

석탄광의 광산배수처리기술 현황 및 전망

정영욱

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

An Overview of Coal Mine Drainage Treatment

Young Wook Cheong

Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

This study was undertaken to summarize of the efficiencies of the passive treatment system and suggest future studies for the solution of mine drainage problem. Flow rates of mine drainage from the abandoned coal mines are about 80,000 ton/day. Contaminated mine drainages over about 50 ton/day of flow rate were treated by passive treatment facilities such as Successive Alkalinity Producing Systems(SAPS), oxidation pond and oxic wetland. Chemical analysis for 13 passive coal mine treatment facilities showed that SAPS was the core of treatment facilities because the variation of Fe removal rates was relatively smaller than any other processes and re-leaching of Fe was not measured. The performance and life of SAPS depended on decrease in permeability and retention time due to accumulation of sludge. It is inferred that upgrade of design of the passive treatment system and in-situ treatment using underground void will be necessary for the amelioration of the mine drainage with high metal loading rates.

Key words : Abandoned coal mines, mine drainage, passive treatment system, amelioration of the mine drainage

본 고에서는 우리나라 폐 석탄광 광산배수의 자연정화처리시설현황 과 향후 광산배수 수질개선을 위한 기술수요를 전망하였다. 우리나라 폐 석탄광에서는 현재 약 8만톤의 갯내수가 유출되고 있으며 약 50톤/일 이상 갯내수에 대해서 자연정화시설을 설치하여 갯내수 수질개선사업을 추진하고 있다. 13개 광산에 설치된 자연정화시설의 현장수질분석 및 설계내용을 검토한 결과 SAPS 공정이 Fe의 재용출 현상이 없고 성능면에서 편차가 적어 광산배수의 중화 및 금속 정화에 핵심 공정으로 파악되었다. SAPS의 정화성능 및 수명에 미치는 물리적 영향은 슬러지 누적에 의한 투수 계수 감소와 체류시간 등이었다. 향후 자연정화시설의 성능을 지속시킬 수 있는 기술개발과 오염부하가 큰 갯내수 처리기술과 채굴적 현장 수질개선 연구가 필요할 것으로 판단된다.

주요어 : 폐석탄광, 광산배수, 자연정화시설, 수질개선

1. 서 론

광해는 광산개발과정에서 행해지는 굴착, 암석의 파분쇄, 운반 및 광물처리시 발생하는 폐수유출, 먼지비산, 소음, 진동, 지반침하 등 자연과 사람의 피해로 규정할 수 있다. 우리나라는 1989년부터 추진한 석탄산업합리화정책으로 비경제적인 탄광을 폐쇄하였고 이 과정에서 1988년도에 347여개에 달하던 탄광이 2003년 현재 9개 대형 탄광만이 가행하고 있어 탄광의 광해 문제는 대부분 폐

탄광과 관련된다. 폐탄광 지역으로부터 유발되는 광해문제로서는 지반침하, 오염 갯내수 유출, 폐석, 산림훼손 및 폐시설 등이 있으며 갯내수 및 폐석은 환경오염과 관련된다(Sengupta, 1993; Hedín *et al.*, 1994). 우리나라 폐 석탄광산에서 지반침하는 71개소, 갯내수는 152개의 탄광에서 유출되고 있고, 311개의 탄광에서 산림이 훼손되어있으며 또한 2,732개동의 폐시설이 있는 것으로 보고되고 있다(서석승, 2002). 본 고에서는 환경오염과 관련된 폐석탄광의 광산배수(갯내수) 현황 과 처리기술 동향

*Corresponding author: ywc@kigam.re.kr

에 대해서 서술하였다.

