

모악 금·은광산에 방치된 폐석이 주변 수계 및 생태계에 미치는 환경적 영향

나춘기* · 전서령*

Environmental Effects on the Hydrologic and Ecologic System around the Wasted Ore Dump of the Moak Gold-Silver Mine

Choon-Ki Na* and Seo-Ryeong Jeon*

ABSTRACT: The heavy metal contents and their dispersion patterns in stream water, stream sediments, land plants and aquatic larvae collected from the hydrologic system flowing via the wasted ore dump of the Moak Au-Ag mine were investigated systematically in order to evaluate the environmental impacts of the abandoned metal mine. The heavy metal content increases abruptly in the vicinity of the wasted ore dump, then attenuated with increasing distance from the mine area. Attenuating rates were stream water > stream sediments > land plants > aquatic larvae. On the other hand, the cumulative content of heavy metals was stream sediments > aquatic larvae > land plants > stream water. Each element tends to be enriched selectively according to media; Zn>Cu>Cd>Pb in stream water, Zn>Pb>Cu>Cd in stream sediments and land plants, and Zn>Cu>Pb>Cd in aquatic larvae. These results show that the degree of enrichment and dispersion of pollutant extruded from the wasted ore dump are different according to elements and media, and that the circulation system of materials of each medium is different. The heavy metals, especially Cu, Pb and Zn, of polluted downstream sediments occur in high proportions of Fe-Mn oxides and organic bounded forms, which show high potential of a secondary pollution source. The content of heavy metals and their dispersion patterns in stream sediments are different from those of ten years ago; pollution levels of heavy metals were degraded in various ranges. The Zn and Cu-polluted areas were widened whereas Fe and Pb-polluted areas were reduced. In crops collected from the farm lands in downstream area, the pepper was more concentrated in all heavy metal than rice. The pepper showed some contaminated level in Cu(9.7ppm) and Zn(149ppm), and the rice in Zn(90ppm). However, both crops showed no significant level in Cd(<0.2ppm) and Pb(<0.5ppm).

서 론

자원은 인간생활에 필수 불가결한 것이지만 자원의 개발로 인한 광산의 존재는 선광 부산물인 광미나 폐석등에 의해 다양한 형태의 중금속들이 분진이나 폐수 등을 통해 배출되어 주변토양이나 지표수 및 지하수의 수질에 영향을 미쳐 하천수를 산성으로 오염시키고 유해금속의 농도를 증가시킨다. 특히 폐석중에 존재하는 황철석은 산성우(oxygenated rainfall)와 접촉함으로써 강한 산성환경을 유발시킨다(Stumm and Morgan, 1970). 이러한 산성환경은 주변의 유화광물은 물론 일반 조암광물들을 강하게 분해하여 다량의 각종 중금속원소를 이온화시킴으로서 광상에 관련되는 자연수 오염에 주요한 역할을 한다(김상현, 전효택, 1993; 이재영 등, 1993). 이온화된 유해 중금속원소들은 자연수 순환경로를 따라 하

상퇴적물은 물론 주변 토양을 오염시키며 궁극적으로는 생물계에 의한 생물학적 농축과정을 거쳐 이들의 먹이사슬에 속한 인간에게까지 심각한 환경적 피해를 일으킬 수도 있다.

본 연구의 대상이 되는 모악광산은 전라북도 전주시를 중심으로 분포하는 전형적인 소규모 금·은광산구의 하나로 광산개발에 수반 산출된 폐석더미와 광미가 상부 수계에 방치되어 있으며 상류에서 발생하는 하천수가 폐석더미 상부에서 복류되어 하부로 침출됨에 따라 수계 및 이를 이용하는 하부 촌락의 생활환경에 미칠 수 있는 중금속 오염이 우려되는 지역이다. 본 연구는 김옥배, 나춘기(1987)의 연구를 토대로 하여 모악광산의 수계를 따라 하천수 및 하상퇴적물, 생물시료를 대상으로 중금속 오염정도 및 오염원의 확산경로를 파악함을 목적으로 하였다. 또한 과거의 연구결과와 약 10년이 경과된 현재 수계환경에서 중금속 원소들의 존재상태를 대비·고찰함으로써 시간에 따른 중금속의 오염정도 및 분산에 따른 중금속 분배의 변화유형을 파악하여 광산

*전북대학교 지질학과 (Dept. of Geology, Chonbuk National Univ. Chonju 560-756, Korea)

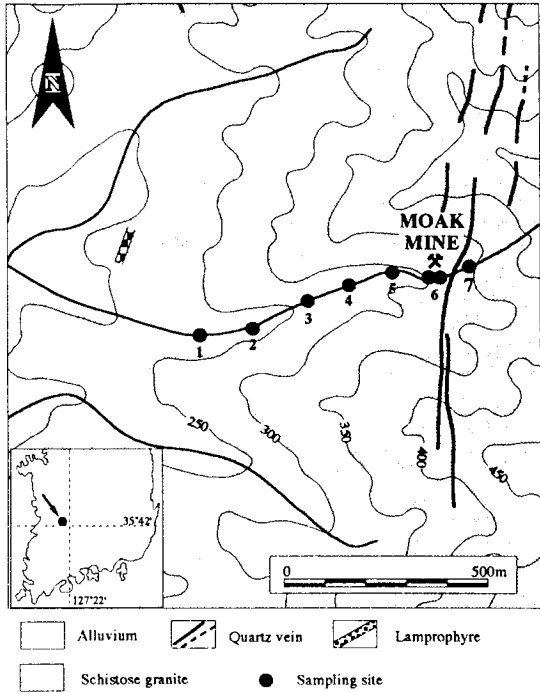


Fig. 1. Map showing Geology, hydrologic system and sampling points around the Moak-mine area.

활동에 의한 수계 및 생태계로 유입되는 중금속 오염의 시공간적 특성을 규명하고 제어를 위한 대책수립에 기초자료를 제공하고자 하였다.

