

국내폐탄광의 산성폐수 오염도 평가에 관한 연구

최우진

수원대학교 공과대학 환경공학과

A Study on the Assessment of the Contamination by Acid Mine Drainage in Abandoned Coal Mines

Woo-Zin Choi

Dept. of Environmental Engineering., The University of Suwon

ABSTRACT

Temporal and spatial comparisons of acid mine drainage contaminated waters are difficult because of the complex physico-chemical nature of the pollutant. In the present study, an acid mine drainage index has been developed and evaluated for the assessment of surface waters. AMD index is calculated using a modified arithmetic weighted index using seven parameters which are most indicative of AMD contamination, i. e. pH value, sulphate, iron, zinc, aluminum, copper and manganese. Weighting is used to express the relative indicator value of each parameter. The proposed AMD index is used to quantify contamination from acid mine drainage over ten different old mine sites and assess the degree of impact on surface on surface waters. As a result of AMD evaluation, the Sukbong Mine located near the Moonkyung province showed lowest AMD value indicating the worst acid mine drainage quality. In overall, Youngdong mine sites showed higher contamination compared to the other mine sites including Youngsuh, Choongbu, Suhbu and Nambu area.

Key word : Acid mine drainage, Contamination, Assessment index, Abandoned coal mines

요 약 문

산성폐수에 함유된 오염물질의 물리적 화학적 특성이 매우 복잡하기 때문에 산성폐수에 의해 오염된 지표수나 지하수등의 오염정도를 지역적, 시간적 변화에 따라 비교하는 일은 쉽지가 않다. 본 논문에서는 산성폐수에 의해 오염된 지표수나 지하수의 오염도를 정량적으로 평가할 수 있는 수학적 지표를 제시하였으며, 오염지표를 이용하여 국내 폐탄광의 갱내 유출수에 대한 오염도를 검토하였다. 사용된 오염지표(Acid Mine Drainage Index)는 수질의 오염정도를 가장 잘 나타낼수 있는 7개의 변수 즉, pH값, 황산염(Sulfate), 철, 망간, 알루미늄, 구리 및 아연 함량을 이용하여 계산하였다. 사용된 변수는 오염도에 미치는 상대적인 중요도를 감안하여 가중치를 사용하였으며, pH값 및 황산염함량에 가장 높은 가중치를 부여하였다. 국내 폐광산에서 유출되는 산성폐수의 오염도 평가결과 경북 문경에 소재한 석봉탄광이 조사탄광중 상대적으로 오염도가 높았으며, 지역적으로 영동지역에 위치한 폐탄광의 갱내 유출수가 영서, 중부, 서부 및 남부에 위치한 폐탄광에 비해 오염도가 높게 나타났다.

주제어 : 산성폐수, 오염도 평가, 지표, 국내 폐탄광

1. 서론

산성광산폐수(Acid Mine Drainage, AMD)는 지표수를 비롯하여 지하수 및 주변토양환경을 오염시키기 때문에 비단 국내 뿐만아니라 세계적인 환경문제중의 하나이다. AMD는 산화환경에 노출된 황화광물이 산소 및 물과 반응하면서 생성되며 주변의 암석, 광물등과 반응하면서 경우에 따라 독성원소를 용해시켜 지표수, 지하수 및 토양환경을 유해중금속으로 오염시킨다. 국내에는 현재 140개가 넘는 폐탄광에서 유출되는 산성폐수의 양이 하루 57,000 m³이상이며 그로 인한 인접하천의 오염이 심각한 수준이다.¹⁾ 통상 산업부의 석탄산업합리화사업단에 따르면 폐탄광폐수의 수질은 철성분이 음용수 기준(0.3 ppm)의 수백 내지 1만배 수준인 2백 ~ 3천 ppm에 달한다, 또한 산도가 pH 4.0 미만으로 물고기가 전혀 살 수 없는 강산성을 띤다. 현재 폐광에서 흘러나온 폐수는 한강 수계인 지장천과 옥동천 68.8 km와 낙동강 수계인 황지천과 소도

천 44.7 km에도 흘러들어 주요 수계를 오염시키고 있다.