2. 국내 폐탄광 광산배수 처리현황

2.1. 광산배수 유출현황

우리나라 폐탄광 갱내수량은 2001년 10월말 폐광한 (주)삼탄 정암광업소의 갱내수를 합산하면 338개의 폐탄광중 137개 탄광에서 하루 8만여톤 정도 유출된다. 그 중 강원지역 갱내수량이 가장 크며 전국 평균 수질은 pH 5.6, Fe 41.8 mg/l, Al 6.4 mg/l 정도이며 유출량의 74%이상이 pH 5.5이상으로 약산성이다(심연식, 2002). 일반적으로 영동 및 영서지역 그리고 중부지역의 일부 갱내수가 산성수 특성을 가지며 Fe, Al, Mn, Ca, Mg, Si, SO₄²⁻ 등으로 오염되어 있다. 광산배수는 탁도, 적갈색/백색 침전물을 생성하며 강원도 태백시 일원의 황지천, 고한사북의 동남천, 도계의 오십천 등이 대표적인 탄광폐수 오염 수계이다(민정식 등, 1997).

2.2. 광산배수 처리시설 현황 및 성능

폐탄광의 광해방지사업 수행기관인 석탄산업합리화사업단은 자체 기준을 설정 전국의 갱내수 정화대상 탄광을 59개로 선정하여 년차적으로 자연정화시설을 설치하여 수질 개선 사업을 추진중에 있다(Fig. 1, Table 1). 자연정화방법은 폐광지역의 현장조건에 따라서 흔히 크게 폐갱도 석회석 충전법(Limestone Drains), SAPS(Successive Alkalinity Producing Systems), 호기성 소택지법 등을 단독 혹은 복합적으로 연계하여 설계되고 있다. 최근 들어 광산배수(갱내수)의 오염부하 혹은 수리부하가 큰 영동탄광 및 함태탄광 갱내수에 대하여 중화 처리공정을 설치하여 수질개선사업을 실시할 예정이다.

합리화사업단의 자연정화시설의 규모는 SAPS의 경우 수심층을 1.5 m 로 할 때 광산배수의 체류시간이 4

일 내지 5일, 침전조의 경우, 수심 1 m로 할 때 광산배수가 1일, 호기성 소택지는 0.2일에서 0.3일 체류하도록 설계되고 있다(심연식, 2002). 자연정화처리시설은 1996년도 12월에 준공된 호탄태백광산 정화시설을 출발로 하여 2000년 현재 폐탄광에 23개의 처리시설이 설치 운영되고 있다(Fig. 1). 그중 갱내수 유입이 없던가, 정상적인 운전을 하지 않는 시설을 제외한 13개 자연정화시설을 조사한 결과(정영욱 등, 2001) 시설부지 면적은 최소 441m²부터 최대 5,504 m²였고 광산배수 유입량은 43톤/일부터 최대 2,000톤/일 이었다(Table 2). 처리시설로 유입되는 1일 Fe+Al+Mn 오염부하량은 하루에 약 65 gram(호탄태백)에서 최대 0.9 ton(영동탄광) 유입되는 것으로 나타났다. 또한 광산배수의 pH는 산성에서 중성까지 다양하였고 동해 동6갱 광산배수가 가장 낮은 3.81의 pH 값을 나타냈다. 처리시설을 구성하는 공정은 침전조, SAPS, 호기성 소

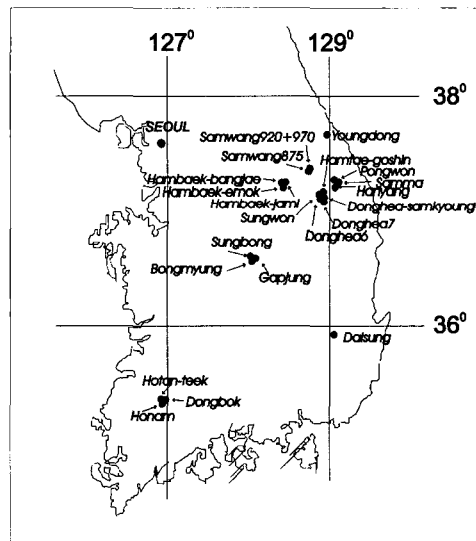


Fig. 1. Location of passive mine drainage treatment facilities.

Table 1. A plan of amelioration of coal mine drainage(Bae et al., 2003).