지질 및 광상

모악광산은 전북 김제군 금산면 청도리에 위치하는 금·은광상으로 전주에서 남서쪽으로 약 15Km 지점에 위치한다. 본 광산부근의 지질은 주로 편상화강암과 화강편마암으로 구성되며, 그 외 맥상으로 석영반암, 염기성 암맥 등이 후기에 관입되어 있다(Fig. 1). 편상화강암과 화강편마암은 운모편암 등을 협재하고 있으며 그 편리는 대체로 N60~80°E, 35~75°NW로 나타난다. 암회색 내지 담회색의 본 암은 석영, 장석, 운모 등을 주성분 광물로 한다. 석영반암은 주로 N20~30°E의 주향으로 맥상분포한다. 광상은 상기 화강편마암의 절리 혹은 기타 구조선을 따라 상승한 열수용액에 의한 열극충진광상으로 2~3개조의 함유석영맥으로 발달한다. 주향은 N10~20°E 경사는 60~80°NW이며 맥폭은 대체로 0.07~0.10 m인데 부분적으로 1.0 m의 폭을 보이는 곳도 있으나 상대적으로 품위는 떨어지는 편이다. 본 광산은 금·은광물을 주 채광 대상으로 하며, 금은 자연금 상태로 존재하고 약간의 은이

황화물에 수반되어 나타난다. 수반광물은 황철석, 섬아연석, 방연석과 황동석이 있고, 맥석으로는 방해석과 석영등이 호층구조를 이루고 있다(대한광업진흥공사 1987). 과거 상당량의 채광으로 해발 100 m까지는 거의 채진되고 약간의 저품위광석은 부분적으로 남아 있어 해방후 소규모로 채광하던 것을 1985년이래로 조업이 중단된 상태이다.

본 지역의 수계는 광산 상부 계곡에서 흐르는 소량의 자연수가 광산개발로 쌓여진 폐석더미 하부로 복류되어 광산지대로부터 100 m 정도 하부에서 스며 나오는 것과 좌측 계곡으로부터 유입되는 소량의 자연수가 혼합되어 형성되는 총연장 2.4 Km의 소규모 수계로 지류의 유입이 거의 없는 단일 수계를 이루고 있다(Fig. 1). 경사는 완만하며(5~10°) 하상은 대부분 편상화강암과 화강편마암으로 이루어져 있으며, 수계 주변의 두터운 토양층을 바탕으로 무성한 산림이 발달되어 있어 그 영향으로 많은 유기물이 집적되어 있다. 우기에는 수량이 풍부해지며, 흐름도 와류를 형성하지만 강우후 2~3일 후에는 강우의 영향이 거의 없는 수량의 변화가 극히 심한 수계를 이루고 있다. 그러나 우기를 제외하고는 일반적으로 물의 흐름이 완만하기 때문에 부유물의 함유량은 적은 편이다. 광상으로 부터 약 1 km 하류쪽에는 유각마을이 위치하고 있어 본 수계의 자연수를 농업용수와 생활용수로 이용하고 있다. 이 지역의 수계는 인위적인 오염이 예상되어 연구 대상에서 제외시켰다. 따라서 실제 연구대상이 되는 수계의 연장은 약 0.8 Km이다.

시료채취 및 처리

하상퇴적물과 물시료는 광산주변의 단일 수계를 따라 약 0.1~0.2 km 간격으로 7개 지점에서 1994년 11월에, 수계 인접토양에 성장하는 조릿대류의 잎과 하상퇴적물 중에 서식하는 수생동물은 같은 지점에서 1995년 3월에 각각 채취되었다. 또한 유각마을 내에 있는 3지점의 우물에서 지하수를 채취했으며 1994년에 동 지역에서 재배된 고추와 쌀을 수집하였다. 물 시료는 현장에서 pH를 측정하고 0.45 μm 여과지로 부유물질을 제거한 후 산처리된 폴리에틸렌 병에 넣어 침전 및 흡착을 방지하기 위해 순수 질산을 가해 pH 2~3 정도로 산성화 시킨 것을 약 500 ml, 산성화나 여과하지 않은 것을 약 5 l 채취하였다. 하상퇴적물 시료는 표층 퇴적물층을 대나무 삼을 이용하여 하천폭 전반에 걸쳐 채취·혼합한 시료를 200 g 이상씩 채취하여 실험실에서 완전 건조한 후 100 mesh 입도로 체질한 시료를 대상으로 연속추출법(Tessier et al., 1979)과 냉추출법(Foster, 1973)을 이용하여 처리하였다. 연속추출은 시료 0.5 g을 출발시료로 하여 교환가능한 형태,

Table 1. pH and element content in stream water and underground water samples from the Moak-mine area.

	pH	Ca	Cd*	Cu*	Pb*	Zn
Stream water 1	6.94	15.10	3.92	38.99	8.29	0.45
Stream water 2	6.31	15.34	3.97	15.63	2.69	0.35
Stream water 3	6.36	15.90	4.61	12.41	2.39	0.76
Stream water 4	6.27	15.85	5.03	8.72	2.14	0.47
Stream water 5	6.20	17.84	6.53	11.34	4.08	1.25
Stream water 6-1	6.14	6.79	6.29	34.34	3.05	0.19
Stream water 6-2	5.53	15.07	9.45	30.89	2.67	1.14
Stream water 7	6.32	4.84	3.10	8.48	3.67	0.33
Ground water 1	6.14		0.04	2.87	0.62	*3.90
Ground water 2	4.97		1.24	8.81	2.18	*11.70
Ground water 3	5.32		1.00	6.19	0.56	*12.40

(*marked values and elements are ppb, the others are ppm)

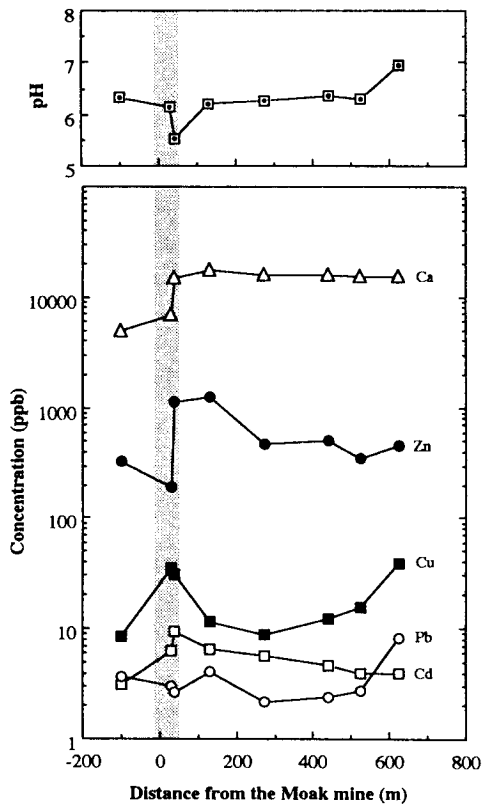


Fig. 2. Variation of pH and element content in stream waters. Shaded area indicates the province of the waste ore dump around the Moak-mine.

철-망간산화물과 결합된 형태, 유기물과 결합된 형태, 그리고 잔류상 형태의 순으로 단계적으로 실시하였다. 냉추출은 1%의 순수 질산 25 ml에 0.5 g의 시료를 넣고 약 30분간 교반하고 액-고체를 분리하는 방법으로 수행되었다. 식물과 하상동물

시료는 불순물을 제거하기 위하여 증류수로 수회 세척하고 전기 건조기에서 70°C 조건으로 완전 건조하고 잘게 분쇄한 후 적량을 테프론 용기에 취하여 저온 혼합산 처리법(HNO₃-HClO₄-HF)으로 완전용해하였다(Na *et al.*, 1995).

