4(평균 6.2 ± 0.3)와 6.1-6.8(평균 6.5 ± 0.2)이었고 Eh는 각각 -94~130 mV(평균 4 ± 114 mV)와 -89~155 mV(평균 26 ± 68 mV)로 우기에 침출수의 pH가 약간 상승하였다. 건기와 우기의 SO_4^{2-} 함량은 각각 평균 603 ± 37 mg/L(560~627 mg/L)와 평균 $1,356 \pm 1,225$ mg/L(552~3,496 mg/L)로 우기에 황산염(SO_4^{2-})의 함량이 약 2배 이상 증가하는 것으로

나타났다(Table 2). HCO_3^- 의 함량도 건기보다 우기에 약간 증가하였으나 함량의 변화는 크지 않는 것으로 나타났다. 침출수에 용해된 Ca, Mg, Na, K 및 Si의 함량은 건기보다 우기에 약간 증가하였다(Table 2). 미량원소 중에서 침출수에 용해된 용존함량이 가장 높은 원소는 Fe로 건기 및 우기의 평균 함량이 각각 평균 0.78 ± 0.31 mg/L($0.42 \sim 0.98$ mg/L)와 평균 52 ± 86 mg/L($0.2 \sim 257$ mg/L)로 우기에 약 66배 증가하였다(Table 2). 이외 건기 및 우기의 Mn 함량은 각각 평균 4.43 ± 3.12 mg/L($1.4 \sim 7.62$ mg/L)와 평균 25 ± 35 mg/L($2.45 \sim 108$ mg/L), Zn 함량은 각각 평균 0.34 ± 0.11 mg/L($0.25 \sim 0.46$ mg/L)와 평균 $1.9 \pm$

Table 2. Mean and range of physicochemical parameters, major anions, and trace elements for dry and wet seasonal water samples in the Yeonhwa II mine area (from July 2005 to August 2007)

	Field parameters				Major anions (mg/L)				Major cations (mg/L)					Trace elements (mg/L)									
	T (°C)	pH	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	ORP (mV)	HCO_3^-	Cl	NO_3^-	SO_4^{2-}	Ca	Mg	Na	K	Si	Fe	Mn	Al	Zn	Cd	Cu	Pb	As		
Leachate	Mean	14.3	6.2	1126	4	45	2.79	4.46	603	184	28	10	3.53	16	0.78	4.43	0.42	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Min	13.9	5.9	1009	-94	38	2.41	1.43	560	133	25	8	2.96	15	0.42	1.40	0.20	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Max	14.8	6.4	1303	130	54	3.40	7.46	627	210	33	14	4.07	16	0.98	7.62	0.55	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Stdev	0.5	0.3	156	114	8	0.54	3.02	37	44	4.16	3.43	0.55	0.65	0.31	3.12	0.19	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	
	CV	0.03	0.04	0.14	26.42	0.19	0.19	0.68	0.06	0.24	0.15	0.34	0.16	0.04	0.40	0.70	0.45	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Mean	14.7	6.5	1615	26	50	2.58	0.88	1356	326	46	14	4.37	17	52	25	1.66	1.90	0.01	0.00	0.00	0.00	
	Min	12.1	6.1	1170	-89	19	2.14	0.39	552	226	27	6.95	2.96	13	0.20	2.45	0.10	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Max	16.2	6.8	2240	155	72	2.96	1.40	3496	486	62	22	6.28	20	257	108	8.34	10.21	0.03	0.02	0.02	0.02	
	Stdev	1.5	0.2	333	68	19	0.35	0.40	1225	74	13	4.21	0.95	2.58	86	35	2.72	3.39	0.01	0.01	0.01	0.01	
	CV	0.10	0.03	0.21	2.68	0.39	0.13	0.46	0.90	0.23	0.27	0.29	0.22	0.16	1.65	1.40	1.64	1.78	2.31	2.83	2.83	2.83	
Pond	Mean	13.4	7.2	1239	-110	72	2.51	2.60	703	249	37	16	3.97	12	1.55	6.26	0.06	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Min	8.0	6.4	440	-244	45	1.84	0.00	194	83	14	7	1.72	6.23	0.00	1.57	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Max	22.2	8.0	1790	52	89	3.62	7.58	1150	417	59	24	7.49	17	6.26	13	0.30	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Stdev	5.1	0.5	472	96	14	0.49	2.46	328	118	15	5.73	1.77	3.74	2.09	4.31	0.09	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	
	CV	0.38	0.07	0.38	-0.88	0.19	0.20	0.94	0.47	0.47	0.41	0.36	0.45	0.32	1.34	0.69	1.44	0.56	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Mean	16.0	7.2	940	-28	46	2.35	2.52	579	190	28	10	3.15	12	7.79	9.17	0.39	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Min	9.0	6.0	67	-244	6	1.50	0.96	68	26	3.69	2.43	0.92	4.47	0.00	0.46	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Max	21.2	8.6	1789	118	89	3.42	8.31	1752	377	77	24	7.01	25	81	51	4.38	6.64	0.02	0.00	0.02	0.00	
	Stdev	2.8	0.6	596	86	27	0.70	2.19	521	129	21	6.52	1.83	5.58	18	11	0.99	1.58	0.01	0.00	0.00	0.00	
	CV	0.18	0.08	0.63	-3.08	0.60	0.30	0.87	0.90	0.68	0.75	0.63	0.58	0.48	2.32	1.25	2.55	1.86	2.98	0.00	0.00	0.00	
Drainage	Mean	10.1	7.7	389	-126	64	2.19	3.11	151	72	11	5.72	1.41	5.46	0.10	0.93	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Min	7.7	7.7	211	-208	43	1.76	2.45	63	32	7.10	4.63	1.23	4.30	0.00	0.14	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Max	14.2	7.9	494	16	81	2.51	4.01	206	101	14	7.10	1.69	7.13	0.30	2.09	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Stdev	3.57	0.16	155	123	19	0.39	0.81	77	35	3.67	1.26	0.25	1.48	0.17	1.03	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	
	CV	0.35	0.02	0.40	-0.98	0.30	0.18	0.26	0.51	0.49	0.34	0.22	0.17	0.27	1.73	1.11	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Mean	15.2	7.6	204	17	41	1.97	3.85	67	33	4.71	3.02	0.96	4.97	0.11	0.36	0.04	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Min	8.1	7.2	101	-164	20	1.30	2.05	27	14	1.91	1.83	0.66	3.83	0.01	0.12	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Max	18.9	8.2	437	82	75	3.35	9.15	192	74	9.96	5.20	1.40	7.13	0.24	0.56	0.11	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Stdev	3.6	0.3	121	79	20	0.83	2.99	71	22	3.25	1.12	0.30	1.03	0.08	0.15	0.05	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	
	CV	0.24	0.05	0.59	4.58	0.48	0.42	0.78	1.05	0.68	0.69	0.37	0.31	0.21	0.77	0.41	1.14	0.79	0.00	0.00	0.00	0.00	

CV: Coefficient Variation (%), Max: Maximum, Min: Minimum, Stdev: Standard deviation

