

국내 폐 광산 환경오염 실태 및 처리 현황

정영욱, 민정식 (한국지질자원연구원 탐사개발연구부)

Environmental Pollution and Reclamation in the Abandoned Mines in Korea

Young-Wook Cheong, Jeong-Sik Min

(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

요 약: 국내 폐석탄 광산은 334 개, 폐금속 광산은 약 900 여개로 알려져 있다. 이러한 폐광산에서는 환경오염과 지반침하 등 안전문제가 발생하고 있다. 폐광산에서 환경오염은 주로 폐갱도, 채굴적 그리고 광산폐기물 적치장에서 유출되는 산성광산배수 문제와 중금속이 함유된 광산폐기물의 침식 및 유실로 인한 주변 토양오염 등을 들 수 있다. 폐석탄 광산 및 폐금속 광산의 갱내수를 조사 분석한 결과, 일부 폐광산 갱내수들은 산성수이며 금속성분이 고농도로 함유된 폐수로 나타나고 폐탄광 배수의 수질은 지역적으로 차이가 있다. 폐광산 배수의 정화는 물리화학적 처리시 막대한 운영비가 소요되므로 폐갱도 석회석 충전과 소택지 등 자연정화처리법으로 처리되고 있다. 현재 폐금속 광산 폐기물은 환경오염 방지를 위해 주로 매립법으로 복구되고 있다.

주요어 : 폐광산, 광산배수, 광산폐기물, 중금속, 자연정화처리법

Abstract: There are 334 coal mines and about 900 metal mines abandoned. The environmental problems such as acid mine drainage from adits etc. and the subsidence has occurred in the abandoned mines. In addition, soil has been contaminated by tailings. According to analysis of mine drainages, some of them from adits in the abandoned coal and metallic mines were acidic and polluted by heavy metals. Especially, water quality of coal mine drainages were different by areas. Treatment of mine drainage by conventional chemical treatment has the drawback because the operating cost is very expensive. The treatment system used in mine drainage is the natural treatment system such as anoxic limestone drain in adits and the constructed wetland. The method of reclamation for abandoned waste rocks and tailings impoundments are mainly landfilling.

Keywords: Abandoned mine, Mine drainage, Waste rocks and tailings, Heavy metals, Natural treatment

1. 서 론

휴·폐 석탄 및 금속광산 지역에는 대부분 갱도 및 광산폐기물 (폐석, 광미) 적치장이 존재하고 있다. 폐 갱도에서는 오염된 갱내수가 지표 환경으로 유출되기도 하며, 광산폐기물이 유실되거나 혹은 침출수를 발생시켜 인근 수계 및 토양 환경을 오염시킨다. 이러한 갱내

수 및 침출수 유출 그리고 광산폐기물 유실에 의한 환경오염 정도는 폐광시 조처내용, 광산 개발 방식, 개발 정도, 지질, 광종 및 광산 주변 환경에 좌우된다. 이러한 휴·폐 광산의 갱내수 및 침출수와 광산폐기물에 의한 수질 및 토양 환경오염은 폐광지의 자연환경 오염과 폐광산 주변인의 민원을 초래하여 사회적 문제로 대두되고 있다.

이러한 폐 광산지역에서의 환경오염 발생은 폐광전 광업주가 적절한 환경오염 방지 조치를 취하지 못한 바가 주요 원인이지만 그 배경에는 법적·제도적인 측면에 기인하기도 한다. 즉, 폐광 이전에 폐광 계획 수립의 제도화가 없다는 점, 그리고 폐광시 환경오염 방지를 위한 기술적인 지표 및 복구 수준 등이 법제화가 없다는 점이다 (김대형 등, 2001). 또한 폐광 이후 5 년이 경과하면 광업권자에게 환경오염방지 명령을 취할 수 없는 법적인 한계도 있다. 이와 같은 법적·제도적인 상태에서 과거 폐광시 적절한 환경오염 방지 조치가 시행되지 않아서 현재의 폐광산 환경오염 문제가 발생한다고 본다.

현재 국내에는 폐탄광이 334개, 폐금속광이 900여개 이상 존재하고 있으며 이들 폐광산의 주변 환경 영향은 각 광산마다 다르다. 폐 광산의 환경오염 방지 사업은 산자부, 환경부 등 정부와 지자체에 의해서 추진되고 있다. 본 고에서는 국내 휴·폐광된 국내 석탄광 및 금속광 오염 현황 및 원인과 그리고 처리 실태 등을 요약하였다.

2. 휴·폐 광산 현황과 환경오염

2.1. 석탄광산

2.1.1. 폐광 현황

석탄광은 지난 8년간 (1989~1996) 석탄산업합리화사업 (폐광) 시행으로 비경제성 탄광 334개가 폐광되었다. 석탄 생산활동이 가장 활발하였던 지난 1988년도와 비교해 보면 가행탄광수는 약 96% 가 감소하였다. 현재 가행중인 탄광은 석공 및 민영탄광을 합해 총 11개이다 (표 1). 석탄산업합리화사업에 의해 일시에 많은 탄광들이 폐광되면서 환경오염 및 지반침하 등 안전 문제가 제기되었다. 정부는 석탄산업합리화사업단(이하 합리화사업단)을 신설하여 광해복구 전담부서를 통해 1995년부터 체계적으로 훼손된 산림, 갱내수의 유출, 폐석의 방치 및 폐공가 시설물 등에 대한 환경 정비 사업을 추진하고 있다 (석탄산업합리화사업단, 1997).