위와 같은 방법으로 처리한 시료용액은 ICP-AES와 Graphite furnace-AAS를 이용하여 화학분석을 실시하였으며 대상원소는 광산활동과 관련하여 황화합물 광산에서 주로 광산의 채광 및 선광활동에 의해 오염될 수 있는 Cu, Pb, Zn, Cd, Fe 등을 중심으로 하였다.

결과 및 고찰

하천수중의 중금속

하천수 시료에 대한 Ca, Cd, Cu, Pb, Zn을 포함하는 화학 분석 결과 및 pH를 Table 1에 나타내었고, 이들 각 지점의 분석치를 광산에서 부터 거리에 따라 Fig. 2에 도시했다. 모악광산을 경유하는 수계에서 pH의 변화는 폐석더미 하부를 제외한 전 지점에서 6.20~6.94의 범위를 보여 약산성 내지 중성의 환경을 보이나 광산지대에서는 5.53과 6.14로 보다 산성환경이 형성되어 있음을 보인다. 원소함량 분포는 각 원소의 지구화학적 특징에 따라 다양한 분포양상을 보이나 전반적으로 광산지대에서 급격히 증가하는 경향을 보인다 (Fig. 2). 이렇게 광산지역 주변에서 낮은 pH값과 높은 원소 함량을 보이는 것은 폐석중에 함유된 황화광물들의 산화작용으로 설명되어 질 수 있다 (Stumm and Morgan, 1970).

각 원소별 함량변화는, 광산 상부 100 m 지점의 비오염 하천수에 비해 광산 폐석을 복류한 후 하부에서 침출되는 하천수는 Ca가 4.84 ppm에서 15 ppm으로, Cd이 3.1 ppb에서 9.5 ppb로, Cu는 8.5 ppb에서 34.3 ppb로, Zn은 0.33 ppm에서 1.14 ppm으로 대략 3~4배 정도 높은 원소함량을 보여 방치된 폐석이 수질오염원으로서 작용하고 있음을 보인다. 그러나 Pb의 경우 광산주변(2.67~3.05 ppb)에서 오히려 배경값(3.67 ppb)보다 낮아지는 경향을 보이나 하부 150 m 지점에서 4.08 ppb로 약간 높아지는 경향을 보이나 전반적으로 거의 균일한 함량분포를 보인다. 특히 Cu와 Pb는 농경지가 시작되는 지점에서 가장 높은 함량(각각 39 ppb와 8.3 ppb)을 보여 농경지로부터 상당량의 영향을 받고 있음을 보여준다. 하천수의 중금속 함량은 유량의 변화를 일으키는 계절적인 변화에 따라 크게 변화하므로 오염정도를 판단하는 척도로서 이용하기는 매우 어렵지만 Pb를 제외한 모든 원소가 광산지대에서 급격히 증가하며 타 지역의 비오염지대(이재영 등, 1993)에 비해 높은 함량을 보여 폐석더미에 유입된 하천수가 폐석과의 반응에서 상당량의 중금속이 용탈·이동시킴에 따라 전반적으로 오

Table 2. Element content in stream sediments prepared by cold extraction method (unit in ppm).

	Ca	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn
CE-sediment 1	1070	3.62	139	1156	252	637
CE-sediment 2	816	2.44	88	1238	297	342
CE-sediment 3	587	2.28	81	1141	239	398
CE-sediment 4	394	3.39	204	2194	491	640
CE-sediment 5	237	2.14	239	3158	579	616
CE-sediment 6-1	744	1.25	127	3096	1126	417
CE-sediment 6-2	158	3.44	224	4846	955	242
CE-sediment 7	702	0.23	5	650	49	27

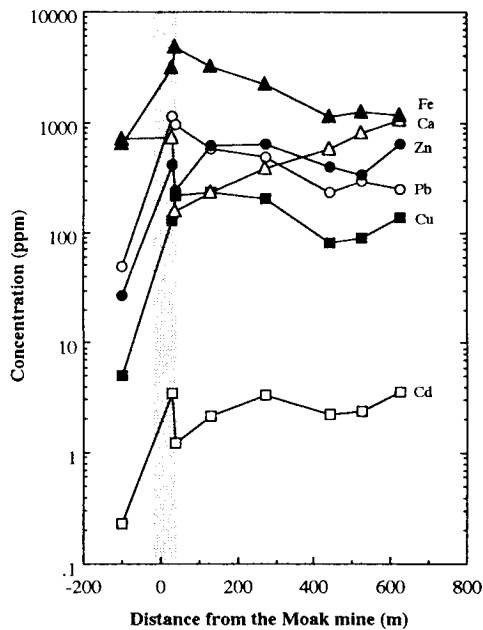


Fig. 3. Dispersion patterns of each element in stream sediments prepared by cold extraction method.

염이 진행되고 있음을 보인다. Pb의 경우 전 수계에서 자연수 평균값(3 ppb)에 유사한 함량분포를 보이며(Rose *et al.*, 1979) 그 지역에 내리는 강수 중의 Pb함량(3~20 ppb)보다 적어 하천수가 직접적으로 폐석과 반응함으로써 공급되는 양은 상대적으로 적음을 보인다.

각 원소별 분산특성은 Ca와 같이 전 수계에 걸쳐 증가된 함량이 일정하게 유지되는 경향을 보이는 것과, 유입된 함량이 거리에 따라 감소되는 경향을 보이는 것으로 대별될 수 있다. 감소되는 경향을 보이는 것중, Cd과 Zn은 거리에 따라 서서히 감소되는 경향을, Cu는 급격히 감소되는 경향을 보이고 있다. 일반적으로 광산지대로부터 유입된 원소들의 거리별 함량감소는 각 원소의 지구화학적 특성에 따라 주변 지류의 혼입에 의한 희석작용에 의해 지배되거나 화학적인