Region	Targeted abandoned mine (A)		Completed (B)		Future work (A-B)	
	Number of mines	flowrate (m ³ /d)	Number of mines	flowrate (m ³ /d)	Number of mines	flowrate (m ³ /d)
Kangwon	44	34,839	17	18,885	27	15,954
Kyungbook	7	2,491	4	2055	3	436
Chungnam	1	432	-	-	1	432
Chungbook	4	1,243	-	-	4	1243
Chola	3	479	2	77	1	402
Sum	59	39,484	23	21,017	36	18,467

Table 2. Summary of passive coal mine drainage treatment facilities.

Mine	Passive treatment facilities			Mine drainage		
	year	process	area (m ²)	flowrate (ton/day)	Fe+Al+Mn loading (g/day)	pH
Donghea7	98.08	S, P, OW	2,256	324	19,152	6.22
Donghea6	98.08	S, S, P, OW	4,724	269	50,160	3.81
Hambaek-Bangjae	98.07	S	1,260	100	1,013	6.89
Hambaek-Jami	99.01	S, OW	3,740	2,032	10,912	6.80
Samwang875	99.11	S, OW	3,055	870	1,862	6.74
Samwang 920+970	99.11	S, OW, OW	5,504	941	6,860	6.80
Pongwon	99.04	S, OW	500	83	1,681	6.95
Hanyang	99.01	S, OW	1,870	341	6,066	6.63
Youngdong	-	LD, P	924	1,943	947,407	4.08
Hotantabaek	96.12	P, OW, OW	441	43	65	6.73
Dongbok	99.01	S, OW, OW	1,614	200	244	6.42
Gapjung	99.04	P, S, S, OW	4,000	2,100	45,236	5.52

S: SAPS, OW: Oxidic wetland, P: Oxidation pond, LD: Limestone drain

Table 3. Average hydraulic loading rates in passive treatment facilities.

Process	HLR(m/d)
pond(n=5)	1.1
SAPS(n=11)	0.6
Oxidic wetland(n=15)	0.4

Table 4. Comparison of Fe removal rates.

Process	Removal rate of Fe(g/m ² /d)	
	Range	Mean(n)
Oxidation pond	-2.1~16.2	4.71(5)
SAPS	0.07~13.6	4.32(11)
Oxidic wetland	-0.1~1.6	0.43(15)

다(Table 2).

처리시설에 대한 공정별 Hydraulic Loading Rate(HRT)의 경우 침전조에서는 호탄태백에서 최소 0.17 m/d 갑정 및 영동에서 최대 2.10 m/d 로 나타나 광산별 수리학적 부하가 각각 달랐으며 갑정 및 영동 처리시설에 광산배수 수리부하가 가장 큰 것으로 나타났다. SAPS의 경우 동해 동 6갱 SAPS에서 수리부하가 0.11 m/d로 가장 적었고 갑정탄광 처리시설에서 최대 3 m/d 로 나타났다. 갑정 처리시설 조사 당시 광산배수는 SAPS의 배수구로 배출되는 량 이외에 상당량의 배수가 SAPS 경계초 밖으로 Overflow 되고 있었다. 처리시설별로 HLR이 침전조, SAPS, 호기성 소택지 순으로 그 값이 작아 침전조의 수리부하가 가장 컸다(Table 3). 13개 처리시설 단위공정별 1일 단위 면적당 (m²) 정화 능력을 계산하여 Table 4에 요약하였다.

2.2.1. SAPS 의 정화 성능

총 13개 처리시설중에서 SAPS 공정은 11개 처리시설에 설치되어 있는데 1일 1m²의 SAPS가 처리하는 Fe 의 량은 평균 4.2 g 으로서 동해동 6갱 SAPS의 경우 최대 13.6g을 정화하여 최고의 정화성능을 나타냈다. 석공 함백 자미갱의 SAPS는 1일 m²당 Fe을 0.07 g 정화하여 성능이 가장 낮게 나타났다.