산성폐수에 함유된 오염물질의 물리적 화학적 특성이 매우 복잡하기 때문에 산성폐수에 의해 오염된 지표수나 지하수의 오염정도를 지역적, 시간적 변화에 따라 비교하는 일은 쉽지가 않다. 본 논문에서는 산성폐수에 의해 오염된 지표수나 지하수의 오염도를 정량적으로 평가할 수 있는 수학적 지표를 제시하였으며, 오염지표를 이용하여 국내 폐탄광 갱내 유출수에 대한 오염도를 검토하였다. 제시된 오염지표(Acid Mine Drainage Index, AMDI)는 수질의 오염정도를 가장 잘 나타낼수 있는 7개의 변수 즉, pH 값, 황산염(Sulfate), 철, 알루미늄, 망간, 구리 및 아연함량을 이용하여 계산하였다. 사용된 변수는 오염도에 미치는 상대적인 중요도를 감안하여 가중치를 사용하였으며, pH 값 및 Sulfate 함량에 가장 높은 가중치를 부여하였다. 일반적으로 pH 및 Sulfate 는 흡착과정에 큰 영향을 받지 않으며, 반면에 Sulfate 는 자연중화반응에 의해서도

크게 영향을 받지않는다. 본 연구에서 제시된 오염지표는 산성폐수에 의해 오염된 지표수나 지하수의 탐지 및 오염정도를 정량화 할수 있을 뿐 아니라, 오염에 따른 영향평가와 오염된 수질의 관리에도 이용될 수 있다.

2. 산성광산폐수에 의한 지표수의 오염도 평가

Scottish Development Department에서 1976년에 제시한 "water-quality index(WQI)"는 다음과 같다.²⁾

$$WQI = \sum_{i=1}^n q_i w_i \quad (1)$$

where, WQI is the water-quality index (being a number from 0 to 100),

n is the number of parameters,

q_i is the water quality of the i th parameter, and

w_i is the weighting attributed to the i th parameter.

제시된 위의 식에서 WQI값이 0이면 수질이 가장 나쁜 경우이며 반면에 WQI값이 100이면 수질이 가장 좋은 경우를 나타낸다. 그러나, 윗식은 관련인자중에서 하나라도 측정값이 나쁜 경우 전체적으로 민감도(Sensitivity)가 떨어지는 단점이 있다. 이점을 보완하기 위해 산술적인 가중치를 이용한 지표(식②)와 기하학적인 가중치를 이용한 지표(식③)를 제시하였다.

$$WQI = \frac{1}{100} \left(\sum_{i=1}^n q_i w_i \right)^2 \quad (2)$$

$$WQI = \prod_{i=1}^n q_i w_i \quad (3)$$

식(2)의 경우 각각의 수질인자와 가중치의 곱을 제공한 후 100으로 나눈값으로 표시되는 반면에 식(3)의 경우는 각각의 수질인자 값에 각 인자 가중치의 거듭제곱(power)을 곱하므로서 산정하였다. 그러나, 기하학적인 가중치를 이용한 지표의 경우 사용된 인자중에 한 개의 인자라도 그값이 0이면 WQI값이 0이 되는 문제가 있으며 또한 WQI계산에 상대적으로 장시간이 소요되는 단점이 있다.

Scottish Development Department에서는 식(2)를 이용하여 수질 오염도를 평가 하였으며, 수질 오염도 평가에서 사용된 10개의 변수(parameter)는 Table 1에 나타나 있다. Table 1에서 알수있듯이 평가에 사용된 변수는 용존산소, BOD, 암모니아, 대장균수, pH, 전도도, 총산화질소, 인, 온도 및 부유입자등이다. 사용된 변수는 중요도에 따라 가중치를 부여하였으며 용존산소의 가중치가 0.18로 가장 높았으며 BOD, 대장균 수, 암모니아 함량등에 상대적으로 높은 가중치를 사용하였다. Table 1에 제시된 변수는 일반적인 수질 특성평가에는 유익하나 산성폐수의 경우 pH값이 가장 중요한 변수중의 하나일 뿐만 아니라 또한 다량의 중금속 및 황산염 등을 함유하고

Table 1. Parameters and weightings used in Scottish Development Department water-quality index