환경변화에 의해 지배되는 것으로 대별될 수 있다(김옥배, 나춘기, 1987). 본 수계가 주변 지류의 유입이 거의 없는 단일수계를 이루고 있으므로 희석에 의한 함량감소는 거의 없다고 판단되며 이는 주로 희석에 의해 함량의 감소가 일어나는 Ca가 증가후 일정한 함량을 유지하는 경향으로도 입증된다. 따라서 본 수계의 하천수에 용존된 중금속의 거리별 분산특성을 지배하는 요소는 주로 지구화학적 환경변화에 따른 각 원소의 이동성의 변화와 철-망간산화물 혹은 유기물과의 흡착능력 등이 복합적으로 작용한 결과로 볼 수 있다(Chapman *et al.*, 1983; 김옥배, 나춘기, 1987). 따라서 이러한 화학적 환경변화에 의한 함량감소 기구는 자연수중에 유입된 용존상의 오염원소들의 이동성을 효과적으로 제한할 수 있다. 결과적으로 폐석으로부터 용탈되어 하천수에 유입된 중금속 이온들은 그 이동성이 크게 제한될 것이며 대부분 수km이 내에서 하천수로부터 제거될 것이다. 또한 수계 하부에 위치하는 유각마을의 우물에서 채취한 지하수가 모두 음용수 기준치 이하의 중금속 함량을 보여 오염원의 영향을 전혀 받지 않고 있음을 고려할 때 자연수에 의한 중금속원소의 이동은 매우 제한적임을 알 수 있다. 그러나 자연수와 폐석의 반응은 폐석 전반에 걸쳐 일어날 수 있으며 장기간의 반응에 의해 용출된 가용성 상태의 중금속 원소들은 강수에 씻겨 다량의 중금속을 단시간에 하천으로 흘려 보낼 수 있을 것이다. 따라서 이런 상태의 하천수는 하부 마을의 농경지 및 생활용수에 심각한 중금속 오염을 유발시킬 수 있으며 이에 대한 방비대책이 하천수에 의한 직접적인 중금속 오염의 제어를 고려하는데 있어 가장 중요한 요소라고 사료된다.

하상퇴적물중의 중금속

냉추출법에 의해 처리된 퇴적물시료에 대한 원소분석 결과와 광산을 중심으로 각 원소의 거리별 분산상을 Table 2와 Fig. 3에 각각 나타내었다. 1%의 순수 질산에 의해 추출된 각 원소의 함량은 전암분석치의 10~90%로 각 원소별, 그리고 광산의 상부인가 하부인가에 따라 그 추출율이 달랐다. 원소별 추출율의 특징은 Ca, Cd, Fe가 약 10% 전후, Cu, Pb, Zn은 대부분 지점에서 50%이상을 보이고 있다. 또한 광산 상부지점에 비해 광산 하부지점에서는 3배 이상 높은 추출율을 보이고 있음이 특징이다. 이는 하상퇴적물에 포함되어 있는 원소들의 존재형태를 반영하는 결과로 판단된다. 하상퇴적물중의 원소함량은 주변모암의 종류 및 퇴적물의 기여도, 풍화의 정도, 가용성 및 채설성 오염물의 존재비 등 매우 다양한 인자에 의해 지배됨을 고려할 때 전암분석에 비해 냉추출법이 보다 효과적으로 오염정도를 판단하는 기준을 제공해줄 것으로 기대된다. 전반적인 원소의 분산형태는

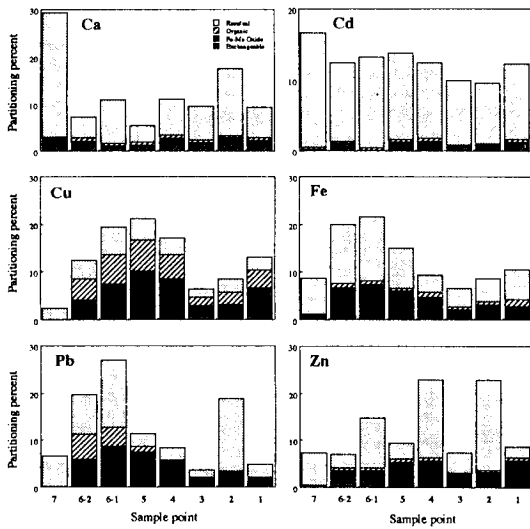


Fig. 4. The Mode of occurrences of elements in stream sediments prepared by sequential extraction method. Sample 7 is from upstream area, 6-1 and 6-2 are from mine area and the others are from downstream area.

폐석지대 상부에 비해 하부에서 급격한 함량 증가를 보이며 하류로 갈수록 서서히 감소되는 경향을 보인다. 폐석 하부의 하상퇴적물에서 원소의 함량이 급격히 증가되는 것은 폐석의 풍화생성물의 직접적인 유입과 자연수와 폐석의 화학적 반응에 의해 자연수중으로 용탈된 이온상 원소들이 pH가 높아짐에 따라 금속의 hydromorphic 침전이 일어나 집적된 결과로 판단된다. 고농도의 원소함량을 갖는 하상퇴적물은 수류에 의한 이차 분산작용과 하천 주변으로부터 침식되어 들어오는 비오염 퇴적물의 혼입에 의해 재분배와 희석 작용을 받게 될 것이며, 그 과정 중에 자연수와 퇴적물 사이에서 피드백이 없다면 퇴적물에서의 희석작용은 자연수와 같은 법칙을 준수한다(Hawkes, 1976). 그러나 본 광산하부 수계의 하상퇴적물은 전반적으로 높은 원소함량이 유지되고 있어 광산 폐석에 의해 지속적이며 광범위하게 오염이 진행되고 있음을 시사한다. 다른 중금속 원소들과는 달리 Ca의 분산 형태는 비오염 지대인 광산 상부에서 가장 높은 값을, 광산 지대에서 가장 낮은 값을 보이고 하류로 갈수록 점점 높아지는 경향을 보인다(Fig. 3). 이는 자연수중의 원소 분산 상태에서 보였듯이 Ca가 용존상으로 매우 안정하다는 것을 고려할 때 폐석의 해설성 풍화물의 혼입비와 재용출 정도를 직접적으로 반영하고 있는 결과로 사료된다. 즉 하상퇴적물 중에 폐석의 해설성 풍화물이 많을수록 Ca의 함량은 낮아지며 일단 용출된 Ca 이온은 재침전 또는 흡착되기보다는 안정적으로 이동할 수 있으므로 재용출이 많아질수록 역시 퇴적물중의 Ca함량은 감소할 것이다. 따라서 퇴적물중의 Ca

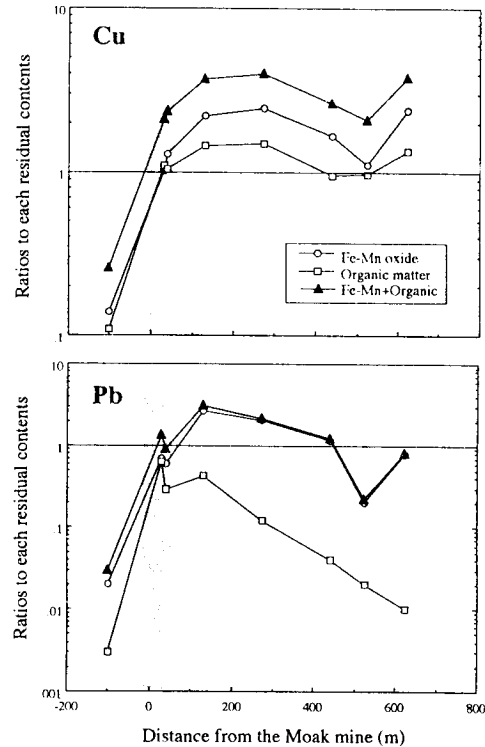


Fig. 5. The relative occurrences of Fe-Mn oxides and organic bounded form to residual form in Cu and Pb contents of the stream sediments according to distances from the Moak-mine.