2.2.2. 침전조 정화 성능

총 13개 처리시설 중 침전조(산화조)가 설치된 곳은 5개소 였다. 1m² 당 침전조가 정화하는 Fe의 양은 평균 4.17 g/d 였다. 최대의 정화 성능을 보인 처리시설은 동해동 7개의 침전조 였고 1m²의 침전조가 16.2 g 의 Fe를 정화 시켰다. 그러나 영동탄광의 경우 1m²의 침전조에서 2.10 g의 Fe 가 더 용출되었다. 영동탄광의 경우 침전조의 유입수량과 침전조의 설계용적을 고려하여 체류시간을 구해보면 약 12시간에 이른다. 2001년 11월 조사당시 철수산화물이 침전조용적의 대부분을 차지하여 퇴적되어 체류시간은 1.2시간 정도였다. 침전조는 SAPS 조에 비해서 정화성능의 편차가 매우 크게 나타났다.

2.2.3. 호기성 소택지 정화 성능

총 13개 처리시설에 호기성 소택지는 15개가 설치되어 있다. 1m² 당 호기성 소택지가 정화하는 Fe 량은 평균 0.43 g 이었다. 평균값으로 할 때 단위공정중에서 가장 저조한 성능을 나타내었다. 호기성 소택지중 Fe 정화성능이 가장 우수했던 처리시설은 동해 동 7개의 호기성 소택지였고 단위 m² 당 Fe를 1.7g 정화하였다. 그리고 호탄태백, 삼왕 920, 970 호기성 소택지에서는 Fe 가 재용출 하고 있는 것으로 나타났다. 이외에 나머지 호기성 소택지의 Fe 정화 성능은 단위 m² 당 1g에

서 0.01 g 정도의 정화 성능을 나타냈다.

자연정화처리 공정 중에서 Fe의 정화 성능은 평균값만을 고려하면 침전조, SAPS 및 호기성 소택지순으로 나타났다. 그러나 침전조 및 호기성 소택지의 경우 -2.1 g/m²/일 및 -0.1 g/m²/일의 Fe 정화 성능을 나타내 두 개의 단위 공정에서는 Fe의 용출 현상이 발생하였다. 이에 반해서 SAPS의 경우 Fe의 재용출 현상이 없고 성능면에서 편차가 적어 정화면에서 가장 안정적인 공정으로 평가할 수 있다(Table 4).

3. 광산배수 처리기술 동향 분석

3.1. 국내 동향

국내에서의 광산배수처리 연구는 1980년대 초반부터 한국동력자원연구소 등에서 시도하였고 그 당시는 개발 내용은 가행탄광에 필요한 물리·화학적 수처리 기술 개발 등 이었다(이춘택 등, 1983, 1984). 그러나 합리화 조치 이후 많은 수의 탄광들이 폐광하면서 갱내수의 기계 배수가 중단되고 수 개월후 중력배수에 의해 갱내수가 유출되면서 가행당시의 수질과는 다른 미처리 갱내수가 유출되면서 폐탄광지역에서 환경오염 문제가 이슈화 되기 시작하였다. 석탄산업합리화사업단은 물리화학적 수처리시설의 유지관리 비용 때문에 1990년대 중반부터 폐탄광 지역 갱내수 처리를 위한 자연정화처리기술을 미국에서 도입 설치하여 현재에 이르고 있다. 자연정화처리방법은 일정기간 정화성능이 우수하지만 정화처리시설 내부에 슬러지가 침전되어 침전조에서의 저수용량감소와 SAPS에서 투수계수 저하등으로 인해서 적절한 유지관리가 필요한 시스템이다. 또한 갱내수량이 크거나 오염부하가 클 경우 자연정화처리시설의 부지확보 문제와 시설내에서의 율수현상, 배관의 Clogging 문제, 슬러지 누적 등으로 이러한 문제를 해결할 수 있는 신기술이 요구되는 시점에 와있다.