Table 1. History of coal mine industry

년 도	1988	1993	1996
가행광산수	345	70	11
생산량 (톤)	24,294,686	9,442,673	4,951,000
고용인력	64,031	19,461	10,889
합리화 탄광수	0	303	334

2.1.2. 폐탄광 갱내수 및 폐석 침출수 수질

광산이 가행중일 경우 채굴적 갱내수는 대부분 펌프에 의해 지상으로 강제 배수된 후 정화처리되어 방류된다. 그러나 폐광 이후에는 양수작업과 정화처리시설의 가동이 중단되므로 채굴적 크기 및 주변 지하수 환경에 따라서 수개월 혹은 수년내에 갱내수가 채굴적을 침수시키고 외부로 자연 배수된다. 이렇게 자연 배수되는 갱내수 수질은 여러 가지 조건에 따라서 다양한 수질을 나타낸다 (Table 2). 현재 폐탄광 334개중 136개의 탄광에서 1일 6만 여톤의 갱내수가 유출되고 있다.

Table 2. Summary of water quality of coal mine drainages (Min et al., 1993; 1995)

Areas	영동	영서	중부	서부	남부	기준치
시료수	14	3	12	16	5	
pH	3.54 ^① 2.41~6.00 ^②	3.71 2.74~4.95	5.81 2.36~7.9	6.48 3.19~7.96	6.24 3.98~7.48	5~9
Conductivity (mS/cm)	1.17 0.1 ~3	0.63 0.3~0.9	1.47 0.2~3.4	0.59 0.1~3	0.86 0.5~1.6	-
Al (mg/ℓ)	53 3.21~261	25 11~34	13 0.05~64	6.77 0.06~93	13 0.03~45	-
Fe (mg/ℓ)	123 0.12~724	20 3~49	27 0.02~194	2 0.05~8	4 0.12~9.89	10
Mn (mg/ℓ)	4.46 0.59~10.59	3 1~4	8 0.06~29	1.8 0.01~6	1.91 0.03~3.25	10
Zn (mg/ℓ)	0.35 0.03~0.99	0.69 0.26~0.97	0.43 0.00~2.25	0.26 0.01~1.38	0.23 0.02~0.45	5
Ca (mg/ℓ)	76 6.64~322	45 38~51	256 37~807	82 25~257	134 49~305	-
Mg (mg/ℓ)	47 4~260	22 11~33	85 4~392	39 3~245	54 19~109	-
SO ₄ ²⁻ (mg/ℓ)	915 42~3113	306 118~432	736 87~2407	259 30~2274	293 161~562	-

- ①: 평균, ②: 범위,
③: 방류수 수질기준

한편 폐탄광에는 지하 채굴 및 선탄 과정에서 발생된 폐석 폐석장이 있는데 이들 폐석장은 과거 폐광시 복토 등의 조치가 미흡했다. 따라서 폐석장으로 쉽게 강우가 유입하던가 혹은 지하수 등과 접촉하여 침출수의 발생이 가능하였다. 일부 폐탄광 폐석터미에서 유출되는 침출수를 분석한 결과 철, 알루미늄, 망간 및 황으로 심하게 오염된 pH 2.5에서 4.8 정도의 오염수가 확인되기도 한다 (Table 3).

Table 3. Water quality of drainages from the coal mine waste rocks

광산명	pH	Fe (mg/l)	Al (mg/l)	Mn (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)
영동	2.59	900	820	8.8	7290
“	2.53	519	255	10.6	3470
동해	2.72	345	207	10.1	2660
한성	2.82	84	330	33.9	2550
동원	4.81	0.03	4	0.57	70

국내 폐탄광의 갯내수 및 폐석 침출수 수질은 탄전의 지질학적 특징 차이, 폐광 년수 및 주변 환경 등에 의해 지역적으로 다른 경향이 있다. 강원도 영동(강릉, 삼척, 태백 등지), 영서(고한, 사북)지역 탄광 갯내수와 중부(문경)지역 그리고 남부지역(화순) 갯내수가 일반적으로 기타 지역보다 오염이 심한 수질로 조사된다. 이들 산성 갯내수 및 침출수에는 보통 Fe, Al, Mn, Ca, Mg, SO₄²⁻ 등이 일반 지표/지하수에 비해 고농도로 함유되어 있다. 이들 갯내수가 유입된 하천은 탁도 및 적갈색/흰색의 침천물이 생성되어 자연경관을 훼손시키고 있다. 강원도 태백시 일원의 황지천 수계(낙동강 수계)가 국내에서 대표적인 탄광 갯내수 오염 하천이다.

2.2. 금속광산

2.2.1. 폐광 현황

1999년도 산업자원부 광산물 수급현황을 보면 1984년 가행 금속 광산수가 151개였으나 1999년에는 26개에 지나지 않는다 (Table 4). 그러나 26개는 단지 통계상의 집계로 실제로 가행중인 금속광산은 수계에 불과한 실정이다. 현재 국내 휴, 폐광된 금속 광산수는 광구 등 록의 중복성을 배제하고 약 900여개로 추정되고 있다.

Table 4. Changes in numbers of metal mines

년 도	1984	1986	1988	1990	1992	1993	1995	1996	1999
광산수	151	107	83	61	36	34	29	33	26

2.2.2. 폐 금속광 갯내수 및 침출수 수질

일부 폐 금속광산에서 중금속이 함유된 갯내수, 광산폐기물에 의한 침출수 등이 유출되고 있으며 광미 등이 농경지 등으로 유입되어 토양오염이 우려되고 있다 (Table 5). 폐금속 광 갯내수 및 침출수 수질을 수질환경 보전법 시행규칙 제 40조 별표 11과 비교하여 보면 As, Cd, Pb, Zn, Cu 등 유해 중금속이 기준치 이상을 초과하여 방류되고 있다 (민정식 등, 1995; 1996; 1997; 1998; 1999). 금속광산의 갯내수 수량은 비교적 적으나 중금속 등이 존재한다는 점에서 석탄광 갯내수와 차이가 있다 (Table 6).