Parameter identifier(i)	Parameter	Weighting (W _i)
1	Dissolved oxygen(% saturation)	0.18
2	BOD(mg/l)	0.15
3	Ammonia(as N) (mg/l)	0.12
4	pH	0.09
5	Total oxidized nitrogen(mg/l)	0.08
6	Orthophosphate(as P)(mg/l)	0.08
7	Suspended solids(mg/l)	0.07
8	Temperature(°C)	0.05
9	Conductivity(μmho/cm)	0.06
10	E. coli(no./100ml)	0.12
Total weighting(∑W _i)		1.00

있기 때문에 이들 변수를 사용하여 지표수를 지역적, 시간적 변화에 따라 상대적인 오염도 평가를 수행하는데는 한계가 있다.

본 연구에서는 식(2)를 바탕으로 다음과 같은 산성폐수 오염도 지표(AMDI)를 제시하였다.

$$AMDI = \frac{[\sum \text{water quality scores}]^2}{100} \quad (4)$$

제시된 AMDI의 water quality 값 (qiwi)은 국내 폐탄광 산성폐수의 특성을 가장 잘 나타낼수

Table 2. Parameters and weightings used in the calculation of AMDI

Parameter identifier(i)	Parameter	Weighting (W _i)
1	pH	0.20
2	Sulphate (mg/l)	0.25
3	Iron(mg/l)	0.15
4	Manganese(mg/l)	0.12
5	Aluminium(mg/l)	0.10
6	Zinc(mg/l)	0.10
7	Copper(mg/l)	0.08
Total weighting		1.00

Table 3. Water-quality ratings (q_{wi}) for acid mine drainage and contaminated surface waters and groundwaters

Score	pH	Sulphate (mg/l)	Iron (mg/l)	Manganese (mg/l)	Aluminium (mg/l)	Copper (mg/l)	Zinc (mg/l)
25		<10					
24		10-14					
23		15-29					
22		30-49					
21		50-99					
20	≥6.5	100-199					
19	6.2-6.4	200-299					
18	5.9-6.1	300-399					
17	5.6-5.8	400-499					
16	5.2-5.5	500-599					
15	4.9-5.1	600-799	< 0.05				
14	4.5-4.8	800-999	0.05-0.99				
13	4.1-4.4	1000-1499	1.00-4.99				
12	3.9-4.0	1500-1999	5.00-9.99	< 0.05			
11	3.7-3.8	2000-3999	10-24	0.05-0.49			
10	3.5-3.6	4000-5999	25-49	0.5-0.9	< 1.0		< 10
9	3.3-3.4	6000-7999	50-99	1.0-4.9	1.0-4.9		10-24
8	3.1-3.2	8000-9999	100-149	5.0-9.9	5.0-9.9	< 0.05	25-49
7	2.9-3.0	10000-11999	150-199	10-24	10-24	0.05-0.99	50-99
6	2.7-2.8	12000-13999	200-249	25-49	25-49	1.0-4.9	100-249
5	2.5-2.6	14000-15999	250-499	50-74	50-99	5.0-9.9	250-499
4	2.3-2.4	16000-17999	500-749	75-99	100-299	10-24	500-749
3	2.1-2.2	18000-19999	750-999	100-249	300-799	25-49	750-999
2	1.8-2.0	20000-21999	1000-1999	250-499	800-1199	50-99	1000-1499
1	1.5-1.7	22000-24999	2000-2999	500-749	1200-1999	100-249	1500-1999
0	≤1.4	≥25000	≥3000	≥750	≥2000	≥250	≥2000

있는 7개의 변수 즉, pH값, 황산염(Sulfate), 철, 알루미늄, 망간, 구리 및 아연함량을 이용하여 계산하였다. 사용된 변수는 오염도에 미치는 상대적 중요도를 감안하여 가중치를 사용하였으며, pH 값 및 sulfate 함량에 가장 높은 가중치를 부여하였다. 변수에 대한 가중치는 다음 사항등을 고려하여 정하였다. 즉 산성폐수의 희석 전 후 함유된 변수들의 농도, 이들 변수의 흡착특성, 농도에 대한 중화효과, 산성폐수 형성에 따른 상대적 농도 및 분석시 한계농도 등을 고려하였다. Table 2는 사용된 변수의 가중치를 보여주고 있으며 황산염이 0.25, pH 0.2 등으로 다른 변수에 비해 상대적으로 높은 가중치 값을 부여하였다. 그 이유는 pH나 황산염은 흡착과정에 비교적 영향을 적게 받으며, 반면에 황산염은 중화반응에 의해 서도 크게 영향을 받지 않기 때문이다. Table 2에서 제시된 가중치 값을 바탕으로 각 변수의 측정값 범위에 따라 $q_i w_i$ 값을 제시하였다. Table 3은 각변수에 대한 $q_i w_i$ 값을 보여주고 있으며 각 변수에 해당되는 score를 모두 더해서 제공한 값을 100으로 나누어서 AMDI 값을 산정하였다.