한편 우리나라에는 현재 9개의 대형탄광이 가행중에 있으며 일일 배출되는 갱내수량은 수천~수만톤에 이르고 있다. 이러한 대형탄광은 시기를 달리하면서 중국에는 모두 폐광할 것이다. 광해의 효율적 관리를 위하여는 광산개발 초기단계인 개발 단계에서부터의 체계적인 광해관리계획 및 사전적 폐광대책 수립 여부가 향후 발생될 광해관리의 효율성 및 광해처리 비용절감에 있어 가장 중요한 요소가 된다(김대형, 2002). Warhust and Noronha(1999)는 광업활동에 의해 발생하는 총체적환경피해비용(Total Environmental Damage Cost)은 적절한 광해방지 및 폐광산 복원을 위한 계획

마련과 집행이 이루어진다면 크게 감소할 수 있음을 제시하고 있다. 즉 Fig. 2에서와 같이 광업활동기간을 X축의 X₂까지로, 광업활동에 따라 발생하는 환경피해비용을 Y축으로 할 경우, 만약 광해방지를 전혀 시행하지 않았다고 가정하면 총체적 환경피해비용은 A₁과 같이 시간이 지남에 따라 증가하게 되며, 광업활동이 종료되는 X₂시점 이후에도 환경피해가 계속되어 환경피해비용이 지속적으로 확대됨을 나타내고 있다. 만약 광산 가행 종료시점인 X₂에서 적절한 폐광산 복구를 시행할 경우 환경피해비용은 C₃를 정점으로 A₂와 같이 점차 감소할 것이며, 가행기간 중인 X₁에서 광해처리 및 폐광산 복구계획을 수립 운영할 경우 환경 피해비용은 A₃와 같이 가행 및 가행 종료 후 크게 감소할 수 있음을 나타내고 있다(김대형, 2002).

위에서 언급한 바처럼 대형탄광의 폐광 이후 갱내수에 의한 환경피해를 사전에 저감키 위한 사전광해방지 연구 즉, 폐광이후의 갱내수 수질 예측과 대용량 갱내수처리기술의 개발 연구가 필요할 것이다. 2001년도 11월에 폐광한 강원도 (주)삼탄 정암광업소의 갱내수는 현재까지 기계배수에 의해 평균 약 2만톤/일 유출되고 있으며 갱내수위는 폐광전 보다 100 m 상승한(침수) 상태로 Fe 함량이 증가하는 추세에 있다(Fig. 3; 강상수 등, 2003). 따라서 향후 대형탄광 폐광이후의 갱내수의 수질예측과 지하채굴적에 대한 사전 조치기술이 개발되어 과거와는 다른 계획적인 환경오염 방지 조치

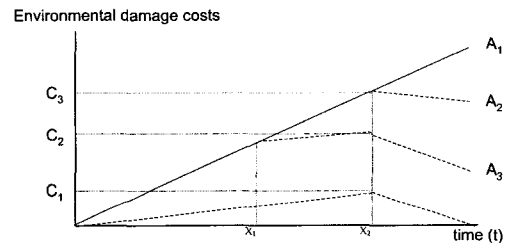


Fig. 2. Environmental damage and the remediation challenge.

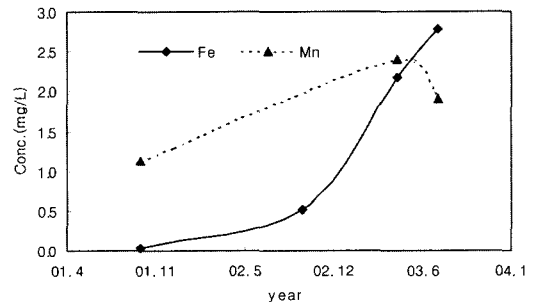


Fig. 3. Variation of Fe and Mn in mine drainage.

가 취해져야 할 것으로 판단된다.