2.2.3. 광산폐기물의 화학적 특성

폐 금속광산 광미를 폐기물 용출 시험법으로 시험한 결과 (pH 5.8-6.3, 시료 1:용매 10) 중금속 등이 용출된다 (민정식 등, 1996). Table 7 에서 볼 수 있듯이 쌍전, 송천, 은치, 금장, 송천, 제 2 연화 광산 광미등에서 As, Cd, Zn, Fe, Al, Mn 성분이 용출되었다. 또한 광미 중에는 회수되지 않은 광물립이 존재하여 완전 분석시 일부 광미에는 납, 카드뮴, 구리, 비소 등 중금속이 수백 ppm 에서 수십 % 정도 까지 함유되어 있다 (정영욱 등, 1999). 그러나 광미 적치장은 인위적인 바닥 차수층 없이 축조된 것이 대부분이므로 광미적치장 하부 오염지하수의 유동에 의한 지하수 오염 가능성이 있다.

Table 5. Summary of water quality of metal mine drainages

수 질 광산명		pH	Fe	Zn	Cu	Cd	Pb	Mn	As
		5~9	10	5	3	0.1	1	10	0.5①
구룡	광미적치장 부근	●						●	
	광미적치장 하류	●						●	
근덕	폐갱도								●
광양	"	●							
대북	"	●		●		●	●		
일진	"	●							
전주일	"	●						●	
덕온	"	●							
달성	암반 용천수	●	●	●	●	●		●	
제일	폐갱도	●			●				
양구동	"	●		●		●	●		
일광	"	●	●	●	●	●	●		

● 기준치 초과, 단위: mg/l, pH 제외

Table 6. General comparisons of mine drainages from abandoned coal and metal mines

구 분	차 이	유 사
탄광배수	● 배수량 많음	<ul style="list-style-type: none"> ● 황, 철, 망간, 알루미늄 등이 주요 오염물질 ● 높은 경도 특징 ● 산성 ~ 중성 pH
금속광배수	<ul style="list-style-type: none"> ● 배수량 소량 ● Cd, As, Cu, Zn 및 Pb 등 중금속 함유 	

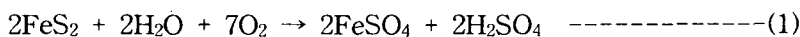
3. 폐 광산 환경오염 원인

광물의 채굴 혹은 처리과정에서 황화광물은 산소 및 물에 의해 산화작용을 받게 되고 유실되면서 지반 환경이 중금속으로 오염될 수 있다 (Fig. 1). 황화광물의 산화작용은 물과 산소가 존재하는 곳에서는 어디서나 가능하며 특히 지하수나 지표수와 반응하여 산성광산배수를 형성할 수 있다 (Fig. 2, 3, 4). 한편 황 혹은 철을 에너지원으로 이용할 수 있는 박테리아 (*Thiobacillus ferrooxidans* 및 *T. thiooxidans*) 등은 이러한 황화광물의 산화작용을 촉진시켜 산성광산배수를 생성시키는 요인으로 작용한다. 이러한 산성광산배수는 주로 채굴공동, 노천 채굴적, 절개지 그리고 폐석더미 혹은 광미적치장 주변에서 생성된다.

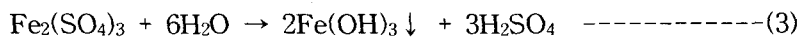
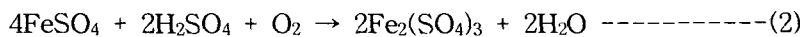
Table 7. Contents of soluble metals in some tailings(unit in mg/l).

광산명	As	Cd	Pb	Zn	Cu	Fe	Al	Mn
기린	0.04	<0.001	0.029	0.029	0.01	0.015	0.89	0.26
금장	0.052	0.50	2	55	0.550	<0.01	0.87	0.250
금정	0.039	0.016	0.075	0.790	0.017	0.01	1.03	5
다락	0.020	0.050	0.050	8	0.280	0.14	12	3
송천	6	0.16	2.35	43	3	332	14	0.21
쌍전	47	<0.001	0.17	0.13	0.21	42	0.94	0.055
울진	0.035	<0.001	2	0.760	0.084	22	5	1.450
은치	3	1.73	1.73	156	0.78	0.43	0.55	12
제2연화	0.092	0.042	0.200	4.100	0.010	0.04	1.08	15

산성광산배수의 생성과정을 요약하면 아래와 같다.

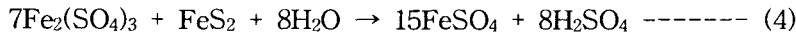


식1 의 화학반응에 의해서 2가철 및 산이 발생 된다.



용존된 2가철 이온은 다시 (식 2)에 의하여 3가철로 산화되면서 철 수산화물로 침전되며 동시에 산도(acidity)를 추가로 부과하게 된다 (식3). 이때 생성된 철 수산화물은 광산배

수의 유로에 노란색, 갈색 혹은 적색의 물질을 생성한다.



3가 철은 그 자체가 산화제이므로 (식 4)에 의해서 황철석이 산화될 수 있다. 따라서 일단 산성광산배수가 발생하면 산소가 없는 곳(수몰된 채굴적등)에서도 황철석의 산화작용이 진행될 수 있다. 이상의 황철석의 산화작용으로 부터 Fe 및 SO_4^{2-} 가 부화된 산성배수가 발생하게 된다. 일반적으로 금속광은 다양한 황화광물이 부존했던 장소이므로 금속광 배수에는 아연, 카드뮴, 납, 비소 등 중금속이 부화된다 (Table 8).

한편 광산개발 과정에서 발생한 폐석 혹은 광미등 광산폐기물들은 일정한 장소에 적치되는데, 상기 반응에 의해 중금속들이 용출가능한 상태로 변화하며 산성을 띄게 된다 (Fig. 4). 그러나 과거 광산개발 당시에는 광미 혹은 폐석 적치장 바닥은 침출수 누수 등을 방지할 수 있는 차수 시스템이 없이 원 지반에 보통 설치되었다. 또한 폐광 후에도 대부분의 광산폐기물 표면은 복토 등 상부 차수 등도 미미한 상태로 방치되어 왔다. 따라서 광산폐기물 적치장은 유해한 침출수가 발생할 수 있고 침출수 누출에 의해 지하수를 오염시킬 수 있다.

