

국내 폐탄광 광산배수 자연정화처리시설의 가동현황 연구

지상우, 고주인, 김효범, 강희태*, 김재욱*, 김선준
한양대학교 지구환경시스템공학과, (재)자원산업연구원*
geochemistry@hanmail.net

요 약 문

27 passive systems in 21 mines constructed by The Coal Industry Promotion Board since 1996 were investigated to evaluate the treatment efficiency of systems and find problems in each system, which will eventually lead to the improvement or suggesting the alternative method of the passive treatment system. Problems in operation include overflow, leakage, inefficiency and unusableness. The efficiency of systems which has been evaluated by metal(Fe) removal rate and/or by acidity removal rate do not reflect the poor removal rate of SO_4^{2-} . Especially high concentration of SO_4^{2-} and high COD in the beginning of the operation would decrease the bacteria activity due to the lack of the nutrition. To solve the problem of overflow the upflow-type SAPS is being considered.

key word : passive treatment system, treatment efficiency, upflow-type SAPS

1. 서론

1989년부터 시작된 석탄합리화 사업으로 전국 379개 석탄광산 중 대부분이 폐광되고, 현재 10개탄광 75개 갱에서만 석탄이 채굴되고 있다⁽¹⁾. 폐탄광에서 발생하는 산성광산배수(Acid Mine Drainage)에 의한 주변 지표수와 지하수의 오염방지를 위하여 처리사업이 1996년부터 41개 탄광 55개 갱을 정화대상으로 하여 적용되기 시작하여⁽²⁾ 현재 27개 광산 33개 갱에 자연정화처리시설이 설치되어 운영 중에 있는데, 이들의 자연정화처리시설은 갱유출수를 SAPS(Successive Alkalinity Producing Systems), 소택지, 산화조 등을 통과시켜 처리하는 방식을 이용하고 있다.

가동중인 처리시설에 관한 몇몇 연구에서 처리시설의 효율과 가동상태에 대한 언급이 있었으나, 각 공정별 금속제거능력이나 일부 처리시설의 표면적인 문제점 지적에 국한되었다⁽³⁾. 자연정화처리시설에 대한 지속적인 사후관리나 문제점들을 해결하기 위한 기술적, 제도적인 조치의 필요성을 검토하고, 필요하다면 처리시설의 전반적인 개선 또는 대안을 위한 연구가 절실하다.

2. 본론

2.1. 가동상태

2001년 11월부터 2003년 2월까지 가동 중인 자연정화처리시설 중 21개 광산에 설치된 27개 시설에 대해 현장조사를 수행하고, 각 시설의 갱유출수와 처리 후 방류수를 건기(11~3월)와 우기(7~9월)로 나누어 채수하였다.

수소이온농도(pH), 산화-환원전위(Eh), 온도, 전기전도도 등은 시료 채취시 현장에서 측정하였고, 양이온은 기초과학지원연구원 서울분원의 ICP-AES를 이용하여 분석하였다. 음이온 중 HCO_3^- 은 적정법으로 측정하였고, 기타 음이온은 기초과학지원연구원 부산분원의 IC를 이용하

여 분석하였다.

Fig.1.과 같이 국내 자연정화처리시설은 일반적으로 개도를 석회석으로 충전(ALD)한 후 SAPS와 산화조, 소택지 순으로 광산배수를 처리하는데 각 광산별 광산배수의 특성(산도, 용존산소량, Fe 함량 등)에 따라 각 공정의 순서를 바꾸거나 추가 또는 생략한다.