Table 2. continued

		Field parameters				Major anions (mg/L)				Major cations (mg/L)					Trace elements (mg/L)							
		T (°C)	pH	EC (µs/cm)	ORP (mV)	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	Ca	Mg	Na	K	Si	Fe	Mn	Al	Zn	Cd	Cu	Pb	As
Creek	Mean	12.7	7.7	1003	-3	62	2.51	1.89	561	204	28	13	3.11	9.50	0.28	3.16	0.01	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
	Min	5.5	7.1	396	-274	42	2.21	0.00	168	70	11	5.76	1.47	5.85	0.00	0.28	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
	Dry Max	24.9	8.0	1782	151	78	3.05	3.22	1121	412	58	21	9.10	15	2.94	11	0.10	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
	Stdev	7.4	0.3	457	149	13	0.22	1.05	332	103	13	4.96	2.08	3.16	0.84	3.55	0.03	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
	CV	0.58	0.04	0.46	-52.72	0.20	0.09	0.55	0.59	0.50	0.47	0.39	0.67	0.33	3.05	1.12	3.00	0.74	0.00	0.00	0.00	0.00
	Wet Mean	16.7	7.6	668	-18	40	2.32	3.44	375	133	19	7.68	2.43	8.99	3.32	5.16	0.15	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00
	Min	9.2	6.3	65	-312	4	0.97	0.70	66	25	3.36	2.41	0.86	4.50	0.00	0.20	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
	Wet Max	21.0	8.2	1753	161	87	3.54	12	1758	371	67	24	9.23	22	66	44	3.34	5.87	0.02	0.00	0.00	0.00
	Stdev	3.3	0.4	531	115	24	0.79	3.08	446	116	17	5.60	1.85	4.49	12	8.55	0.58	1.07	0.00	0.00	0.00	0.00
	CV	0.20	0.06	0.79	-6.45	0.60	0.34	0.90	1.19	0.88	0.90	0.73	0.76	0.50	3.56	1.66	3.94	2.36	4.36	0.00	0.00	0.00
Tributary	Mean	12.4	7.8	290	110	88	2.15	3.73	70	62	4.34	3.68	1.33	4.09	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00
	Min	6.3	7.6	231	68	75	1.76	2.66	49	42	3.02	2.48	1.08	3.35	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
	Dry Max	23.8	8.0	321	134	102	2.65	4.39	82	85	6.55	5.88	1.65	5.15	0.00	0.00	0.00	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00
	Stdev	9.9	0.2	51	36	14	0.46	0.94	18	21	1.93	1.90	0.29	0.95	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
	CV	0.79	0.03	0.18	0.33	0.16	0.21	0.25	0.26	0.34	0.44	0.52	0.22	0.23	0.00	0.00	0.00	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00
	Wet Mean	18.5	8.0	245	18	77	2.01	3.60	60	45	3.65	2.68	1.27	4.28	0.01	0.05	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
	Min	9.3	7.5	183	-99	45	1.29	1.70	27	32	2.19	1.86	0.85	3.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
	Wet Max	22.0	8.3	366	197	100	3.19	8.60	123	70	8.54	3.61	2.22	7.47	0.07	0.27	0.00	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00
	Stdev	4.7	0.3	62	109	17	0.82	2.96	39	13	2.14	0.62	0.46	1.35	0.03	0.09	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
	CV	0.25	0.04	0.25	6.04	0.22	0.41	0.82	0.65	0.29	0.59	0.23	0.36	0.32	2.02	1.87	0.00	0.75	2.83	0.00	0.00	0.00
Down Stream	Mean	12.6	7.7	330	130	85	2.36	3.44	96	67	6.97	5.15	1.69	5.07	0.00	0.02	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00
	Min	6.7	7.3	245	96	73	1.88	2.24	58	44	4.69	3.24	1.48	3.91	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
	Dry Max	23.8	8.2	382	164	100	3.09	4.30	125	92	10.72	7.72	1.99	6.11	0.00	0.05	0.00	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00
	Stdev	9.7	0.4	74	34	13	0.64	1.07	35	24	3.27	2.31	0.27	1.10	0.00	0.02	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
	CV	0.77	0.06	0.22	0.26	0.16	0.27	0.31	0.36	0.36	0.47	0.45	0.16	0.22	0.00	1.20	0.00	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00
	Wet Mean	18.2	8.0	251	64	71	1.96	3.69	73	46	4.23	2.80	1.34	4.44	0.03	0.12	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
	Min	9.6	7.4	165	-79	42	1.45	1.80	36	30	2.27	1.92	0.84	3.18	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
	Wet Max	21.8	8.8	421	135	97	2.91	8.27	165	80	8.58	4.06	2.38	7.71	0.07	0.55	0.04	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00
	Stdev	4.5	0.4	84	73	17	0.59	2.68	53	18	2.15	0.71	0.52	1.39	0.03	0.18	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
	CV	0.25	0.05	0.33	1.13	0.24	0.30	0.73	0.72	0.38	0.51	0.25	0.39	0.31	1.31	1.47	0.00	0.77	2.83	0.00	0.00	0.00

3.39 mg/L(0.15-10 mg/L), Al 함량은 각각 평균 0.42 ± 0.19 mg/L (0.2-0.55 mg/L)와 1.66 ± 2.72 mg/L(0.1-8.34 mg/L)로 평균함량은 건기보다 우기에 Mn 5.6배, Zn 5.5 배, Al 3.9배 증가하였다(Table 2). 그러나 As, Pb, Cd 및 Cu의 원소들은 대부분 검출한계 이하이거나 간혹 매우 낮은 함량만이 검출되어 이들 원소들에 의한 수질오염 문제는 건기와 우기 모두 없는 것으로 확인되었다(Table 2). 각 미량원소의 변동계수(CV) 값에 따르면 건기에 측정된 침출수의 현장 수질자료, 음이온 및 양이온 함량은 시료채취 시기에 따른 변화가 크지 않은 것으로 나타났으나 우기에는 매우 큰 것으로 나타났다. 특히 Eh, SO₄²⁻ 및 Fe, Mn, Al, Zn의 함량은 시료채취 시기에 따라 함

량의 차이가 매우 큰 것으로 나타났다(Table 2). 건기보다 우기에 SO₄²⁻ 및 Fe, Mn, Al, Zn의 함량이 크게 증가하는 것은 광미적치장 하부 배수로(하수관)가 훼손되어 광미적치장 내부에서 스며든 빗물 혹은 지표수의 양이 증가되어 광미-물과의 반응성이 높아지고 이에 따른 황화광물의 용해반응에 기인되는 것으로 해석된다.

침출수의 수질을 조절하기 위해 설치되어 있는 저류조(pond)에 대한 수질자료를 정리한 결과, 건기와 우기에 측정된 pH의 변화는 크지 않았고 전기전도도 값은 건기에 비교하여 우기에 다소 낮은 값을 보이고 있다(Table 2). SO₄²⁻와 HCO₃⁻의 함량은 건기와 우기에 각각 평균 703 ± 328 mg/L(194-1,150 mg/L)와 평균 579 ± 521 mg/L(68-