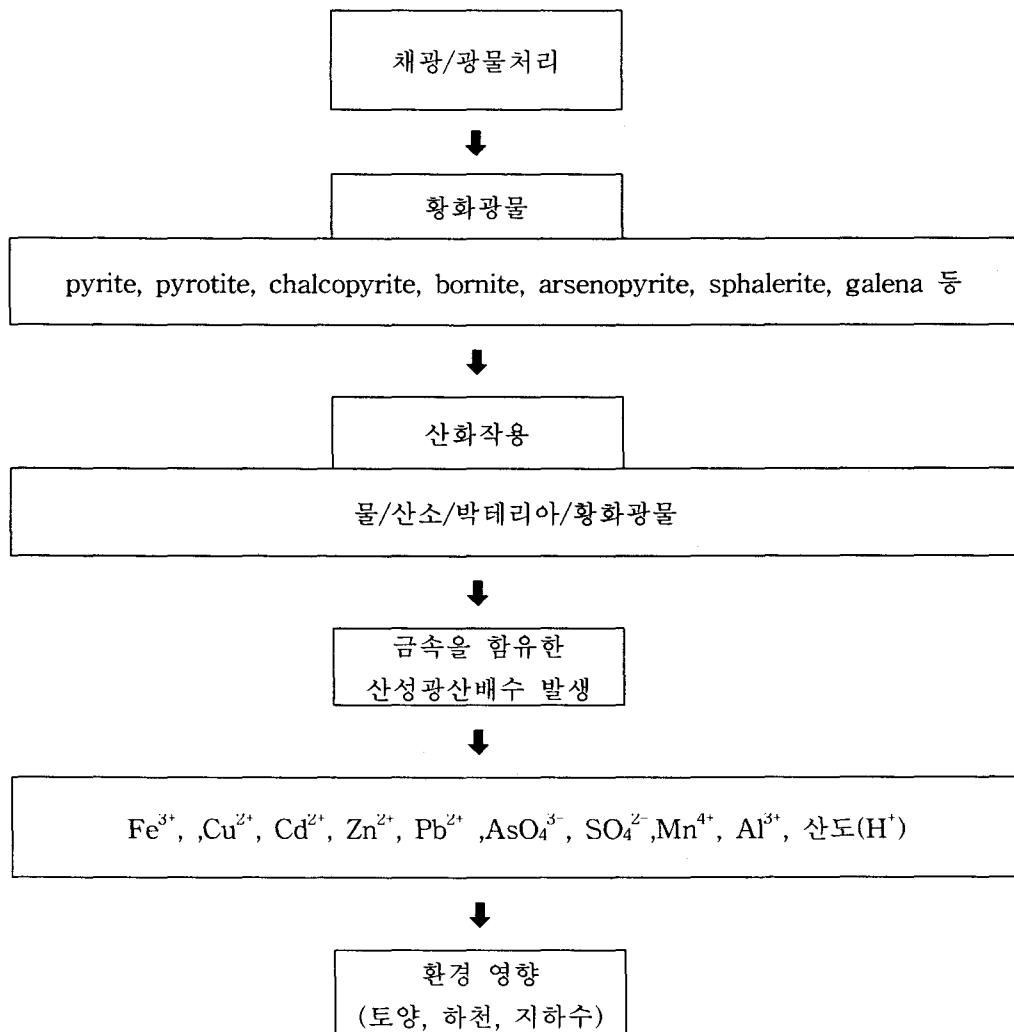


Fig. 1. Emission process of pollutants from the mining activity.

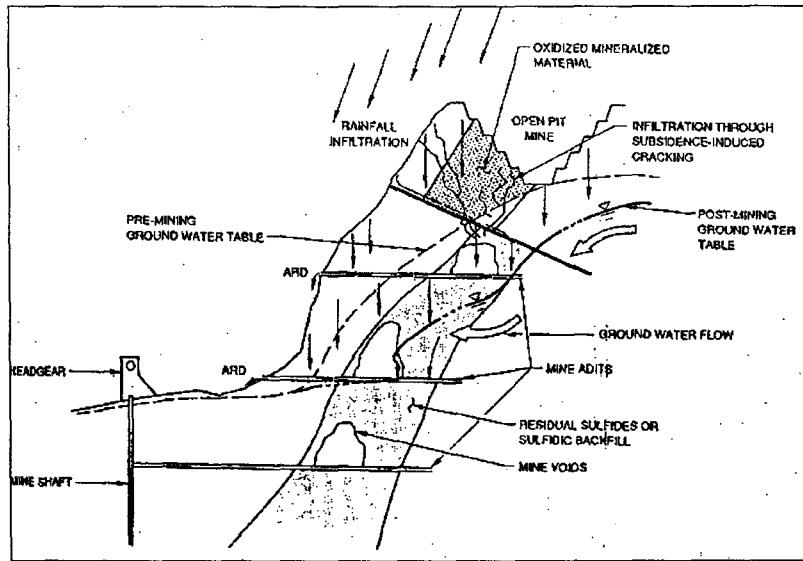


Fig. 2. Occurrence of acid mine drainage from underground (Hutchison and Ellison, 1992).