함량의 분산형태는 퇴적물의 해설성 오염원의 혼입정도 및 용출 혹은 재용출의 정도를 지시하는 원소로서 이용되어 질 수 있을 것으로 판단된다.

퇴적물중에 함유된 원소들의 존재형태를 고찰하기 위해 Tessier *et al.*(1979)이 제시한 연속 추출법에 의해 제조된 시료의 분석치를 토대로 각 원소의 존재형태별 비율을 계산하여 Fig. 4에 나타냈다. 모악광산의 전체 수계의 하상퇴적물의 중금속 함량은 평균 Cd=45 ppm, Cu=183 ppm, Pb=693 ppm, Zn=1249 ppm, Fe=2.3%로 Anon(1977)이나 Persaud *et al.* (1989)이 제시한 퇴적물의 오염정도 판별 기준치(Cd=1 ppm, Cu=25 ppm, Pb=31~40 ppm, Zn=90~100 ppm, Fe=1.7~3.0%)와 대비해 볼 때 매우 오염된 퇴적물의 수준을 보인다 (Table 6 참조). 특히 광산 상부 100 m 지역에서 채취된 하상퇴적물도 전 원소에서 오염이 진행된 함량수준을 보여 광미 및 광석입자가 대기에 의해 비산되어 운반된 영향을 받았음을 알 수 있다. 광산하부 수계의 하상퇴적물은 상부에 비해 Ca와 Cd를 제외한 모든 원소가 2배 이상의 증가되는 경향을 보여 냉추출법의 결과와 마찬가지로 심각하게 오염이 진행되었음을 보인다. 그러나 Cd의 경우 광산 상부

Table 3. Heavy metal contents in land plants collected from stream sides (unit in ppm).

	Ca	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn
Land plant 1	3077	0.32	10.79	131.09	9.51	91.27
Land plant 2	2559	0.31	9.09	287.08	9.03	64.73
Land plant 3	2326	0.31	11.47	106.90	15.95	112.42
Land plant 4	2489	0.52	10.11	119.97	32.97	88.25
Land plant 5	3540	0.55	11.38	214.46	25.20	224.90
Land plant 6	4184	0.70	7.71	113.73	20.70	72.18
Land plant 7	2154	0.49	10.33	74.70	17.98	48.66

Table 4. Heavy metal contents in rice and pepper produced from the farm land in downstream area of the Moak-mine (unit in ppm).

	Cd	Cu	Pb	Zn
Rice	0.03	0.82	0.29	89.6
Pepper	0.17	9.74	0.43	149.4

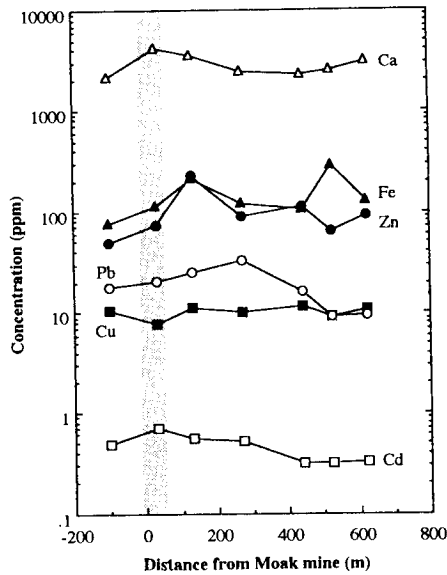


Fig. 6. Dispersion pattern of heavy metals in land plants collected from stream sides.

지점에서 59 ppm의 가장 높은 값을 보이고 있어 냉추출법과는 상이한 분산형태를 보이고 있다.

각 원소의 존재형태를 보면, Cd은 잔류상 형태(>86%)가 우세한 반면 Cu, Pb, Zn은 철망간 산화물이나 유기물과 결합된 형태가 우세해지는 경향을 보인다. 광산 상부 퇴적물에서는 모든 원소가 대부분 90% 이상의 잔류상 형태로 존재하고 있는 반면 광산 하부 지역의 퇴적물들은 낮은 비율의 잔류상 형태를 보여 폐석으로부터 용존된 상태로 유출, 운반된 원소에 의해 상대적으로 많은 영향을 받았음을 보인다. 특히 Cu와 Pb의 경우 안정한 잔류상 형태에 비해 불안정하여 재용출의 가능성을 내포하고 있는 철망간 산화물 및 유기물과 결합된 형태가 상대적으로 많은 비율을 차지하고 있어 본 광산의 개발로 인해 야기되는 주된 환경오염 원소임을 시사한다. 양 원소의 존재형태는 Cu의 경우 철망간 산화물과 결합형태 > 유기물과 결합형태 > 잔류성 형태인 반면 Pb은 철망간 산화

물과 결합형태 > 잔류성 형태 > 유기물과 결합형태 순으로 높아지는 경향을 보인다(Fig. 5). 또한 양 원소의 분산형태에서 Cu가 Pb에 비해 더 하부까지 확장된 경향을 보여 이들 원소의 분산상이 원소의 이동성에 의해 지배되고 있음을 시사한다. 이는 수류에 의한 하상퇴적물의 이차적 분배가 쇄설성 이동에 의해서 뿐만 아니라 재용출과 재흡착 등을 포함한 용존성 이동에 의해서도 지배되고 있음을 보인다. Cd의 경우 전암 분석치는 매우 심각한 오염수준(40 ppm)을 보이나 불안정상인 철망간 산화물 및 유기물과의 결합형태로 존재하는 부분은 전 수계에 걸쳐 전 함량의 15% 미만(6 ppm)으로 그 오염정도가 타 원소에 비해 적다. Fe의 전 함량은 광산으로부터 130 m 하부까지 2.8~4.0%로 Anon(1977)이 제시한 기준에 의거 매우 오염된 수계를 형성하나 그 이상 하류에서는 대부분 1.7% 이하로 비오염 수계를 형성하고 있다. 또한 전 함량중 평균 56%가 잔류성 형태로 존재하고 있으나 광산에서 멀어질수록 감소하여 270여 m에서 최저치(38%)를 보인 후 다시 증가해 가는 경향을 보인다. 이는 광산에 가까울수록 쇄설성 이동이 보다 더 지배적이며 270여 m에 이르러 용존상 이동에 의한 영향이 최대가 된 결과로 사료된다.