1,820 mg/L) 및 각각 평균 72 ± 14 mg/L와 평균 46 ± 27 mg/L로 우기에 다소 감소하는 것으로 나타났다(Table 2). Ca, Mg, Na, K 및 Si의 함량은 우기에 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 우기에 저류조에 유입되는 지표수의 양이 증가하여 희석된 것에 기인한 것으로 판단된다. 이와 반대로 Fe의 건기와 우기의 평균 함량은 각각 1.55 ± 2.09 mg/L(0.00-6.26 mg/L)와 평균 7.79 ± 18 mg/L(0.00-81 mg/L), Mn 함량은 건기와 우기에 각각 평균 6.26 ± 4.31 mg/L(1.57-13 mg/L) 및 평균 9.17 ± 11 mg/L(0.46-51 mg/L), Zn 함량은 건기와 우기에 각각 평균 0.14 ± 0.08 mg/L (0.03-0.29 mg/L)와 평균 0.85 ± 1.58 mg/L(0.03-6.64 mg/L) 및 Al 함량은 건기와 우기에 각각 평균 0.06 ± 0.09 mg/L (0.00-0.31)와 평균 0.39 ± 0.99 mg/L (0.00-4.38 mg/L)로 검출된 함량이 건기에 비하여 우기에 약 Fe 5배, Mn 1.5배, Zn 6배 및 Al 6배 증가하였다(Table 2). 이러한 결과는 Ca, Mg, Na, K 및 Si의 주요양이온과는 달리 Fe, Mn, Al 및 Zn의 함량은 지표수 유입량의 증가에 따른 희석작용에 의해서도 함량이 크게 낮아지지 않음을 지시한다. 한편 저류조와 침출수의 수질 자료를 비교하여 보면 HCO_3^- 와 Ca, Mg, Na, Fe, Mn의 각각 함량은 저류조를 통과하면서 건기에 증가하는 반면에 우기에는 감소하는 것으로 나타났다. 또한 저류조에서 검출된 Si, Al 및 Zn 함량은 침출수보다 건기와 우기에 모두 26-85% 감소하였다. 이러한 결과는 우기에 음이온 및 양이온의 함량이 크게 증가한 침출수가 저류조를 통과하면서 수질이 개선되고 있음을 지시한다.

제2연화광산의 "직내골" 광미적치장이 위치한 계곡의 지표수의 수질을 건기와 우기로 구분한 결과, pH는 각각 평균 7.7과 7.6으로 유사한 값을 보이고 있다. HCO_3^- 함량은 건기에 42-78 mg/L(평균 62 ± 13 mg/L)이고 우기에 4-87 mg/L(평균 40 ± 24 mg/L)이며 SO_4^{2-} 함량은 건기에 168-1,121 mg/L(평균 561 ± 332 mg/L)이고 우기에 66-1,758 mg/L(평균 375 ± 446 mg/L)으로 우기에 약간 감소하는 것으로 나타났다(Table 2). 또한 Ca, Mg, Na, K 및 Si 함량도 우기에 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 Fe의 건기 및 우기의 평균 함량은 각각 0.28 ± 0.84 mg/L와 3.32 ± 11.83 mg/L, Mn 함량은 각각 평균 3.16 ± 3.55 mg/L와 5.16 ± 8.55 mg/L, Zn 함량은 각각 평균 0.08 ± 0.06 mg/L와 0.45 ± 1.07 mg/L, Al 함량은 각각 평균 0.01 ± 0.03 mg/L와 0.15 ± 0.58 mg/L으로 우기에 Fe 11배, Mn 1.6배, Zn 5.6배, Al 15배 증가하였다(Table 2). 광산수계 지표수의 SO_4^{2-} 과 HCO_3^- 함량 및 Ca, Mg, Na, Si, Fe, Mn, Al 및 Zn 함량은 저류조의 함량보다 건기

와 우기에 모두 감소하였다. 특히 지표수의 SO_4^{2-} , Ca, Mg, Na, K, Si 등의 평균함량은 건기 및 우기 모두 저류조 함량의 약 0.5-0.8배로 약 20-50%가 감소하였다. 그 외 다른 미량원소의 경우, 저류조의 함량에 비해서 각각 Fe 80%(건기)-60%(우기), Mn 50%(건기)-40%(우기), Al 80%(건기)-60%(우기) 및 Zn 40%(건기)-50%(우기) 감소하였다(Table 2). 이러한 결과는 첫째, 우기에 침출수와 저류조의 음이온 및 양이온의 함량이 크게 증가되었지만 저류조를 통과한 후 오염되지 않은 지류의 지표수와 합류되면서 희석작용에 의해 Fe, Mn, Al 및 Zn의 함량이 급격하게 낮아졌고 둘째로 Fe, Mn, Al 및 Zn 원소가 SO_4^{2-} , Ca, Mg, Na, K 및 Si 보다 상대적으로 제거효율이 높은 것은 희석작용에 의한 감소뿐만 아니라 산화철(망간)광물의 침전 및 흡착반응에 의한 제거효율이 더 증가하였기 때문인 것으로 해석된다.

한편 광산배수(drainage)의 pH는 건기보다 우기에 다소 낮아졌고 오염되지 않은 지류(tributary)와 가곡천(downstream)의 pH는 건기보다 우기에 약간 증가하였다. 광산배수, 오염되지 않은 지류 및 가곡천의 HCO_3^- 함량은 건기와 우기 각각 평균 64 ± 19 mg/L와 평균 41 ± 20 mg/L, 평균 88 ± 14 mg/L와 평균 77 ± 17 mg/L 및 평균 85 ± 13 mg/L와 평균 71 ± 17 mg/L로 우기에 다소 감소하였다. SO_4^{2-} 함량은 각각 광산배수 건기 평균 151 ± 77 mg/L와 우기 평균 67 ± 71 mg/L, 오염되지 않은 지류 건기 평균 70 ± 18 mg/L와 우기 평균 60 ± 63 mg/L 및 가곡천 건기 평균 96 ± 35 mg/L와 우기 평균 73 ± 53 mg/L로 우기에 감소하는 것으로 나타났다. 또한 오염되지 않은 지류의 Si를 제외하고 Ca, Mg, Na, K 및 Si는 광산배수, 오염되지 않은 지류 및 가곡천 모두 우기에 감소하는 것으로 나타났다(Table 2). 광산배수의 Fe은 건기와 우기에 각각 평균 0.1 ± 0.17 mg/L와 평균 0.11 ± 0.08 mg/L이 검출되었고 Al은 건기에 검출되지 않았으나 우기에 평균 0.04 ± 0.05 mg/L로 미약하게 검출되었다. Mn은 건기와 우기 각각 평균 0.93 ± 1.03 mg/L와 평균 0.36 ± 0.15 mg/L이 검출되어 우기에 감소하는 경향을 보였다. 오염되지 않은 지류의 Fe와 Mn 함량은 건기에는 검출되지 않았으나 우기에 각각 평균 0.01 ± 0.03 mg/L와 평균 0.05 ± 0.09 mg/L이 검출되어 우기에 미약하게 증가하는 것으로 나타났고 Al은 건기와 우기 모두 검출되지 않았다(Table 2). 가곡천의 경우, Fe와 Mn은 건기에 각각 불검출과 평균 0.02 ± 0.02 mg/L, 우기에 각각 평균 0.03 ± 0.03 mg/L와 평균 0.12 ± 0.18 mg/L로 우기에 미약하게 증가하였다. Al은 건기와 우기 모두 검출되지 않았다(Table 2). Zn의 평균 함

량은 광산배수의 경우, 건기 평균 0.06 ± 0.08 mg/L와 우기 평균 0.08 ± 0.07 mg/L로 우기에 미약하게 증가한 반면에 오염되지 않은 지류와 가곡천은 건기에 각각 평균 0.17 ± 0.09 mg/L와 평균 0.14 ± 0.07 mg/L, 우기에 각각 평균 0.09 ± 0.07 mg/L와 평균 0.08 ± 0.06 mg/L로 우기에 감소하였다(Table 2).