Table 8. Sulphide mineral and by products from oxidation

원소	광물	조성	산화산물	참고문헌
Fe	pyrite	FeS_2	Fe^{3+} , SO_4^{2-} , H^+	Hutchison and Ellison, 1992
	marcasite	FeS_2	"	"
	pyrrhotite	Fe_{1-x}S	"	"
Cu	chalcopyrite	CuFeS_2	Cu^{2+} , Fe^{3+} , SO_4^{2-} , H^+	"
	chalcocite	Cu_2S	Cu^{2+} , SO_4^{2-} , H^+	"
	bornite	Cu_5FeS_4	Cu^{2+} , Fe^{3+} , SO_4^{2-} , H^+	"
As	arsenopyrite	FeAsS	Fe^{3+} , AsO_4^{3-} , SO_4^{2-} , H^+	"
	orpiment	As_2S_3	AsO_4^{3-} , SO_4^{2-} , H^+	"
Zn	sphalerite	ZnS	Zn^{2+} , SO_4^{2-} , H^+	"
Pb	galena	PbS	Pb^{2+} , SO_4^{2-} , H^+	"
Cd	Zinc ores (ex: sphalerite)	as trace element exists in sulfide	Cd^{2+} , SO_4^{2-} , H^+	"

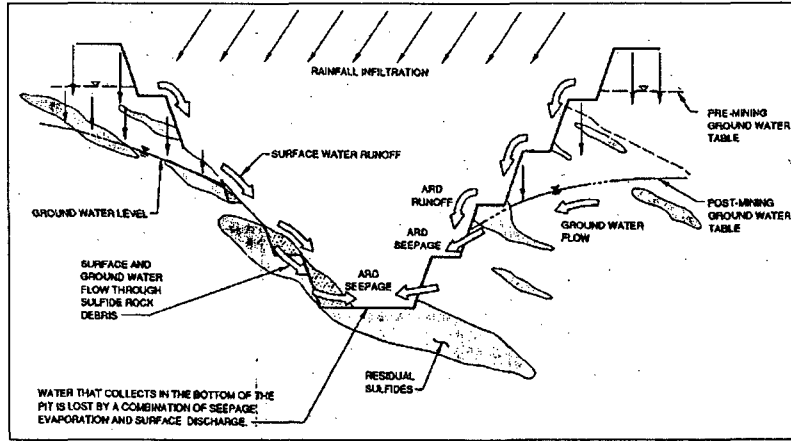


Fig. 3. Occurrence of acid mine drainage from the open pit (Hutchison and Ellsion, 1992).

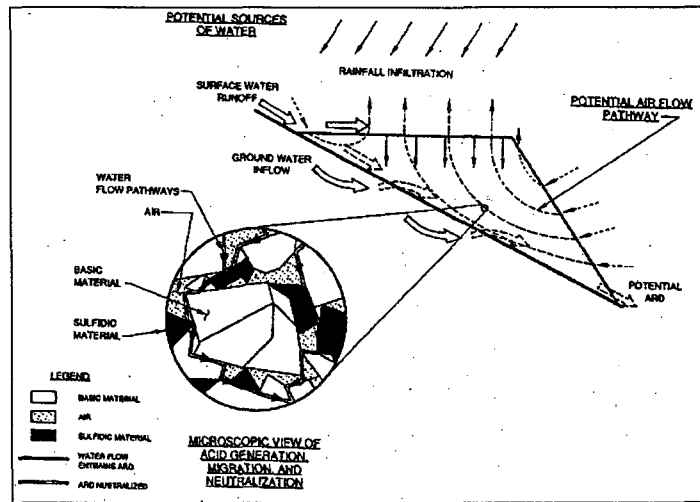


Fig. 4. Occurrence of acid rock drainage from waste rock piles on the slope (Hutchison and Ellsion, 1992).

4. 환경오염 방지 방법 및 사례

4.1. 광산 배수처리 방법

4.1.1. 물리화학적 처리방법

공장폐수 처리방법과 같이 화공약품과 기계력을 사용하여 광산배수를 정화하는 기술이다. 본 폐수처리 시스템은 보통 집수조, 혼합조, 응집조, 침강조 및 여과조등 폐수처리 공정을 구성하게 되며 시설운영비 및 화공약품비 그리고 인건비등이 지속적으로 필요로 한다 현재 운전비 문제로 폐광지역 광산배수 처리에 적용되지 못하고 있다.

4.1.2. 자연정화처리법

4.1.2.1. 소택지법

미생물의 생화학적 작용에 의해서 광산배수를 정화하는 자연정화식 처리 기술로서 인위적으로 소택지(늪지)를 조성하여 소택지 내부의 생화학적 반응을 통해서 광산배수를 정화한다. 본 방법은 물리화학적 처리 방법에 비해서 정화효율의 조절이 어렵고 운영상 계절적인 요소에 제약을 받는다. 그러나 물리화학적 폐수처리는 운영비 및 관리비가 지속적으로 소요되지만 본 자연정화식은 최소 유지비용이 소요되므로 현재 폐광지역에서 활용되고 있다. 소택지 개발 연구는 여러 연구자들에 의해 비교적 활발히 수행되어 왔다 (Cohen and Staub, 1992; Cevaal and Whiting, 1994; Dietz et al., 1994; Diebold et al., 1995; Cheong et al., 1997).

4.1.2.2. 배수법

본 방법도 일종의 자연정화식으로 갯도 혹은 광산배수 유로에 정화물질 즉, 석회석 등으로 배수층을 설치하여 광산배수를 흐르게 하면서 중화 혹은 오염물질을 제거하는 방법이다. 본 방법은 저렴하면서 시공이 간단하나 시간이 경과되면서 철산화물 등에 의한 배수층 피복 때문에 정화효율이 떨어지는 단점이 있다. 한편 이러한 단점을 보강하면서 소택지법의 부수공정으로 활용되는 혐기성 석회석 배수법 (ALD: Anoxic Limestone Drain) 등이 개발 활용되고 있다 (Hedin et al., 1994). 우리나라에도 일부 폐탄광 갯구에 본 방식이 채용되기도 하였다.