Table 4 는 AMDI 값의 계산을 한예로 보여주는 표이며 pH값이 2.9 인 경우 Table 3으로부터 $q_i w_i$ 값이 7임을 알 수 있다. 동일한 방법으로 나

머지 변수에 대한 $q_i w_i$ 값을 정한 후 이값을 모두 더해서 제공한 값을 100으로 나누므로서 AMDI 값 10.2를 얻었다. 본 연구에서 제시한 AMD 지표 (4)식은 상기의 7개 변수중 자료가 없는 경우에도 AMDI 값의 계산이 가능하다. 즉, Al함량에 대한 자료가 없는 경우 합산한 $q_i w_i$ 값에 Al에 대한 가중치 0.1을 제외한 0.9로 나눈후 얻어진 값을 100으로 나누어서 AMDI 값을 구할 수 있다. 예를들면 Table 4 에서 알수 있듯이 Al 함량에 대한 자료가 없으면 합산한 $q_i w_i$ 값 32에서 3을 제외한 29를 0.9로 나눈후 얻어진 값을 제공하여 100으로 나누면 Al을 포함하여 계산한 AMDI 값 10.2와 동일한 값을 얻을수 있다.

3. 국내폐탄광 산성폐수의 오염도 평가

Table 5는 본 연구에서 제시한 (4)식을 사용하여 국내주요 폐탄광 갱내 유출수에 대한 오염도를 평가한 결과이다. 본 자료는 석탄산업 합리화 사업단에서 1996년 3/4분기에 측정된 자료에 근거한 것이다. 분석자료에 의하면 아연 및 구리함량에 대한 자료가 미비하나 앞서 언급하였듯이 주어진 자료 범위내에서 AMDI 값을 계산하였다. 표에서 알수있듯이 AMDI값이 가장 나쁜 폐탄광의 갱내 유출수는 문경에 소재하고 있는 석봉탄광으로 AMDI값이 27.5이었으며, 이 값은 정선 함백탄광의 60.9에 비해 AMDI 값이 33이나 낮게 나타났다. 또한 강릉 와룡, 태백 성원, 평창 대용 및 화순지역의 동양탄광등이 상대적으로 오염도 지표가 낮았으며, 따라서 이들지역의 오염도가 높음을 알수있었다. 문경소재의 석봉광산은 석탄산업합리화사업단에서 AMD처리를 위한 자연정화시설을 1997년 11월에 준공하여 이 지역의 수질이 크게 개선될것으로 기대된다. 또한 본 논문에서 AMDI값이 비교적 낮게 제시된 태백의 소도천 유역의 함태 및 성원탄광과 정선

Table 4. Example of AMDI calculation

Parameter identifier(i)	Parameter	Value	Water quality score($q_i w_i$)
1	pH	2.9	7
2	Sulphate(mg/l)	13,750	6
3	Iron(mg/l)	820	3
4	Manganese(mg/l)	46	6
5	Aluminium(mg/l)	359	3
6	Copper(mg/l)	16	4
7	Zinc(mg/l)	794	3
(Summation of scores) ² = 32 ² = 1024 Divide by 100 to give an AMDI of 10.2			

지역의 함백탄광 그리고 삼척 오십천 수계에 위치한 탄광에 대해 석탄산업합리화사업단에서는 1997년부터 수질정화사업이 추진되고 있다. 내년 중에는 정선, 평창 및 강릉지역을 비롯한 문경지역의 폐탄광지역에도 수질정화사업이 계속될 예정이다. 폐탄광의 산성폐수문제는 상당히 장기간(보통 50년이상)에 걸쳐 하천 생태계에 영향을 미치기 때문에 이들 폐광지역에 보다 적극적인 AMD 처리방법이 강구되어야 할 것으로 사료된다.