4.3. 국내 수질기준과의 비교

제2연화광산 “직내골” 광미적지장에서 유출된 침출수와 이로 인하여 오염된 지표수의 수질을 “하천수 수질기준” 중 “사람의 건강보호기준”, “먹는물수질기준” 및 “오염물질배출허용기준 중 청정지역”과 비교하여 침출수 및 오염

된 지표수에 대한 중금속 등 미량원소의 오염도를 판단하였다(Table 3).

오염물질배출허용기준(청정지역)과 비교한 결과, 침출수의 Zn 함량은 건기에 채취된 모든 시료에서 기준을 초과하지 않았고 우기에 채취된 시료들은 기준을 초과하였다. 그러나 우기에 채취된 모든 침출수의 Zn 함량은 2개의 지류조를 거치면서 함량이 낮아지다가 첫 번째 지류와 합류 이후에는 기준 이하로 감소하였다(Table 3). Cd, Pb, Cu 및 As 함량은 오염물질배출허용기준을 초과하지 않았다. 하천수 수질기준(사람의 건강보호기준)과 비교하면 오직 우기에 채취된 일부 침출수의 Cd 함량이 기준을 초과하였고 As와 Pb 함량은 건기와 우기에 채취된 모든 시료

Table 3. Mean and range of physicochemical parameters, major anions, and trace elements for water samples in the Yeonhwa II mine area (from July 2005 to August 2007)

Sample	Field parameters				Major anions (mg/L)				Major cations (mg/L)					Trace elements (mg/L)								
	T (°C)	pH	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	ORP (mV)	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	Ca	Mg	Na	K	Si	Fe	Mn	Al	Zn	Cd	Pb	Cu	As	
YH 01 (leachate)	Mean	14.6	6.4	1482	20	48.51	2.66	2.22	1074	287	41.31	13.28	4.14	16.30	38.08	19.31	1.32	1.48	0.004	0.00	0.00	0.00
	Min	12.1	5.9	1009	-94	19.03	2.14	0.39	552	133	24.77	6.95	2.96	12.81	0.20	1.40	0.10	0.15	0.000	0.00	0.00	0.00
	Max	16.2	6.8	2240	155	71.74	3.40	7.46	3496	486	61.68	21.78	6.28	19.82	256.69	107.64	8.34	10.21	0.034	0.02	0.02	0.02
	Stdev	1.3	0.3	367	77	16.69	0.40	2.48	1005	93	13.78	4.35	0.92	2.21	75.64	30.68	2.35	2.93	0.010	0.00	0.00	0.00
	CV	0.09	0.04	0.25	3.93	0.34	0.15	1.11	0.94	0.32	0.33	0.33	0.22	0.14	1.99	1.59	1.78	1.98	2.73	0.00	0.00	0.00
YH 02 (pond)	Mean	15.4	6.6	1502	-38	61.22	2.67	2.11	973	317	45.17	16.89	4.62	16.15	13.00	15.15	0.66	1.19	0.003	0.00	0.00	0.00
	Min	11.6	6.0	904	-169	7.32	1.80	0.52	503	167	20.23	8.61	2.74	11.93	1.31	6.20	0.03	0.09	0.000	0.00	0.00	0.00
	Max	18.3	7.3	1790	80	89.30	3.62	7.58	1634	415	70.57	24.50	7.01	23.30	81.30	50.70	4.38	6.64	0.020	0.00	0.00	0.00
	Stdev	2.4	0.4	260	82	31.81	0.71	2.27	346	71	13.85	5.11	1.07	3.03	23.21	12.65	1.26	1.94	0.006	0.00	0.00	0.00
	CV	0.15	0.06	0.17	-2.17	0.52	0.27	1.08	0.36	0.22	0.31	0.30	0.23	0.19	1.79	0.83	1.91	1.64	2.46	0.00	0.00	0.00
YH 03 (pond)	Mean	16.0	6.9	1502	-53	58.89	2.50	1.98	985	301	44.36	16.62	5.05	15.52	10.15	13.26	0.47	1.09	0.002	0.00	0.00	0.00
	Min	10.8	6.1	996	-213	5.86	1.80	0.79	507	167	20.01	8.49	2.62	11.78	0.33	5.42	0.00	0.07	0.000	0.00	0.00	0.00
	Max	21.2	7.5	1779	72	88.57	3.30	7.40	1752	417	77.49	23.62	7.49	24.86	67.19	43.97	3.75	6.28	0.019	0.00	0.00	0.00
	Stdev	3.6	0.4	228	94	30.88	0.61	2.21	383	77	15.86	4.75	1.41	3.54	19.30	10.83	1.10	1.84	0.006	0.00	0.00	0.00
	CV	0.22	0.06	0.15	-1.76	0.52	0.24	1.12	0.39	0.26	0.36	0.29	0.28	0.23	1.90	0.82	2.34	1.68	2.50	0.00	0.00	0.00
YH 04 (creek)	Mean	15.9	7.4	1479	-121	54.03	2.70	1.27	1015	307	42.84	15.90	5.14	14.90	9.13	13.50	0.36	1.00	0.002	0.00	0.00	0.00
	Min	10.2	6.3	866	-312	4.39	1.90	0.00	509	162	19.44	8.21	2.70	11.70	0.11	5.85	0.00	0.07	0.000	0.00	0.00	0.00
	Max	21.0	8.0	1782	47	87.11	3.54	4.32	1758	412	66.72	23.89	9.23	22.25	66.48	44.36	3.34	5.87	0.018	0.00	0.00	0.00
	Stdev	3.8	0.5	259	109	30.10	0.51	1.30	374	73	13.77	5.02	2.11	2.94	19.43	11.14	0.99	1.72	0.006	0.00	0.00	0.00
	CV	0.24	0.06	0.18	-0.90	0.56	0.19	1.03	0.37	0.24	0.32	0.32	0.41	0.20	2.13	0.82	2.76	1.72	2.50	0.00	0.00	0.00
YH 05 (drainage)	Mean	13.8	7.6	255	-22	47.31	2.05	3.57	99	43	6.35	3.75	1.08	5.10	0.11	0.51	0.03	0.08	0.000	0.00	0.00	0.00
	Min	7.7	7.2	101	-208	19.76	1.30	2.05	27	14	1.91	1.83	0.66	3.83	0.00	0.12	0.00	0.02	0.000	0.00	0.00	0.00
	Max	18.9	8.2	494	82	80.52	3.35	9.15	206	101	14.44	7.10	1.69	7.13	0.30	2.09	0.11	0.20	0.000	0.00	0.00	0.00
	Stdev	4.2	0.3	150	109	21.30	0.67	2.34	80	30	4.23	1.67	0.35	1.11	0.10	0.55	0.04	0.06	0.000	0.00	0.00	0.00
	CV	0.30	0.04	0.59	-5.01	0.45	0.33	0.65	0.81	0.70	0.67	0.45	0.32	0.22	0.99	1.06	1.46	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00
YH 06 (pond)	Mean	14.5	7.6	548	-73	46.32	2.25	2.90	273	107	15.86	7.01	1.90	7.42	0.72	2.76	0.03	0.18	0.000	0.00	0.00	0.00
	Min	8.5	7.0	69	-244	18.30	1.55	0.00	68	26	3.69	2.43	0.92	4.47	0.00	0.56	0.00	0.04	0.000	0.00	0.00	0.00
	Max	19.2	8.0	1119	80	76.13	3.33	8.31	555	252	35.47	14.06	3.15	11.12	4.97	5.19	0.12	0.66	0.000	0.00	0.00	0.00
	Stdev	4.0	0.3	384	105	22.17	0.60	2.53	205	81	11.96	4.50	0.94	2.42	1.44	1.60	0.05	0.17	0.000	0.00	0.00	0.00
	CV	0.27	0.04	0.70	-1.44	0.48	0.27	0.87	0.75	0.75	0.75	0.64	0.49	0.33	1.99	0.58	1.39	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00