생태계중의 중금속

광산 폐석으로부터 용출되어 주변수계에 유입되는 중금속 원소들이 식물에 미치는 영향을 조사하기 위해 하천 가장 자리에 성장하는 조릿대류의 잎을 타 시료와 동일한 지점에서 채취하여 중금속 함량을 분석한 결과 Table 3과 같으며, Fig. 6에는 각 원소의 광산으로부터 거리별 분산상을 나타냈다. Cd은 폐석하부지역에서 가장 높은 값(0.7 ppm)을 보이고 하류로 진행함에 따라 점점 감소하는 경향을 보여 하천수 및 하상퇴적물과 유사한 분포특징을 보였다. 그러나 하천수 및 하상퇴적물중의 중금속원소의 함량분포가 광산을 중심으로 상부에 비해 하부가 급격히 증가하는 경향을 보이는 반면 식물은 상부, 하부에 관계없이 광산을 중심으로 거리가 멀어질수록 감소하는 경향을 보인다. 반면 Fe와 Zn은 광산으로부터 130 m 하부에서, Pb는 273 m 하부에서 각각 214.5 ppm, 224.9 ppm, 33 ppm으로 최고치를 보인 후 감소하는 경향을 보여 하천수 및 하상퇴적물과는 상이한 분산특징을 보였다. 또한 Cu의 경우 전 수계에 걸쳐 10.13 ± 1.24 ppm(평균 ± 표

Table 5. Heavy metal contents in aquatic larvae lived in stream sediments (unit in ppm).

	Cd	Cu	Pb	Zn
Aquatic larva 1	21.88	68.69	32.09	331
Aquatic larva 2	16.94	79.40	50.17	282
Aquatic larva 4	7.35	94.72	33.74	693
Aquatic larva 6	9.25	62.48	43.47	322
Aquatic larva 7	0.76	24.16	6.85	140

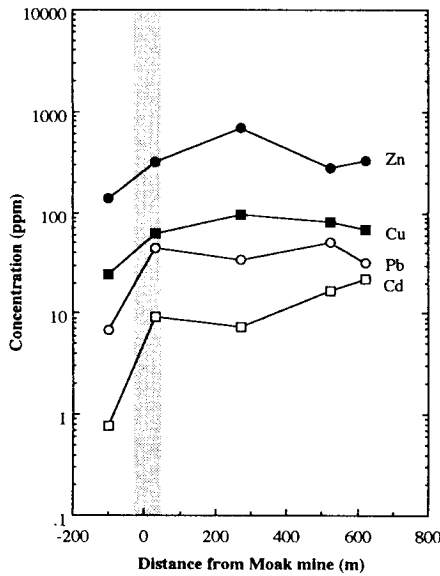


Fig. 7. Dispersion pattern of heavy metals in aquatic larvae lived in stream sediments.

준편차)으로 거의 일정한 함량분포를 보이고 있음이 특징이다. 본 수계에 성장하는 조릿대류의 잎에 농축된 중금속원소의 함량은 Cd이 0.31~0.70 ppm, Cu가 7.71~11.47 ppm, Pb가 9.03~32.97 ppm, Zn이 48.66~224.90 ppm, Fe가 74.70~287.08 ppm의 범위를 보였다. 상기한 바와 같이 원소에 따라 최대 농도를 보이는 위치는 각각 다르나 전체적으로 Cu를 제외한 모든 원소가 광산지역에서 광산상부나 하류지역에 비해 보다 1.5~4배 더 높은 함량을 보였으며 이들 원소의 감소경향으로 볼때 폐석하부로부터 300 m정도 하류까지 오염원이 강하게 확장되어 있다고 판단된다. 그러나 타 지역의 비오염지대에 성장하는 조릿대류의 평균적인 중금속함량(Cd=0.03 ppm, Cu=1.7 ppm, Pb=0.66 ppm, Zn=41 ppm, Fe=43 ppm)에 비해서는 본 광산 수계주변에 성장하는 조릿대류는 모든 원소에서 10배 이상 높은 중금속함량을 보여 전수계에 걸쳐 광범위하게 오염이 진행되어 있음을 시사한다. 한편 본 수계 하류에 분포하는 농경지에서 산출된 백미는 Cd=0.03 ppm, Cu=0.82 ppm, Pb=0.29 ppm, Zn=90 ppm, 고

추는 Cd=0.17 ppm, Cu=9.74 ppm, Pb=0.43 ppm, Zn=149 ppm으로 백미보다 고추에서 중금속의 생물학적 농축이 현저하게 일어나고 있음을 보인다 (Table 4). 각 원소의 함량은 Zn>Cu>Pb>Cd로 자연환경에서 이동성이 높은 원소일수록 고함량으로 농축되는 경향을 보여 이재영 등(1993)의 결과와도 잘 일치한다. Cd과 Pb는 양자 모두 허용기준치(Cd=0.4 ppm, Pb=2 ppm) 이하로 그다지 오염이 되지 않았으나 백미의 경우 Zn이, 고추의 경우 Cu와 Zn이 높은 함량을 보여 오염이 우려된다.

또한 하천수 및 하상퇴적물에서의 중금속 오염이 하상생물에 미치는 영향을 고찰하기 위해 하상퇴적물 중에 서식하는 유충을 각 채취점에서 채집하여 분석한 결과 Table 5와 같으며 광산으로부터 거리별 분산상은 Fig. 7과 같다. 전체적으로 광산 상부지점(Cd=0.76 ppm, Cu=24.16 ppm, Pb=6.85 ppm, Zn=140 ppm)에 비해 광산 하부지점(Cd=9.25 ppm, Cu=62.48 ppm, Pb=43.47 ppm, Zn=322 ppm)에서 모든 원소가 2~10배 정도 증가하여 하류까지 비교적 높은 농도로 유지되는 경향을 보인다. 특히 보다 이동성이 낮은 Cd과 Pb에서 급격한 증가현상을 보이고 있으며 광산하부에 비해 하류의 농경지가 가까이에서 보다 농축되는 경향을 보인다. 이는 이들 생물의 먹이가 부식질 유기물임을 감안할 때 농업활동에 의한 영향일 것으로 생각된다. 한편 보다 이동성인 Cu와 Zn은 Cd와 Pb에 비해 광산활동으로 인한 오염원이 보다 확장된 경향을 보이는 반면 하류지역에서는 약간 감소되는 경향을 보여 대조적이다. 이들의 중금속함량은 식물에 비해 전반적으로 높은 농축율을 보이고 있으며 냉추출법으로 처리한 하상퇴적물의 중금속 분산상과 매우 유사한 경향을 보여 하상퇴적물의 오염이 이들의 먹이사슬에 직접적으로 영향을 끼치고 있음을 시사한다. 이는 주변 토양계에 성장하는 식물의 경우 토양에 흡착된 중금속을 이차적으로 뿌리를 통해 흡수되는 반면 하상생물은 하천수와 하상퇴적물간의 직접적인 반응계중에 서식한다는 점과 일차적으로 농축작용을 받은 유기물질을 먹이로 한다는 점 등을 고려할 때 타당한 결과로 사료된다. 따라서 수계에 방치된 광산폐석에 의한 중금속 오염은 하상동물군에 가장 치명적으로 영향을 끼치고 있음을 보인다.