4.1.3. 갯구밀폐

폐갱도로부터 유출되는 배수 자체를 원천적으로 봉쇄하고자 하는 방법으로 정화 개념보다는 폐수량을 줄이는데 목적이 있다. 폐갱도에서 갯내수가 유출되는 경우 갯구를 밀폐시켜 산소의 유입과 접촉을 차단함으로써 황화광물의 산화작용 억제와 광산배수 유출량을 최소화시키는 방법이다. 갯구 밀폐시 갯내수에 의한 수압증가로 광산주변의 다른 연약 지반에서 누수가 되지 않도록 정밀한 지반조사와 함께 철저한 시공이 필요하다.

물리화학적 폐수처리 기술은 정화 효율면에서 우수하지만 부가가치가 없는 폐광지역에서 막대한 운전비가 소요되므로 현재 국내에서는 자연정화법에 의존하고 있다. 국내에서 시도된 폐광산 배수처리 시설은 모두 자연정화식 처리시설이다. 석탄광의 경우 폐갱도에서 유출되는 갯내수 중에서 pH가 5.0 이하, 철 농도 10 mg/l 이상, 유출량이 50 m³/일, 하천이 200 m 이상 적색 및 백색 침전물로 하천을 오염시킨 갯내수를 정화대상지역으로 하여 소택지 및 폐갱도 석회석 충전법(배수법)을 혼합한 처리시설이 26개 시공된 바 있다. 폐금속광산의 경우 대구광역시 달성광산에 소택지 자연정화시설이 1개소가 설치되었고 부산광역시 일광광산에 소택지가 설치될 예정이다.

4.2. 폐광산 폐기물 처리 방법

광산개발 당시 광산폐기물 (폐석, 광미) 적치장은 전통적으로 폐기물 저장과 재해 방지

를 위한 유실방지 차원에서 설치 및 관리되어 왔다. 따라서 그러나 황화광물이 다량 함유된 광산폐기물은 비록 유실이 없더라도 바닥차수 및 복토 등이 미미하여 산화작용을 받게 되어 유해한 산성 침출수가 발생, 주변 지표수 혹은 지하수를 오염시킬 수 있다 (정영욱 등, 1999). Fig. 5 는 황화광물이 함유되어 산성 침출수가 발생할 수 있는 폐기물처리법의 개념을 도식화 한 것으로 폐기물 표면의 복토, 하부에 차수층 설치, 혹은 알카리 물질의 혼합 혹은 지하수 유동 조절 방법 등 개념적 처리법을 포함하고 있다.

유해한 침출수를 생성하는 폐광산 지역 광산폐기물에 대한 처리법으로 전통적인 매립법, 고형화/불용화법, 토양세척법, 채굴적 충전방안, 폐기물처리장으로 이동 방안 등을 고려할 수 있다.

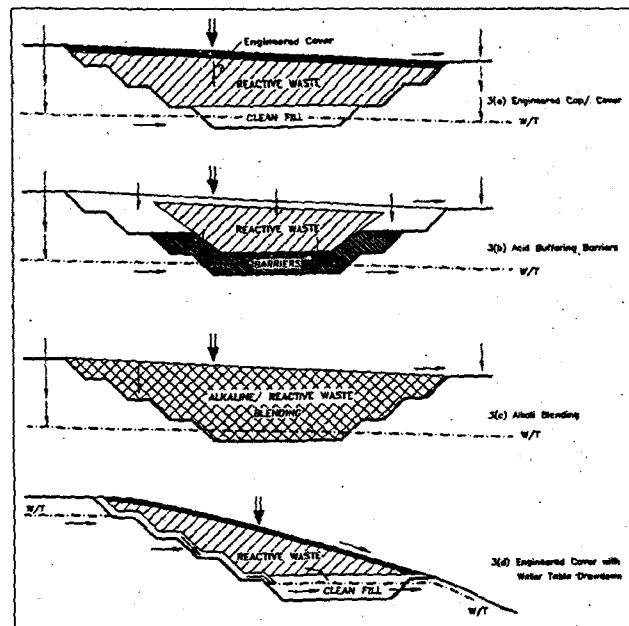


Fig. 5. Disposal concept for preventing occurrence of acid mine drainage from mine wastes (Orava, 1997).

4.2.1. 매립법

기존 광미장 혹은 광미 침전지에 옹벽 혹은 흙제방 등 광산폐기물 저류 시설을 축조하여 매립하는 방법으로 필요한 경우 각종 차수재와 복토 및 식재 등을 실시하여 광산폐기물을 관리하는 방법이다. 본 방법은 기존 폐기물 매립기술과 거의 동일한 방법으로 쓰레기 매립장 등에 이미 시공된 기술로서 현재 일부 폐 금속광산 환경오염방지 사업에서 설계 및 시공 중에 있다 (Table 9).

4.2.2. 고형화/불용화법

광미를 화학처리하여 광미 중에 존재하는 용출성 유해성분을 비이동화 하는 기술로서 유해성분을 안정화시킨 후 매립법 등에서와 같은 광미 저류시설을 축조하는 방안이다. 본 기술은 시공비가 많이 드는 단점이 있다. 본 방법으로 광산폐기물을 처리한 한 실적이 국내

에 전무하다.