Table 3. continued

Sample	Field parameters				Major anions (mg/L)				Major cations (mg/L)					Trace elements (mg/L)								
	T (°C)	pH	EC (µs/cm)	ORP (mV)	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	Ca	Mg	Na	K	Si	Fe	Mn	Al	Zn	Cd	Pb	Cu	As	
YH 07 (pond)	Mean	15.2	7.7	535	-38	45.12	2.21	3.21	272	100	15.42	6.87	1.92	7.34	0.49	2.34	0.03	0.17	0.000	0.00	0.00	0.00
	Min	8.0	7.0	67	-207	18.30	1.50	1.58	70	26	3.71	2.55	0.92	4.53	0.00	0.46	0.00	0.03	0.000	0.00	0.00	0.00
	Max	22.2	8.6	1085	118	74.66	3.13	7.96	566	238	33.37	13.43	3.18	11.31	3.42	4.26	0.11	0.59	0.000	0.00	0.02	0.00
	Stdev	4.9	0.5	377	108	21.53	0.58	2.20	207	74	11.27	4.23	0.95	2.34	1.01	1.30	0.04	0.16	0.000	0.00	0.01	0.00
	CV	0.32	0.06	0.70	-2.87	0.48	0.26	0.69	0.76	0.74	0.73	0.62	0.50	0.32	2.06	0.56	1.37	0.95	0.00	0.00	2.82	0.00
YH 08 (creek)	Mean	15.2	7.7	522	-11	44.92	2.28	3.03	261	102	15.19	6.87	1.78	7.23	0.32	1.95	0.03	0.15	0.000	0.00	0.00	0.00
	Min	7.0	6.9	66	-165	16.10	1.50	1.53	67	25	3.56	2.41	0.87	4.50	0.00	0.38	0.00	0.03	0.000	0.00	0.00	0.00
	Max	21.8	8.1	1059	161	81.25	3.45	7.92	530	249	34.96	14.21	2.95	11.53	1.94	4.29	0.10	0.54	0.000	0.00	0.00	0.00
	Stdev	5.1	0.3	373	116	23.15	0.66	2.12	202	78	11.42	4.25	0.82	2.38	0.59	1.16	0.04	0.15	0.000	0.00	0.00	0.00
	CV	0.33	0.04	0.71	-10.85	0.52	0.29	0.70	0.77	0.77	0.75	0.62	0.46	0.33	1.81	0.59	1.59	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00
YH 09 (creek)	Mean	15.4	7.7	515	31	43.15	2.29	4.02	256	99	14.64	6.71	1.78	7.31	0.29	1.71	0.03	0.14	0.000	0.00	0.00	0.00
	Min	6.4	7.0	65	-133	15.37	1.59	1.59	67	26	3.46	2.48	0.87	4.57	0.00	0.29	0.00	0.02	0.000	0.00	0.00	0.00
	Max	21.7	8.2	1031	147	72.47	3.39	11.90	521	230	32.15	13.36	2.95	11.44	1.74	4.38	0.11	0.54	0.000	0.00	0.00	0.00
	Stdev	5.4	0.4	363	106	20.51	0.61	3.76	199	74	10.91	4.13	0.84	2.30	0.53	1.10	0.04	0.15	0.000	0.00	0.00	0.00
	CV	0.35	0.05	0.71	3.41	0.48	0.27	0.94	0.78	0.74	0.75	0.62	0.47	0.31	1.85	0.65	1.45	1.09	0.00	0.00	0.00	0.00
YH 10 (creek)	Mean	15.9	7.7	521	46	42.12	2.30	3.07	248	100	14.43	6.64	1.76	7.08	0.23	1.29	0.03	0.12	0.000	0.00	0.00	0.00
	Min	5.5	7.2	178	-81	14.64	0.97	1.60	66	26	3.36	2.46	0.86	4.65	0.00	0.20	0.00	0.02	0.000	0.00	0.00	0.00
	Max	24.9	8.1	1000	153	72.47	3.39	7.68	497	248	34.91	14.61	2.78	11.23	1.01	4.16	0.10	0.51	0.000	0.00	0.00	0.00
	Stdev	6.2	0.3	322	102	20.30	0.77	2.10	185	77	10.84	3.99	0.78	2.30	0.35	1.11	0.04	0.14	0.000	0.00	0.00	0.00
	CV	0.39	0.04	0.62	2.24	0.48	0.33	0.68	0.75	0.76	0.75	0.60	0.44	0.32	1.52	0.86	1.33	1.14	0.00	0.00	0.00	0.00
YH 11 (tributary)	Mean	16.9	7.9	257	43	79.72	2.06	3.65	64	50	3.84	2.95	1.28	4.23	0.01	0.04	0.00	0.11	0.000	0.00	0.00	0.00
	Min	6.3	7.5	183	-99	45.38	1.29	1.70	27	32	2.19	1.86	0.85	3.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.000	0.00	0.00	0.00
	Max	23.8	8.3	366	197	102.48	3.19	8.60	123	85	8.54	5.88	2.22	7.47	0.07	0.27	0.00	0.26	0.003	0.00	0.00	0.00
	Stdev	6.5	0.3	61	102	16.23	0.67	2.29	31	17	2.02	1.10	0.41	1.21	0.02	0.08	0.00	0.08	0.000	0.00	0.00	0.00
	CV	0.39	0.03	0.24	2.38	0.20	0.32	0.63	0.49	0.33	0.53	0.37	0.32	0.29	2.41	2.25	0.00	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00
YH 12 (stream)	Mean	16.7	7.9	273	82	74.46	2.11	3.59	82	52	4.98	3.44	1.43	4.61	0.02	0.10	0.00	0.10	0.000	0.00	0.00	0.00
	Min	6.7	7.3	165	-79	42.46	1.45	1.80	36	30	2.27	1.92	0.84	3.18	0.00	0.00	0.00	0.04	0.000	0.00	0.00	0.00
	Max	23.8	8.8	421	164	99.55	3.09	8.27	165	92	10.72	7.72	2.38	7.71	0.07	0.55	0.04	0.19	0.002	0.00	0.00	0.00
	Stdev	6.4	0.4	86	70	16.85	0.60	2.11	46	21	2.65	1.62	0.48	1.30	0.03	0.16	0.00	0.07	0.000	0.00	0.00	0.00
	CV	0.38	0.06	0.32	0.85	0.23	0.29	0.59	0.56	0.40	0.53	0.47	0.34	0.28	1.64	1.68	0.00	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Quality Level	The criteria of Korean drinking water																1.00	0.005	0.05	1.00	0.05	
	Human Health Protection																					
	Contaminant Discharge in Clean Zone																					

CV: Coefficient Variation (%), Max: Maximum, Min: Minimum, Stdev: Standard deviation

에서 검출되지 않았다(Table 3). 먹는물수질기준과 비교한 결과, 우기에 채취된 침출수의 Zn과 Cd 함량이 기준을 초과하였고 특히 Cd는 일부 우기시료에서만 검출되었으나 그 외 다른 시료채취 시기에서는 대부분은 검출되지 않았다. 이들 Zn과 Cd 함량은 첫 번째 지류와 합류 이후에는 먹는물수질기준 이하로 감소하였다(Table 3).