3.2. 국외 동향

폐광산환경복원의 경우 국가의 폐광현장 특성이 판이하게 다르므로 개별국가별로 폐광산현장에 부합된 경제적인 기술을 개발하고 있다. 선진국의 기술개발을 분석하면 대부분 갭내수처리기술, 폐채굴적을 이용한 현장처리기술, 갭내수 유출방지 및 유해성 광산폐기물의 처리기술로 귀결된다. 즉, 경제적인 수처리기술(인공 소택지 기술개발, 미국 주도), 고밀도 슬러지처리기술(HDS), 지하채굴적 및 Pit lake 현장 처리기술개발(미국, 호주), 광산폐기물 적치장 안전처리(Capping, PRB, Mixing, Layering), 다기능 수처리약품 및 공급장치 개발 등이 그 예이다. 우리나라와 자원개발 방식이 유사했던 일본은 '74년부터 갭내수차단기술, 갭내수개선기술, 갭도처리기술과 퇴적장능화기술, 지반침하방지기술, 폐갱도충전기술 및 광산계획 관리기술을 그리고 최근 에너지 절감 폐수처리 기술과 함께 중화침전퇴적장의 수명 연장을 위한 고효율침전물 조립기술 연구를 수행중에 있다.

4. 결 론

우리나라 폐 석탄광에서는 현재 약 8만톤의 갭내수가 유출되고 있으며 50톤/일 이상 갭내수에 대해서 자연정화시설을 설치하여 수질개선사업을 추진하고 있다. 13개 광산에 설치된 자연정화처리시설의 현장수질분석 및 설계내용을 검토한 결과 SAPS 공정이 Fe의 재용출 현상이 없고 성능면에서 편차가 적어 광산배수의 중화 및 Fe 및 Al 등 광산배수중의 금속 정화에 핵심공정으로 파악되었다. SAPS의 정화성능 및 수명에 미치는 물리적 영향은 슬러지 누적에 의한 투수계수 감소와 체류시간 등이었다.

오염부하가 매우 큰 광산배수는 자연정화시설의 부지확보 문제점과 단기간내의 정화기능 상실로 경제적인 슬러지 발생량이 적은 수처리기술이 요구된다. 향

후 대형탄광의 폐광에 대비한 갭내수 수질악화예측 및 방지기술, 채굴적을 이용한 현장 수처리기술개발 연구가 필요할 것으로 기대된다.

참고문헌

- 강상수, 조원재, 정영욱, 홍성규, 임길재 (2003) 폐광을 대비한 가행탄광 광해방지대책 연구(II). 한국지질자원연구원 연구보고서, KR-03(C)-14, p. 46-50.
- 김대형 (2002) 국내 광해방지제도 현황 및 문제점. 광해방지 정책 및 기술심포지움, 한국지질자원연구원, 2002, 7월 19일, p. 57-77.
- 민정식, 정영욱, 권광수, 이현주 (1997) 폐탄광 및 폐금속 광 갭내수 수질오염방지대책. 한국자원연구소 논문집, 제1권, p. 63-71.
- 배위섭, 정영욱, 심연식 (2003) 폐탄광 자연정화시설의 효율적인 사후관리방안 연구. 한국지구시스템공학회, 제40권, p. 284-290.
- 서석승 (2002) 국내 폐광산 광해방지사업정책. 광해방지 정책 및 기술 심포지움, 한국지질자원연구원, 2002년 7월 19일, p. 3-18.
- 심연식 (2002) 폐탄광 갭내수 정화사업 추진현황과 대책. 광해방지 정책 및 기술 심포지움, 한국지질자원연구원, 2002년 7월 19일, p. 99-108
- 이춘택, 유시영, 강창희, 이동찬, 이상권, 김호영 (1983) 광해(폐수) 방지를 위한 강릉탄전의 산성폐수화 방지 대책 연구. 한국동력자원연구소, 92-석탄자원-9-15, p. 1-202.
- 이춘택 (1984) 석탄광 산성갭내배수의 중화처리법에 대한 설계기준. 한국동력자원연구소, p. 1-338.
- 정영욱 등 (2001) 폐금속광산 환경오염 평가 및 정화기술 연구. 한국지질자원연구원보고서, 198p.
- Hedin, R.S., Nairn, R.W. and Kleinmann, R.L.P. (1994) Passive Treatment of Coal Mine Drainage. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines, Information Circular 9389.
- Sengupta, M. (1993) Environmental impacts of mining: monitoring, restoration, and control. Lewis publisher, 494p.
- Warhust, A. and Noronha, L. (1999) Integrated environmental management through planning for closure from the outset: the challenges. In Environmental policy in mining, Lewis Publishers, London, p. 13-18.