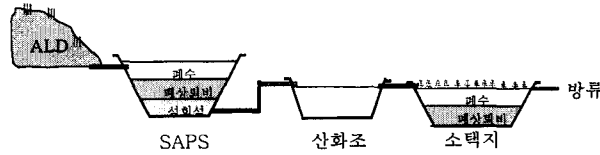


Fig. 1. 국내 자연정화처리시설의 일반적 공정 모식도

처리시설의 가동상태의 점검결과는 Table 1.에 실었다. 정상가동이라 함은 개구유출수가 처리시설 일련의 공정을 지나 배출되는 상태를, overflow 발생이라 함은 처리시설의 용량을 초과한 유출수에 의해 일부 혹은 상당량의 개구유출수가 처리공정을 거치지 않고 배출되는 것을 말한다. 누수 발생이라 함은 수로(연결배관) 혹은 수조의 파손에 의해 처리시설로 들어가지 할 유출수가 새어 나오는 것을 말한다. 처리시설 무용화라 함은 개구유출수가 처리장으로 유입되지 않아 처리시설의 이용 자체가 되어지지 않는 경우나 인접한 다른 광산의 영향으로 처리시설의 효과가 무의미해진 경우를, 가동불량이라 함은 누수나 overflow 없이 가동되고 있지만 최종배출수의 오염정도가 높아 처리효과가 없는 것을 말한다.

Table 1. 국내 자연정화 처리시설 가동상태

처리상태	시설수	해당 처리시설
정상 가동	12	함백(이목갱), 함백(미륵850갱), 함백(미륵750갱), 삼왕(875갱), 성원, 풍원, 한양, 삼왕(920/970갱), 동원-태홍(본갱), 동원-태홍(1070갱), 봉명-단봉, 석공-신성
overflow 발생	3	영동, 장차-갑정, 광진-동북, 호탄태백
누수 발생	6	한창, 함백(방제갱), 동해(동7갱), 황지(유창갱), 봉명(신사갱), 석봉-성봉
처리시설 무용화	3	함백(자미갱), 삼마-태정, 호남광업(2갱)
가동 불량	3	동원-광정, 와룡-태우

2.2. 처리효율

처리시설의 처리효율을 평가하는 데에는 주로 금속(Fe) 제거율을 사용하고 있다. 가동 시설중 27개소의 금속 제거율은 51~100%의 범위에서 평균 88%의 효율을 보이고 있다. 그러나 처리효율에 대한 평가를 Fe의 농도만으로는 종합적인 정화능력을 평가하기 어렵다. 오염정도를 정량적이며 종합적으로 기재할 수 있는 방안으로 제시된 산도⁽⁴⁾를 적용한 경우 산도 제거율이 낮은 일부 광산과 처리전 산도가 낮았던 광산을 제외한 평균 산도 제거율은 88%를 보이고 있다. 산도 제거율로 처리효율을 판단할 경우 금속농도가 낮거나 검출되지 않은 경우에도 처리효율을 알 수 있다는 장점은 있으나, 장기적으로 안정된 정화가 되고 있는가에 대한 평가를 내리기에는 부족하다. Table 2.에서 보여지는 바와 같이 SO₄²⁻ 제거율에 있어서는 처리효율이 불량하거나 오히려 농도가 증가하였다. 이는 다른 연구의 현장조사⁽³⁾에서도 유사하게 나타났으며, 처리시설의 주 공정인 SAPS나 소택지 내에서 일어나야 할 황산염환원 및 황화금속의 침전이 없다는 것을 의미한다.