침출수, 광산배수 및 지표수의 미량원소 함량을 국내 하천수수질기준(사람의 건강보호기준), 오염물질배출허용기준(청정지역) 및 먹는물수질기준과 비교한 결과를 종합하

면 우기에 배출되는 침출수의 Zn 및 Cd 함량이 기준치를 초과하였으나 광산수계의 YH4 지점까지만 영향을 미치며, YH4 하류지역에서 채취된 지표수는 건기 및 우기 모두 모든 기준보다 낮은 함량으로 측정되었다. 이러한 결과는 건기뿐 아니라 우기에도 제2연화 “직내골” 광미적치장으로부터 배출된 침출수에 함유된 미량원소에 의한 환경 및 인간에 미칠 수 있는 위해성이 직내골 계곡 상류에만 한정되어 있을 가능성이 매우 높다는 것을 의미하고 직내골 광미적치장에서 발생한 침출수의 오염에 따른 위

해성이 가곡천까지 영향을 미치지 않음을 지시한다.

4.4. 미량원소의 인위적 및 자연적인 제거효율 분석

제2연화광산 “직내골” 광미적치장으로부터 흘러나오는 침출수(YH01)는 상류에서 하류로 가면서 5개의 저류조를 통과하고 오염되지 않은 지류들과 합류되어 가곡천으로 유입된다. 침출수에 오염된 지표수가 저류조를 통과하고 지류와 합류되면서 나타난 수질변화를 검토하여 저류조 설치에 따른 인위적인 제거효율과 수계에서 발생하는 자연적인 저감 효과를 구분하여 평가하고자 한다.

침출수의 영향으로 오염된 지표수가 하류방향으로 흘러가면서 지표수의 pH는 증가하고 EC는 감소하였다(Table 2). 특히, 하류로 흘러가면서 지류와 합류되어 희석작용에 의한 양이온 및 SO_4^{2-} 함량 감소의 경향이 뚜렷하게 관찰되었다. SO_4^{2-} 함량은 2개 저류조를 통과하면서 침출수 함량의 0.95배로 침출수 SO_4^{2-} 농도에 비해 약 5%가 감소하였고 첫 지류(YH05)와 합류되고 3번째 저류조를 통과한 지점(YH6) 지점에서는 침출수 함량의 0.25배로 초기 농도에 비해 75%가 감소하였다(Table 3). 그 이후 YH10 지점까지는 침출수 함량의 0.23배로 초기 농도의 약 77%가 감소하여 YH6 지점 이후 YH10 지점까지 SO_4^{2-} 함량의 제거효율은 매우 미약한 것으로 나타났다. 그러나 가곡천과 합류 이후 시료채취 최종 지점(YH12)에서는 침출수 함량의 약 0.08배로 약 92%가 감소하는 것으로 나타났다(Table 3). 이러한 결과는 침출수 중 황산염(SO_4^{2-}) 이온의 함량을 저감하는 주요 요인이 지류와의 합류에 의한 희석작용에 의한 것임을 지시한다.

Ca, Mg, Na, K 및 Si 함량을 검토하여 본 결과, 첫 번째 지류(YH05)와 합류되기 전까지 2개 저류조를 통과하면서 Si를 제외(0.91배, 9% 감소)하고 각각의 원소들은 침출수 함량에 비해 오히려 약 1.04-1.24배로 증가하였지만 첫 번째 지류(YH5)와 합류하고 3번째 저류조를 통과한 후의 함량은 각 원소별로 0.37-0.53배로 초기 농도의 약 47-63%가 감소하는 것으로 나타났다(Table 3). 이후 광산수계 마지막 지점까지 더 이상의 감소는 발생하지 않았다. 그러나 두 개의 큰 지류와 합류된 이후 시료채취 마지막 지점(YH12)에서는 초기 함량의 약 0.12-0.35배로 65-88%가 감소하는 효과를 나타냈다(Table 3). 이는 저류조 설치에 의한 Ca, Mg, Na, K 및 Si의 제거효율은 미약하지만 오염되지 않은 지류와 합류되어 희석에 의한 자연적인 제거효율은 매우 높다는 것을 지시한다.

미량원소의 경우, Fe, Mn, Al 및 Zn는 첫 번째 지류(YH05)와 합류되기 전까지 2개 저류조를 통과하면서 검

출된 함량이 침출수의 함량보다 Fe 0.24배, Mn 0.70배, Al 0.27배 및 Zn 0.68배로 각각 76%, 30%, 63% 및 32%가 감소하였다(Table 3). 이것은 저류조 설치에 따른 지표수의 Fe, Mn, Al 및 Zn의 제거효율이 좋은 것으로 평가되고 특히 Fe와 Al의 저감효과가 가장 좋은 것으로 평가되었으며 저류조에서 pH 상승에 따른 철(수)산화광물의 침전반응에 의한 제거효과가 중요한 요인임을 지시한다. 이후 첫 번째 지류와 합류되어 검출된 함량은 초기 농도의 Fe 0.02배, Mn 0.14배, Al 0.03배 및 Zn 0.12배로 86-98%의 제거 효과가 있는 것으로 나타났다. 하류 4번째와 5번째 저류조를 통과한 뒤 각각의 원소들은 초기 농도의 약 Fe 0.01배, Mn 0.1배, Al 0.02배 및 0.10배로, 4번째와 5번째 저류조가 미량원소의 함량을 제거하는데 있어 큰 역할을 하지 못하는 것으로 평가되었다. 이러한 것은 지류와의 합류로 인한 희석작용에 의해 하류 저류조에 유입된 미량원소의 함량이 이미 낮아져 있어 상류 저류조에서 만큼의 효과가 나타나지 않은 것으로 판단된다. 이후 큰 두 지류와 합류한 이후 마지막 채취지점(YH12)에서 Fe, Mn 및 Al은 약 100% 제거되었고 Zn은 93%의 감소 효과가 있는 것으로 나타났다(Table 3). 한편 Pb, Cd, As 및 Cu는 검출 한계 이하이거나(예: As, Pb), 여름철 비가 온 날짜에 일부 구간에서만 검출되었다(예: Cd, Cu). 이는 철(수)산화광물의 침전반응에 의한 흡착반응에 의해 침출수 발생 초기에 제거되어 지표수에서 검출되지 않는 것으로 판단된다.

침출수로부터 오염된 지표수에서의 Ca, Mg, Na, K, Si 및 황산염(SO_4^{2-}) 이온은 저류조에서 침전 및 흡착반응에 의한 제거효과는 매우 미흡하고, 주로 지류와의 합류에 의한 희석반응에 의해 제거되는 것으로 나타났다. 그러나 Fe, Mn, Al, Zn, Cd, As 및 Cu 등 미량원소들은 저류조에서 발생하는 침전반응과 흡착반응에 의한 제거효과가 희석반응에 의한 제거효과보다 더 크거나 혹은 중요한 역할을 하고 있음이 관찰되었다.

연화광산 직내골 광미적치장으로부터 배출되는 침출수에 함유된 Fe와 Al은 침전·흡착에 의한 제거효과가 각각 77%와 64%이었으며, 희석에 의한 제거효과는 각각 22%와 36%이었다. Zn과 Mn은 침전·흡착에 의한 제거효과는 모두 34%이었고 희석에 의한 자연저감 효과는 각각 59%와 66%이었다. 한편 황산염(SO_4^{2-}) 함량은 침전·흡착에 의한 제거효과는 7%이었으나 희석에 의한 자연저감 효과는 85%이었다. As, Pb 및 Cu의 경우에는 침출수 발생 초기에 침전·흡착반응에 의해서 완전하게 제거되어 연화광산 직내골과 같은 지표환경에서는 자연저감 기

작이 이들 원소들의 제거에 중요한 역할을 하는 것으로 밝혀졌다. 즉, 원소와 성분에 따라 제거 기작의 차이가 있다.