Table 9. Cases of treatments of tailings impoundments

광 산 명	처 리 방 법
달성(텅스텐), 서점(금), 다락(금)광산	기존 적치장 하부에 차수재 시공, 광미를 재이동 적치한 후 차수재 및 토양으로 피복, 최종 표면은 식재. 광미 저류 시설은 옹벽
구봉 금광산	광미 정지 후 차수막/복토, 저류시설 옹벽
일광 동광산	폐광 함몰지 차수시공 후/ 광미 운반 매립 복토 예정
Cyprus Copper stone 광산 (금광), (미국, 아리조나, Parker)	두 개소의 광미장으로 분할, 각광미장 하부는 40mmPVC liner 포설 시공. 광미장 내부에 배수시스템 설치, 광미장 상부는 폐석 및 토양으로 매립, 광미장 상부 지반정리
Westmin Resources Limited (구리,아연,금,은광산) (캐나다, 밴쿠버, Myra Falls)	광미 및 폐석으로부터 산성침출수 발생, 폐석 및 광미를 정비하고 Shotcrete 로 표면을 처리, 광미장 주변은 우수배제 시설 설치할 것을 제안
Health Steel Mine (연,아연광산) (캐나다 New Brunswick)	광미장 혹은 폐석으로부터 유해성 침출수 생성 방지를 위해 복토방법 연구, 기반암 부분 차수재 포설, 광미 및 폐석 상부 토양 피복
Waker Mine(구리광산) (미국, Plumas County, California)	모든 광미 굴착, 새로운 지역에 광산폐기물 매립장으로 이동. 점토 liner(2ft) 차수층설치, 광미위에 1ft 점토층 포설 그위에 토양 포설(1ft)후 식재, 광미장 상부는 3% 구배. 광미중 주변은 우수배제 시설
Grey Eagle Mine (구리광산) (Siskiyou County California, Central Washington)	광미장 상부를 지반 정리. 상부로 차수재, 폐석, 벤토나이트 및 토양 순으로 피복 매립. 광미장 주변부에 우수배제용 관로 시설
Kjoli mine(구리광산) (노르웨이)	폐석 정리, 차수재 포설 그위에 토양 피복
Skorowas 광산 (노르웨이)	광산주변에 산재한 폐석을 주변 호수에 이동 침수시킨 후 주변 토양으로 피복후 호수의 딱을 높여 광미를 처분
City Resource Ltd(금광산) (캐나다 Graham Island)	산성침출수를 생성하는 광산폐기물을 배수 시스템이 갖추워진 곳에 적치하고 그위에 점토로 복토 매립.
Double Rainbow 광산(금,우라늄광산) (미국, Blackhills South Dakota)	폐석 및 광미사를 완전히 제거 광산주변 처분장으로 이동 알 카리 Fly ash와 섞은 후 매립. 복토

4.2.3. 토양세척법

광미 중에 존재하는 중금속을 화학약품을 이용하여 추출·농축하여 유해물질은 다른 곳으로 이동하고 나머지 비오염 광미를 현장에 되돌리는 기술이다. 토양세척시 발생하는 폐수 처리 문제와 농축된 유해 슬러지 처분이 본 방법의 단점으로 지적될 수 있다. 토양세척법으로 처리된 실적이 없다.

4.2.4. 채굴적 충전법

폐광산 주변에 존재하는 광산폐기물을 폐채굴적 및 폐갱도 등에 이송하여 폐기물 자체를 원래의 위치로 이동시키는 방안이다. 본 방법은 폐기물 자체를 시야에서 없앤다는 점, 별도의 용지가 불필요하다는 점, 침출수 발생 우려가 없다는 점 등 많은 장점을 지닌다. 그러나 채굴적 지하수에 의한 중금속 용출에 의한 2차 오염문제 우려와 채굴적 및 갱도에 대한 정보가 부족한 경우 시공시 안전문제가 발생할 수 있으므로 광산개발 현황과 지질 특성 등 사전조사가 필요하다.

4.2.5. 별도 매립장 이동 방안

폐기물 자체를 인근 지역에 별도로 마련하여 계획매립을 하던가 혹은 기존 매립장으로 이동하는 방안으로서 소규모 광산폐기물인 경우 가능한 방안일 것이다. 그러나 대부분의 문제가 되는 광산폐기물은 우선 광산 폐기물 자체가 대규모여서 이동하는 것 자체가 매우 어려우며 또한 이 과정에서 타지역 주민에 새로운 민원을 발생할 수 있어서 한계가 있다.

Table 9에서 알 수 있듯이 대부분의 광산폐기물 처리시 복토 및 차수막 그리고 배수시설 설치로 물의 침투를 차단하여 유해한 침출수 발생과 유출을 방지하는 방법이 주종을 이루고 있다. 그 외에 광산폐기물에 알카리 물질을 혼합 처리하던가 혹은 호수 및 채굴적으로 이동 처리하는 방법 등이 있다.

4.3. 향후 연구 개발 분야

현재 국내 폐광산 배수처리는 버섯퇴비, 우분 등 유기물질과 석회석 등을 충전시켜 소택지 형태의 자연정화처리시설을 시공하여 광산 배수를 정화시킨다. 그러나 인공 소택지가 광산배수를 처리하면서 발생하는 슬러지의 침전 등으로 향후 소택지의 복구시점이 도래할 것으로 예측된다. 따라서 향후 소택지의 재사용에 대한 연구와 함께 수명이 긴 자연정화기술이 개발되어야 할 것이다. 또한 현재의 소택지법으로 1일 1,000톤 이상의 광산배수 처리를 위해서는 상당한 면적이 필요하여 광산현장에서 부지를 얻기가 매우 어렵다. 따라서 이에 대한 대용량 폐수처리를 위한 자연정화기술 개발도 요구되고 있다.

국내 상당수의 폐광산 광산폐기물은 황화광물이 존재하고 지표면에서 산화작용을 받아 산성을 띤다. 따라서 광산폐기물 적치장 복원시 광산폐기물로부터 산성 침출수 발생을 최대한 억제하기 위한 알카리 특성을 갖는 플라이애쉬, 퇴비 등을 이용한 복토재 개발과 석회석 등 광물질을 이용한 적치기술 개발이 필요할 것으로 판단된다. 또한 침출수에 의해 지하수가 오염될 가능성이 있는 대규모 광산폐기물 적치장 복원시에는 막대한 공사비용이 소요되므로 바닥 차수 시스템을 설치하기가 거의 불가능하다. 따라서 지하수 오염 방지와 침출수 처리를 동시에 겸할 수 있는 연직 반응벽체 (Permeable reactive barrier) 개발도 필요하다고 본다 (Lee et al., 2000).