중금속 분산상의 시간적 변화

광산활동에 의해 야기된 중금속오염원은 광산활동이 중지되면 시간이 지나면서 오염원이 계속적으로 용탈 제거됨에 따라 그 영향력이 약화될 것이다. 또한 오염원으로부터 용탈되어 주변환경에 유입된 오염물질들은 공급되는 양의 변화에 따라 한층 더 오염이 심화되거나 분산 및 희석 등에 의해 차차 배경치로 되돌아오는 자연 자정작용을 받게 될

Table 6. Total content of heavy metals in stream sediments collected on 1986 (Kim and Na, 1987) and 1994. Threshold values for classifying nonpolluted or polluted sediments are those recommended by (a) Persaud et al. (1989) and (b) Anon (1977). Unit in ppm except for Fe(%).

	1986		1994		Threshold value	
	Min~Max	Mean \pm σ	Min~Max	Mean \pm σ	(a)	(b)
Cd	no determined		34~ 59	45 \pm 8	1	-
Cu	32 ~ 537	187 \pm 161	35~ 310	183 \pm 96	25	25
Pb	110 ~ 1745	936 \pm 622	202~1490	693 \pm 464	31	40
Zn	95 ~ 2138	971 \pm 669	704~2281	1249 \pm 683	110	90
Fe(%)	1.2 ~ 7.9	3.4 \pm 1.9	1.2~4.0	2.3 \pm 1.1	3.0	1.7

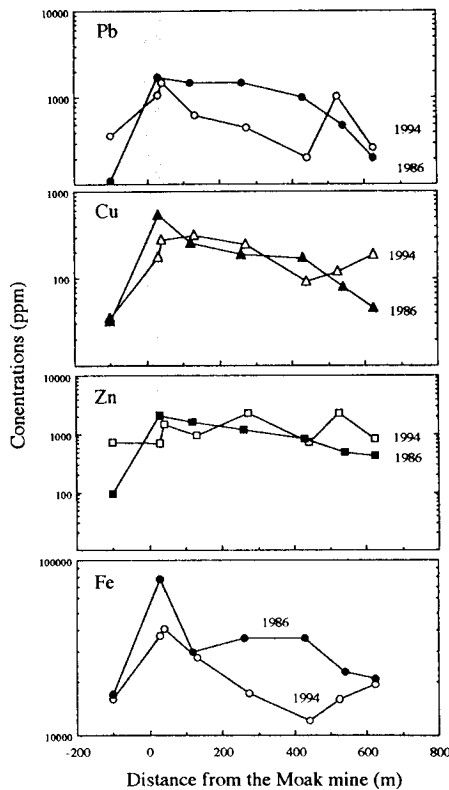


Fig. 8. Dispersion patterns of heavy metals in stream sediments collected on 1986 and 1994. Data of 1986 are from Kim and Na (1987).

것이다. 따라서 광산활동이 중지된 이후 시간에 따른 중금속 원소의 변화거동에 대한 자료는 오염원의 확산경로 및 자연적인 자정작용의 정도를 파악하는데 중요할 뿐만 아니라 복원대책을 수립하는데 있어 기초적인 자료로서 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 논문의 연구지역인 모악광산은 1985년 휴광된 직후 김옥배, 나춘기(1987)에 의해 주변수계에 대한 지구화학적 연구가 수행된바 있다. 따라서 과거의 자

료를 현재의 결과와 대비시켜 시간 경과에 따른 중금속 함량의 변화 및 분산상의 변화를 고찰했다. 김옥배, 나춘기(1987)는 하천수 및 하상퇴적물의 중금속 함량과 분산상에 대한 계절적 영향을 고찰하고 하천수의 경우 계절적인 영향(수량)이 매우 심한 반면 하상퇴적물은 계절적인 영향을 거의 받지 않으며 하천수에 비해 안정한 함량 분포를 유지할 수 있음을 밝힌 바 있다. 따라서 하천수의 자료에 대한 단순비교는 큰 의미가 없을 것으로 판단되며 오염원의 경년 변화를 고찰하는데 있어 하상퇴적물이 보다 효과적인 지시 자일 것으로 생각된다.

1986년과 1994년에 각각 동일지점에서 채취된 하상퇴적물 중의 중금속 원소의 전함량과 Persaud *et al.*(1989)와 Anon (1977)에 의해 오염 퇴적물의 판별기준으로 제시된 문턱값을 Table 6에 대비시켜 나타냈으며 Fig. 8에는 이들 자료를 거리별 중금속 원소 분산상으로 나타냈다. 광산 폐쇄하부에서 모든 원소의 함량(Cu=231 ppm, Pb=1291 ppm, Zn=1088 ppm, Fe=3.9%)은 1986년(Cu=537 ppm, Pb=1745 ppm, Zn=2138 ppm, Fe=7.9%)에 비해 상당히 감소된 경향을 보이나 여전히 높은 농도를 유지하고 있어 오염원의 공급은 계속적으로 일어나고 있음을 보인다. 각 원소별 분산상을 보면 Fe와 Pb의 경우 과거에 비해 오염원의 확장 범위가 상당히 감소된 반면 Cu와 Zn은 과거와 유사하거나 보다 확장된 경향을 보여 여전히 현저하게 오염이 진행되고 있음을 보인다. 특히 모든 원소들이 수계 하부지역에서 다시 농축되는 경향을 보임이 과거와는 다른 분산특징이다. 이에 대한 해석은 두 가지 관점에 설명될 수 있을 것으로 생각된다. 첫째는 하상 퇴적물과 하천수간에 일어나는 재용출-이동-재침적에 의한 결과 산물로 해석할 수 있으며, 둘째로는 이들 채취점이 농경지 하부 혹은 근접지임을 감안하여 농경활동에 의한 누적 혹은 비료나 농약의 사용증대에 따른 이차적 오염의 결과로서도 해석할 수 있다. 현 자료로서는 양자의 영향을 정확히 판별 규명할 수는 없으나 이에 대한 정확한 규명은 광산오염의 장기적 대책수립에 중요한 자료가 될 것이다. 따라서 이를 규명하기 위해 보다 장기적이고 세밀한 연구가 수행 되어져야 한다.