저류조의 설치에 화학적 반응에 의한 제거효과가 높은 원소인 As, Pb, Cu, Fe 및 Mn 등의 원소를 저감하기에 매우 적합한 것으로 나타났고 함량이 낮을 경우에는 희석에 의한 효과도 높은 것으로 나타났다. 그 외, 주요 양이온과 황산염(SO₄²⁻) 등의 이온은 저류조 설치에 따른 자연저감 효과는 낮으나 희석효과에 의한 자연저감 기술을 적용할 경우 매우 효과적인 것으로 나타났다. Zn과 Mn은 초기 함량이 높을 경우 화학적인 저감효과가 클 것으로 판단되나 이후 함량이 낮을 경우에는 희석효과에 의한 자연저감기술이 매우 효과적인 것으로 나타났다.

4.5. 집수구역 내 하천에 침전된 철(수)산화광물의 미량원소 함량

제2연화광산 광미적치장에서 발생된 유출수에 오염된 계곡 하천 바닥에 침전된 2차 광물의 구성광물은 X-선 회절분석 결과, 주로 페리하이드라이트(ferrihydrite)와 침철석 등 철(수)산화광물로 구성된 것으로 나타났고 이외 석영과 일라이트(illite)가 산출되었으며 미량으로 방해석, 석고, 카올리나이트(kaolinite), 녹니석(chlorite) 및 사장석 등이 시료에 따라 검출되기도 하였다(Table 4).

하천바닥과 침전조 벽면 등에 침전된 2차 광물에서 검출된 미량원소 중 함량이 가장 높은 원소는 Zn으로 1,829-3,321 mg/kg(평균 2,376 mg/kg)이었고 광미적치장 내에서 채취한 침전물을 제외하면 침출수가 하천으로 유입된 상부로부터 하천 하류로 흘러가면서 침전된 2차 광물의 Zn 함량이 증가하는 경향이 관찰되었다(Table 1). 이러한 결과는 Zn이 침전물에 의해 지속적으로 흡착에 의해 제거되고 하천 상류보다는 하천 하류로 가면서 흡착에 의한 Zn의 제거효율이 증가하는 것으로 해석된다. 침전물에 함유된 As 함량은 평균 1,559 mg/kg(825-3,363 mg/kg)이었고 침출수가 하천에 유입되는 지점의 산화물에서 3,363 mg/kg으로 높은 함량을 보이나 저류조에서 급격히 감소하는 경향이 관찰되었다(Table 1). 이는 침출수에 용

해된 상태로 하천에 유입된 As가 하천 상류에서 침전물에 의해 대부분 제거되고 있음을 지시한다. 2차 침전물에 함유된 Cu 함량은 46-97 mg/kg(평균 67 mg/kg)이었고 거리에 따른 뚜렷한 함량변화는 보이지 않았다. Pb와 Cd은 침출수가 하천으로 유입된 지점의 2차 침전물에서만 검출되었고 이들의 함량은 각각 160 mg/kg와 64 mg/kg(평균 7 mg/kg)이었다. 검출함량이 매우 불규칙한 Pb와 Cd를 제외한 다른 미량원소들은 변동계수 값이 적어 2차 침전물의 시료채취 위치에 관계없이 비교적 일정한 함량으로 검출되는 것으로 해석된다.

지표수 시료의 미량원소 함량과 각 시료 채취 지점의 침전물에서의 함량사이의 관련성은 분산계수(distribution coefficient: $K_D = [M_S]/[M_L]$)로 표현될 수 있다. 여기서 $[M_S]$ 과 $[M_L]$ 은 각각 고체 침전물에 함유된 미량원소 함량과 지표수에서의 용해된 미량원소 함량을 나타내는 것이다. 지표수에 용해된 미량원소 함량에는 콜로이드형태로 존재하는 미량원소 함량도 포함되어 있을 수 있으므로 분산계수는 겉보기분산계수(apparent distribution coefficient)이다. 특히 지표수의 Fe 함량은 콜로이드 형태로 존재하는 함량이 많은 것으로 알려져 Fe의 겉보기분산계수 값을 계산하지 않았다(Buffle et al., 1995; Lee et al., 1997). As, Cd, Cu 및 Pb는 침출수에서만 검출되어 침출수 이외의 지점에 대한 겉보기분산계수 값을 계산할 수 없었다(Table 5). 이는 이들 원소가 모두 침전물에 의해 완전하게 제거되었음을 지시하고 침전물에 의해 선택적으로 흡착률이 높은 것을 지시한다. Zn의 경우, 침전물에 흡착된 함량이 매우 높은 것으로 나타났으나 용해된 상태로 존재하는 함량이 As, Cd, Cu 및 Pb에 비교하면 여전히 높았다(Table 3, 5). Zn은 하류로 갈수록 겉보기분산계수 값이 커지는데 이는 침전물과 비교적 느리게 평형상태에 이루거나 혹은 여러 흡착제와 상호반응을 이루고 있음을 지시한다. 겉보기분산계수 값을 이용한 각 미량원소의 상대적인 이동도(mobility)는 $Al > Mn > Zn \gg As = Cu = Pb = Cd$ 순이다. 이러한 결과는 광산배수와 지표수에 용해된 상태로 존재하는 As, Cd, Cu 및 Pb가 침전물에 의해 완

Table 4. Mineral composition of precipitates within the Yeonhwa II mine creek

Sample	Q	Pl	Ill	Chl	Kln	C	Gp	G	F
YH2-1						○		○	○
YH2-2-1	○		○				○	○	○
YH2-2-2									○
YH2-3	○		○		○				○
YH2-4	○	○			○				○

Q: Quartz; Pl: Plagioclase; Ill: Illite; Chl: Chlorite; Kln: Kaolinite; C: Calcite; Gp: Gypsum; G: Goethite; F: Ferrihydrite

Table 5. Log K_D values of trace elements for precipitates in the Yeonhwa II mine creek

log K_D (l/kg)		Fe	Mn	Al	As	Zn	Cu	Pb	Cd
YH 01	Mean	4.08	2.18	3.65	-	3.10	-	-	4.24
	Min	6.36	3.32	4.76	-	4.09	-	-	-
	Max	3.25	1.43	2.85	5.17	2.26	3.53	3.81	3.28
YH 02	Mean	4.49	3.14	4.27	-	3.27	-	-	-
	Min	5.49	3.53	5.64	-	4.39	-	-	-
	Max	3.70	2.62	3.45	-	2.53	-	-	-
YH 03	Mean	4.56	3.72	4.30	-	3.31	-	-	-
	Min	6.04	4.11	-	-	4.51	-	-	-
	Max	3.74	3.20	3.39	-	2.55	-	-	-
YH 04	Mean	4.54	4.04	4.32	-	3.42	-	-	-
	Min	6.44	4.40	-	-	4.60	-	-	-
	Max	3.68	3.52	3.35	-	2.65	-	-	-

전하게 제거되지만 Mn, Al 및 Zn은 완전하게 제거되지 못하는 것을 의미한다. 즉, 광산배수와 지표수에 용해된 중금속 등 미량원소가 오염원으로 가까운 범위 내에서 침전 및 흡착반응에 의해 자연적으로 저감되어 용존 함량이 뚜렷하게 감소하거나 완전하게 제거되고 있음을 의미한다.