Table 2. 국내 자연정화처리시설 정화효율 비교

처리시설	처리전				처리후				Fe 처리율(%)	Acid 처리율(%)	SO ₄ ²⁻ 처리율(%)
	pH	Fe	Acid.	SO ₄ ²⁻	pH	Fe	Acid.	SO ₄ ²⁻			
와룡-태우	-	-	-	-	2.12	158.0	471.9	3,941	-	-	-
영동	2.87	276.0	1,182	3,510	-	-	-	-	-	-	
삼마-태정	2.21	134.2	1,076	2,746	-	-	-	-	-	-	
황지(유창갱)	6.35	73.6	143.0	2,008	7.23	0.0	6.71	1,406	100	95.3	30.0
풍원	6.67	10.8	26.2	796.6	6.9	0.0	8.3	762.6	100	68.3	4.3
한양	6.38	18.9	41.7	834	6.66	1.91	7.1	723.8	89.9	82.97	13.2
동해(7갱)	5.8	127.0	241.0	1,413	2.98	20.1	125.5	763.7	84.2	47.93	46.0
성원	7.09	n.d.	0.71	574.3	7.54	n.d.	0.28	537.3	~	60.6	6.4
한창	6.60	13.3	25.9	247.7	8.3	0.032	0.64	218.7	99.8	97.5	11.7
합백(이목갱)	6.93	n.d.	4.59	52.1	7.04	1.14	75.66	52.4	~	~	~
합백(방제갱)	6.62	555	1,084	81.3	6.92	65	223.6	137.6	88.3	79.4	~
합백(자미갱)	6.63	18.5	38.1	170.3	-	-	-	-	-	-	-
동원-삼왕(875갱)	6.49	5.58	11.85	68.9	7.41	0.037	0.43	64.3	99.3	96.4	6.7
동원-삼왕(920/970갱)	6.42	4.48	10.93	138.2	7.35	0.042	0.68	127.4	98.6	93.8	7.8
동원-태홍(본갱)	6.26	8.82	18.4	92.2	6.3	3.48	8.7	93.1	60.5	52.72	~
동원-태홍(1070갱)	6.11	0.16	0.6	2.47	6.59	0.16	0.5	2.45	~	16.67	~
합백(미륵850갱)	6.32	1.16	4.6	69.4	6.19	0.57	2.3	69.1	50.9	50.0	0.4
합백(미륵750갱)	6.67	3.75	16.2	82.3	7.01	n.d.	10.3	81.4	100	36.6	1.1
동원-광정	-	-	-	-	2.35	91.4	512.7	820.8	-	-	-
봉명-단봉	7.5	n.d.	10.49	1,144	7.08	n.d.	0.57	975.6	-	94.6	14.7
석봉-성봉	2.11	0.275	788.2	2,289	3.43	n.d.	423.3	2,079	100	46.3	9.2
장자-갑정	4.77	n.d.	2.43	1,213	7.0	n.d.	0.29	1,189	-	88.1	2.0
봉명(신사갱)	2.73	26.2	305.2	1,009	7.77	0.08	14.0	221.8	99.7	95.32	78.0
광진-동북	6.31	0.37	0.7	71.3	6.67	0.0	0.01	68.2	100	98.6	4.3
호남광업(2갱)	5.54	32.7	73.4	541.3	6.65	0.0	13.1	792.2	100	74.0	~
호탄태백*	6.71	0.4	26	169.5	7.14	0.02	0.3	272	95	88.5	~
석공-신성	6.29	6.77	13.8	88.3	7.23	0.0	0.6	87.2	100	95.65	1.2

2.3. 자연정화 처리시설의 문제점 및 해결방안

자연정화처리시설이 금속의 제거와 pH를 높여주는 것에는 어느 정도 양호한 결과를 보이지만, 유입되는 광산배수와 처리된 유출수의 SO₄²⁻ 농도가 같게 나타나거나 오히려 증가되는 것은 장기간 처리시설이 운영될 때 처리효율이 떨어지고 유량이나 유속과 같은 환경의 변화시 금속이온이 재용출 될 가능성을 제시한다. 또한, 처리시설 가동 초기 수 십일간 다량의 유기물이 배출수에 녹아 나오게 되는데, 모형 SAPS실험에 의한 결과 초기 약 20일까지 COD 200~500mg/l를 보이다가 30일 이후 30mg/l 정도로 안정되었다. 실험에 사용된 유입 광산배수의 COD가 20~30 mg/l 이었던 것으로 보아 유출되는 COD는 기질물질이 녹아 나오는 것으로 볼 수 있다. 가동 초기에 쉽게 용해될 수 있는 부분이 대부분 용해되 버리면 가까운 장래에 황환원박테리아가 이용할 먹이가 부족하게 될 수 있고, 그 결과로는 황산염환원의 진행이 멈추거나 약화될 수 있다. 장인섭 등(2000)은 인공 광산배수 처리실험에서 약 20주 정도에서 유기물 소모로 인한 처리효율 감소현상 발생을 보고하였다⁽⁵⁾. 또한 시설 가동 초기에 발생하는 과량의 유기물을 함유한 배출수는 처리시설이 또 다른 환경오염원으로 작용하게 된다는 것이다. 현재 낮은 SO₄²⁻ 처리율과 고농도 COD 용출의 문제를 해결하기 위해 HRT(hydraulic retention time) 변화와 처리시설 유체 흐름 변화 등을 통한 접근이 연구 중에 있다.