5. 결 론

국내 탄광 및 금속광 등은 대부분 휴·폐광된 상태로 수질 및 토양 오염을 유발시킬수 있는 오염원으로 인식되고 있다. 환경오염을 유발하는 주요 인자는 폐광도에서 유출되는 오염된 갱내수와 중금속이 함유된 광산폐기물이며 주요 오염물질은 산도 (acidity), 철, 알루미늄, 망간, 비소, 카드뮴, 아연, 납, 시안 등이다. 폐 광산 지역은 주로 4대강 유역의 발원지 혹은 상수원 상류지역에 위치하기 때문에 주민의 건강, 용수 확보 및 자연환경의 보전을 위해서 오염된 갱내수 및 유해성 광산폐기물 등 이들 오염원에 대한 처리가 중요하다.

현재 폐 탄광 및 폐 금속광산 갱내수는 대부분 소택지 혹은 석회석을 갱도에 충전하여 처리하는 자연정화처리 방식에 의해 정화 방류하고 있다. 폐탄광 폐석 처리는 대부분 토양 피복과 식재로 처리되고 있으며, 폐 금속광산 광미적치장은 상부차수 혹은 완전 밀폐식 매립방법 등에 의해 처리되고 있다. 이러한 폐광지역의 환경오염 방지 및 복원사업은 국가의 막대한 예산이 소요되므로 향후 경제적인 복원사업이 가능하도록 신기술의 개발이 지속되어야 한다고 본다. 이러한 기술개발 분야로서는 신속 저렴한 오염영역 탐지 방법, 자연정화식 광산배수 처리분야, 광산폐기물 적치장 오염 확산방지를 위한 연직반응 방벽 설계 및 시공 분야, 광산폐기물의 활용분야 등을 들 수 있다.

참고문헌

- 김대형, 이경한, 최걸, 유옥중, 조원재, 민정식, 정영욱, 2001, 광해방지 및 폐광산의 합리적 관리를 위한 제도개선연구: 한국지질자원연구원 연구보고서, 1-103.
- 민정식, 권광수, 조원재, 이동찬, 이명호, 이현주, 1993, 폐광에 따른 광산지역의 환경개선연구: 한국자원연구소 연구보고서, KR-93-7C-3, 5-106.
- 민정식, 권광수, 조원재, 홍영국, 홍성규, 정영욱, 1995, 폐광에 따른 광산지역 환경개선연구: 석탄사업합리화사업단 용역보고서 (기술총서 95-02), 1-268.
- 민정식, 정영욱, 이현주, 송덕영, 1995, 광산지역 광해 대책 연구: 한국자원연구소 연구보고서, KR-95(C)-37, 1-156.
- 민정식, 정영욱, 이현주, 이동남, 1996, 광산지역 광해 대책 연구: 한국자원연구소 연구보고서, KR-96(C)-41, 1-374.
- 민정식, 정영욱, 이현주, 이동남, 1997, 광산지역 광해조사 및 대책연구: 한국자원연구소 연구보고서, KR-97(C)-32, 1-479.
- 민정식, 정영욱, 이현주, 이상권, 1998, 광산지역 광해조사 및 대책연구: 한국자원연구소 연구보고서, KR-98(C)-48, 1-256.
- 민정식, 강선덕, 이상권, 정영욱, 이현주, 이진수, 1999, 광산지역 광해조사 및 대책연구: 한국자원연구소 연구보고서, 1999-R-T108-P-20, 1-170.
- 석탄산업합리화사업단, 1997, 사업단 10년사, 199-317.
- 이채영, 전연호, 이환, 김경, 2000, 반응벽체를 이용한 오염 지하수 및 침출수 처리: 침출수 처리 신기술 Symposium, 대전산업대학교 산업과학기술연구소, 107-129.
- 정영욱, 민정식, 권광수, 이현주, 1997, 광산폐수 정화용 소택지의 기질물질 효율성 평가: 한국자원공학회지, 34, 142-151.
- 정영욱, 민정식, 권광수, 김옥환, 김인기, 조영도, 송원경, 이현주, 최용석, 윤치호, 1999, 광산 폐기물 관리기술개발연구: 한국자원연구소 연구보고서, KR-99(B)-07, 1-176.

- Cevaal, J. N., and Whiting, D., 1994, Treatment of Mine Drainage Using Passive Biological System-Design and Results from a Full-Scale System: *The Mining Environmental Management Conference, Oct. 1994, Reno, Nevada*, 1-16.
- Cohen, D. R. H., and Staub, M. W., 1992, Technical Manual for the Design and Operation of Passive Mine Drainage Treatment System: *U.S. Bureau of Reclamation*, 6-22.
- Diebold, F. E., Drury, W. J., Chatham, W. H., Mueller, R., and Figueira, J. F., 1995, Wetland Project Phase II Wetland Demonstration Study Work Statement: *Montana Tech. of University of Montana, MT*, 1-27.
- Dietz, J. M., Watta, R. G., and Stidinger, D. M. 1994, Evaluation of Acidic Mine Drainage Treatment in Constructed Wetland Systems: *Proceedings of 1994 International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, April 24-29, Pittsburgh, PA*, 70-79.
- Hedin, R. S., Narin, R. W., and Kleinmann, R. P., 1994, Passive Treatment of Coal Mine Drainage: *USBM, IC-9389*, 2-35.
- Hutchison, I. G., and Ellsion R. D. 1992, Mine Waste Management: *Lewish Publishers, London*, 1-654.
- Orava, D., 1997, In-Pit Disposal for ARD Control: *In Short Course Notes on Waste Rock and Tailings Disposal Technologies for Reactive Waste Management, 4th International conference on Acid Rock Drainage, Vancouver, B.C. Canada.*