5. 결 론

제2연화광산 “직내골” 광미적치장으로부터 흘러나오는 침출수의 건기와 우기의 SO_4^{2-} 및 미량원소 함량을 비교한 결과, 우기에 SO_4^{2-} 함량이 2배 이상 증가하였고 Fe 66배, Mn 5.6배, Zn 5.5배 및 Al 3.9배 증가하였다. 건기보다 우기에 함량이 증가하는 것은 광미적치장으로 스며든 빗물 혹은 지표수의 양이 증가되어 광미-물과의 반응성이 높아져 황화광물의 산화반응에 따른 용해반응에 기인한다. 그러나 As, Pb, Cd 및 Cu 등의 원소들은 대부분 검출한계 이하이거나 간혹 매우 낮은 함량만이 검출되어 이들 원소들에 의한 수질오염문제는 건기와 우기 모두 없는 것으로 확인되었다.

침출수, 광산배수 및 지표수의 미량원소 함량을 국내 하천수수질기준(사람의 건강보호기준), 오염물질배출허용기준(청정지역) 및 먹는물수질기준과 비교한 결과, 우기에 배출되는 침출수의 일부 시료에서 Zn 및 Cd 함량만이 기준치를 초과하였으나 광산수계의 YH4 지점까지만 영향을 미치고 YH4 하류지역에서는 오염되지 않은 광산배수와 지표수에 희석되어 건기 및 우기 모두 각 기준보다 낮은 함량으로 측정되었다. 특히 건기에 흘러나오는 침출수는 모두 각 기준보다 함량이 낮아 수질오염에 의한 환경오염 문제는 없는 것으로 확인되었다.

저류조의 설치는 화학적 반응에 의한 제거효과가 높은 원소인 As, Pb, Cu, Fe 및 Al 등의 원소를 저감하기에 매우 적합한 것으로 나타났고 함량이 낮을 경우에는 희석에 의한 효과도 높은 것으로 나타났다. 그 외, 주요 양이온과 황산염(SO_4^{2-}) 등은 저류조 설치에 따른 자연저감 효과는 낮았으나 희석효과에 의한 자연저감 기술을 적용할 경우 매우 효과적인 것으로 나타났다. Zn과 Mn 등의 원소는 초기 함량이 높을 경우 화학적인 저감효과가 클 것으로 판단되나 이후 함량이 낮을 경우에는 희석효과에 의한 자연저감기술이 매우 효과적인 것으로 나타났다. 그러므로 연화광산 직내골 광미적치장에서 발생하고 있는 침출수에 의한 수질 오염 문제를 가장 효과적이고 경제적인 방법으로 관리하기 위해서는 미세입자인 침전물이 제거될 수 있는 침전 혹은 제거시스템을 구축하는 것이 필요하다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 기관고유사업(전국 금속광화대 권역별 중금속재해 전과정 평가 및 자연안정화기술 개발, OAA2004030-2006(3))의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

강민주, 이평구, 염승준, 2006, 세창 폐금속광산 수계에서 미량원소의 지구화학적 거동특성 규명, *자원환경지질*, **39**(3), 213-227.
 강민주, 이평구, 최상훈, 2007, 인대광산 지역 광산배수에 영향을 받은 하천에서 미량원소의 계절적인 수질변화와 자연저감, *자원*

- 환경지질, **40**(3), 277-293.
- 대한광업진흥공사, 1981, 한국의 광상 8호, 184-185.
- 한갑수, 1972, 제2연회광산의 지질광상에 대하여, 자원환경지질, **5**(4), 211-220.
- Berger, A.C., Bethke, C.M., and Krumhansl, J.L., 2000, A process model of natural attenuation in drainage from a historic mining district, *Appl. Geochem.*, **15**, 655-666.
- Bowell, R.J. and Bruce, I., 1995, Geochemistry of iron ochres and mine waters from Levant Mine, Cornwall, *Appl. Geochem.*, **10**, 237-250.
- Buffle, J., Filella, M., Stoll, S., and Zhang, J., 1995, Nature and behavior of colloids in surface waters (abstract), *Terra Abstract*, **7**, 247.
- Chapman, B.M., Jones, D.R., and Jung, R.F., 1983, Processes controlling metal ion attenuation in acid mine drainage stream, *Geochim. Cosmochim.*, Acta **47**, 1957-1973.
- Courtin-Nomade, A., Bril, H., Neel, C., and Lenain, J.F., 2003, Arsenic in iron cements developed within tailings of a former metalliferous mine-Enguialès, Aveyron. France, *Appl. Geochem.*, **18**, 395-408.
- Dold, B. and Fontboté, L., 2002, A mineralogical and geochemical study of element mobility in sulfide mine tailings of Fe oxide Cu-Au deposits from the Punta del Cobre belt, northern Chile, *Chem. Geol.*, **189**, 135-163.
- Frau, F., 2000, The formation-dissolution-precipitation cycle of melanterite at the abandoned pyrite mine of Genna Luas in Sardinia, Italy: environmental implications, *Mineral. Mag.*, **64**, 995-1006.
- Fukushi, K., Sasaki, M., Sato, T., Yanase, N., Amano, H., and Ikeda, H., 2003, A natural attenuation of arsenic in drainage from an abandoned arsenic mine dump, *Appl. Geochem.*, **18**, 1267-1278.
- Hudson-Edwards, K.A., Schell, C., and Macklin, M.G., 1999, Mineralogy and geochemistry of alluvium contaminated by metal mining in the Rio Tinto area, southwest Spain, *Appl. Geochem.*, **14**, 1015-1030.
- International Organization for Standardization, 1995, International Standard. Soil quality : Extraction of trace elements soluble in aqua regia, ISO 11466.
- Kimball, B.A., Broshears, R.A., McKnight, D.M., and Bencala, K.E., 1994, Effects of instream pH modification on transport of sulfide-oxidation products. In: Alpers, C.N. and Blowes, D.W., Editors, 1994. The Environmental Geochemistry of Sulfide Oxidation, *Am. Chem. Soc. Symp. Series*, **550**, 224-243.
- Lee, P.K., Baillif, P., and Touray, J.C., 1997, Geochemical behaviour and relative mobility of metals (Mn, Cd, Zn and Pb) in recent sediments of a retention pond along the A-71 motorway in Sologne, France, *Environ. Geol.*, **32**, 142-152.
- 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.*, **20**, 1687-1703.
- Mascaro, I., Benvenuti, B., Corsini, F., Costagliola, P., Lattanzi, P., Parrini, P., and Tanelli, G., 2001, Mine wastes at the polymetallic deposit of Fenice Capanne (southern Tuscany, Italy). Mineralogy, geochemistry, and environmental impact, *Environ. Geol.*, **41**, 417-429.
- McGregor, R.G., Blowes, D.W., Jambor, J.L., and Robertson, W.D., 1998, The solid-phase controls on the mobility of heavy metals at the Copper Cliff tailings area, Sudbury, Ontario, Canada, *J. Contaminant Hydrol.*, **33**, 247-271.
- Shaw, S.C., Groat, L.A., Jambor, J.L., Blowes, D.W., Hanton-Fong, C.J., and Stuparyk, R.A., 1998, Mineralogical study of base metal tailings with various sulfide contents, oxidized in laboratory columns and field lysimeters, *Environ. Geol.*, **33**, 209-217.