황환원박테리아는 30~55℃에서 활발한 성장을 한다. 우리나라처럼 계절별 온도차가 심한 경우 차가운 광산배수의 유입으로 황환원박테리아의 활동이 급격히 줄거나 멈추게 될 수 있다.

영국의 Pilot System에서는 겨울철 저온환경에서 미생물활동이 저하된 상태에서 고농도의 광물 산도에 의한 처리효율 저하가, 미국 Colorado주 Burleigh Tunnel에서는 중성의 pH와 50~60 mg/l의 Zn 농도를 갖던 광산배수가 봄철 녹은 눈이 흐르며 pH 4.1, Zn 109 mg/l로 되어 유기질의 완충능력을 벗어나게 되어 처리가 불량해진 결과가 발생했다⁽⁶⁾.

광산배수에 Fe, Al의 부하량이 높으면 가동 수년 내에 SAPS 유기물층과 수층 사이에 형성되는 금속수산화물의 sludge가 유기물층의 투수율을 현저하게 떨어뜨려 흐름을 막게 된다. 따라서 혐기성 소택지 개념의 상향류식 SAPS를 적용하여 투수율감소로 인한 문제점 해결을 시도하고 있는데, 금속광산의 처리시설로 적용된 혐기성 소택지에서 발생하는 Channelling의 해결이 주요 관건이다⁽³⁾. 상향류식 SAPS는 유기물층 하부에서 광산배수가 서서히 상승하며 처리되므로 겨울철 온도에 의한 영향도 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 결론

1) 처리시설에 대한 현장조사 결과 15개 처리시설에서 overflow 발생, 누수발생, 처리시설 무용화, 가동불량 등 가동상태에 문제가 있는 것으로 나타났다.

2) 금속 제거율과 산도 제거율에서는 처리효율이 높게 나타났으나 SO_4^{2-} 제거율에 있어서는 처리효율이 불량하게 나타났다.

3) 처리시설에서 발생될 수 있는 문제로 낮은 SO_4^{2-} 제거율, 초기 고농도 COD 용출, 겨울철 황환원박테리아 활동성 저하 그리고 투수율 감소로 인한 overflow 발생 등이 있다.

4) 연구 중인 상향류식 SAPS는 유기물층 하부에서 광산배수가 서서히 상승하며 처리되므로 투수율문제와 겨울철 온도에 의한 영향 등의 해결방안으로 기대된다.

4. 참고문헌

- (1) 석탄산업합리화사업단, 2003, 석탄이야기 - 탄광별현황, 석탄산업합리화사업단 홈페이지 (http://www.cipb.or.kr/story/story_8.html)
- (2) 배봉구, 1996, 석탄합리화사업단의 광해복구 및 환경개선 사업활동, 대한자원환경지질학회 추계학술여행 - 폐탄광일대의 지질환경 오염과 광해복구, pp.2-15
- (3) 정영욱 외, 2001, 폐금속광산 환경오염평가 및 정화기술 연구, 한국지질자원연구원 KR-01 (연차)-07, pp.198
- (4) 황지호, 1998, 도계탄광 부근 산성광산배수의 환경지구화학적 특성과 처리에 대한 연구, 서울대학교 공학박사학위논문, pp.103
- (5) In Seop Chang, Pyong Kyun Shin and Byung Hong Kim, 2000, Biological Treatment of Acid Mine Drainage under Sulphate-Reducing Conditions with Solid Waste Material as Substrate, Wat. Res. Vol.34, No.4, pp. 1269-1277
- (6) Gusek, 2001, Why Do Some Passive Treatment Systems Fail?, <http://www.dartmouth.edu/~cehs/CAGsite/cleanup/treatment.html>

5. 사사

이 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호:3-5-1)에 의해 수행되었다.