이상의 결과로부터 광산활동으로 야기되는 중금속 오염은 원소와 시간에 따라 분산 및 희석되어 부분적인 정화가 이루어질 수 있음을 보이나 보다 하부에서 일어날 수 있는 이차적인 부화대의 형성을 전적으로 배제할 수 없다. 이와 같은 이차 부화대는 하류에로의 오염원의 이동을 의미하며 인간 생활에 보다 근접한 직접적인 오염원으로 작용할 수도 있다. 따라서 오염원을 제거하지 않는 한 광산활동에 의한 중금속 오염은 자연적 자정작용만으로 정화되기에는 많은 시간이 소요될 것이며, 오염원인 폐석이 제거된다 할지라도 이미

중금속 오염이 심화된 하상퇴적물은 이차적 오염원으로서 작용하게 될 것이다. 그러므로 광산오염을 제어하기 위해서는 오염원인 폐석은 물론 하상퇴적물에 대한 고려도 병행되어야 할 것으로 판단된다.

종합 및 결론

소규모 금·은광산인 모악광산을 경유하여 흐르는 단일 수계의 하천수, 하상퇴적물, 하상동물 및 수계 주변의 육상 식물에서 보여지는 중금속 원소의 함량 및 분산특성과 하상퇴적물을 대상으로 중금속 함량 및 분산거동의 경년변화를 고찰한 결과를 요약하면 다음과 같다.

모악광산의 폐석을 경유하여 흐르는 하천수의 pH는 폐석 하부에서는 5.53으로 산성환경을 보이는 반면 전 수계는 6.14~6.94의 약산성 환경을 나타낸다. 각 시료 중에 함유된 모든 중금속 원소들은 광산지대에서 급격한 함량증가를 보인 후 하부수계로 가면서 감소되는 경향을 보였다. 오염원으로부터 거리에 따른 함량 감소율은 각 원소별로 정도의 차이는 있으나 전반적으로 볼 때 하천수 > 하상퇴적물 > 육상식물 > 하상동물 순이며 이는 매체에 따라 오염원의 확산정도가 다름을 보인다. 시료별 중금속 함량순위는 하상퇴적물 > 하상동물 > 육상식물 > 하천수 순으로 낮아지며, 원소별로는 하천수가 Zn > Cu > Cd > Pb의 순으로 농축되어 있는 반면 하상퇴적물과 육상식물은 Zn > Pb > Cu > Cd, 하상동물은 Zn > Cu > Pb > Cd의 순서로 농축되는 경향을 보인다. 이는 각 매체가 서로 다른 물질순환계를 형성하고 있기 때문으로 사료된다.

하상퇴적물에 함유된 중금속 원소의 존재형태는 광산의 상부수계에서는 모든 원소가 대부분 잔류상 형태로 존재하는 반면 하부수계에서는 불안정상인 철-망간 산화물 및 유기물과의 결합형태가 우세해지는 경향을 보였다. 이러한 경향은 Cu, Pb, Zn에서 특히 뚜렷하여 이들 원소가 모악금·은광산의 개발로 인한 주된 오염원소라고 판단된다. 또한 하상퇴적물은 이들 중금속 원소에 대해 이차적 오염원으로 작용할 가능성이 높다. 하상퇴적물 중의 중금속 원소 함량과 분산상을 1986년 자료와 대비시켜 본 결과, 광산폐석으로부터 공급되는 중금속 원소의 함량은 과거에 비해 전체적으로 감소된 경향을 보였다. 각 원소별 분산상의 대비는 Fe와 Pb는 과거에 비해 오염원의 확장범위가 상당히 감소된 경향을 보이는 반면 Cu와 Zn은 유사하거나 보다 확장된 경향을 보였다. 또한 모든 원소들이 하부수계에서 재농축되는 분산특징을 보였으며 이는 오염원의 이차적 부화현상으로 판단되나 농경지의 영향도

배제할 수 없어 이에 대한 보완연구가 필요하다.

하부수계 주변에 분포하는 농경지에서 산출된 농작물 중 백미와 고추의 중금속 함량을 조사한 결과 백미보다 고추에 중금속이 더 농축되어 있다. 원소별 함유량은 Zn > Cu > Pb > Cd로 각 원소의 지구화학적 이동성과 비례하며, 이들 중 Cd와 Pb는 양자 모두 허용기준치 이하인 반면 백미의 경우 Zn이, 고추의 경우 Cu와 Zn이 각각 높은 함량을 보여 오염이 진행되었음을 보인다. 그러나 수계 하부에 위치하는 마을 내의 우물에서 채취한 지하수중의 중금속 함량은 모두 음용수 기준치 이하로 상부폐석에 의한 중금속 오염은 없거나 매우 적음을 보였다.

참고문헌

김상현, 전효택 (1993) 삼보 연-아연-중정석 광산 주변 하상퇴적물에서의 중금속 오염 연구. 광산지질, 26권 2호, p.217-226.
 김옥배, 나춘기 (1987) 금속광산의 탐사를 위한 자연수지구화학 탐사법의 개발에 관한 연구. 광산학회지, 24권 4호, p.255-266.
 대한광업진흥공사 (1987) 시추조사보고서
 이재영, 김종근, 이인호, 이진국 (1993) 경북지역 폐금속광산이 환경에 미치는 영향. 광산지질, 26 권 4호, p.465-472.
 Anon, J. (1977) Ecological evaluation of proposed discharge of dredged and fill material into navigable water. Interim Guidance for Implementation of Section 404(b) of Public Law 92-500.
 Chapman, B. M., Jones, D. R. and Jung, R. F. (1983) Process controlling metal ion attenuation in acid mine drainage streams. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 47, p. 1957-1973.
 Foster, J. R. (1973) The efficiency of various digestion procedures on the extraction of metals from rocks and rocks-forming minerals. CIM bulletin Aug., p. 85-92.
 Hawkes, H. E. (1976) The downstream dilution of stream sediment anomalies. Jour. Geochem. Exploration, v. 6, p. 345-358.
 Na, C. K., Nakano, T., Ito, T., Sakagawa, M. and Kajiwara, Y. (1992) Analysis of the rare-earth elements in rocks using cation-exchange chromatography and inductively-coupled plasma atomic emission spectrometry. Ann. Rep. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba, no. 18, p. 94-97.
 Persaud, D., Jaagumagi, R. and Hayton, A. (1989) Development of provincial sediment quality guidelines. Ontario Ministry of the Environment, Water resources Branch, Aquatic Biology Section, Toronto, Ontario, Canada.
 Rose, A. W., Hawkes, H. E. and Webb, J. S. (1979) Geochemistry in mineral exploration, 2nd ed.. Academic press.
 Stumm, W. and Morgan, J. J. (1981) Aquatic chemistry, 2nd ed.. Wiley & Sons.
 Tessier, A., Campbell, P. G. C. and Bisson, M. (1979) Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Analytical chemistry, v. 51, p. 844-851.

1995년 5월 21일 원고접수