Table 6 는 한국자원연구소에서 지난 1993년부터 1994년에 걸쳐 조사된 50개소 폐탄광 주변의 수질특성을 나타낸 것이다.⁹⁾ 본 표에서 알수 있듯이 탄광지역의 지질학적 특징의 차이, 폐광년수등에 의해 지역적으로 다른 수질특성을 나타낸다. 영동지역의 조사된 14개 탄광의 평균 AMDI 값은 37로서 중부, 서부 및 남부에 위치한 폐탄광 산성폐수에 비해 훨씬 오염도가 높게 나타났다. 지금까지 조사된 자료만으로 폐탄광 주변의 수질 오염도를 상호 비교분석하는데는 어려움이 있으며, 따라서 향후 폐탄광 주변의 지표

수, 오염 및 오염되지 않은 하천수등 광범위한 시료를 분석하므로써 산성폐수에 의해 오염된 수질의 오염정도를 지역적, 시간적변화에 따라 정량화하는 것이 가능하다. 또한 본 연구에서 제시된 오염지표는 산성폐수에 오염된 지표수나 지하수의 오염정도를 정량화 할 수 있을 뿐만 아니라, AMD의 Sources 및 Sites에 따른 영향을 비교하는데도 유익하다. 일반적으로 폐탄광갱내 유출수의 경우, 유량의 크기도 지표수등의 오염정도에 큰영향을 미치기 때문에 향후 오염도 지표산정에 있어서 유량의 영향도 검토가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

4. 결론

- 본 논문에서는 산성광산폐수에 의해 오염된 지표수나 지하수의 오염정도를 평가할수 있는 수학적 지표를 제시하였다. 오염지표(AMDI)는 수질의 오염정도를 가장 잘 나타낼수 있는 7개의 변수 즉, pH값, 황산염(sulfate), 철, 알루미늄, 망간, 구리 및 아연함량을 이용하여

Table 5. 폐탄광 갱내유출수 오염현황

(단위 : mg/l)

지역	광산명	유출량(톤/일)	pH	Fe	Al	Mn	황산이온	AMDI
강릉	(외룡)태우	778	4.0	208	32	2	911	32.8
태백	함태탄광	982	5.2	131	15	5	1,134	40.2
	(성원)원진	49	2.6	33	16	1	577	32.9
정선	자미원	570	2.6	58	5	1	176	38.7
	석공-함백	2,160	6.5	26	0	5	514	60.9
평창	대용	121	2.6	78	11	1	282	35.7
문경	갑정	765	5.9	31	0	1	705	57.2
	(석봉)성봉	190	3.3	119	54	7	1,320	27.5
단양	단양광업	613	6.2	17	0	8	714	59.0
화순	동양	120	2.9	16	55	1	756	32.9

※ '96년 3/4분기 측정결과 (자료 : 석탄산업합리화 사업단)

Table 6. 산성광산폐수 수질특성분석

(단위 : mg/l)

구분 지역	조사된 탄광수	pH	SO ₄ ²⁻	Al	Fe	Mn	Zn	AMDI	대표적 탄광
영동	14	3.54	915	53	123	4.46	0.35	37	동해, 황리
영서	3	3.71	306	25	20	3	0.69	49	삼탄, 동원
중부	12	5.81	736	13	27	8	0.43	53	함태(대정)
서부	16	6.48	259	6.77	2	1.8	0.26	72	영보, 신성
남부	5	6.24	293	13	4	1.91	0.23	70	호남, 동양

※ 농도값 평균치임

(자료 : 민정식 외, 1993-1994)

계산하였다. 사용된 변수는 오염도에 미치는 상대적인 중요도를 감안하여 가중치를 사용하였으며, pH 및 황산염 함량에 가장 높은 가중치를 부여하였다.

- 본 논문에서 제시한 오염도 지표의 장점은 오염의 수준을 측정할 수 있는 물리적, 화학적 인자(physico-chemical parameters)를 모두 고려하였으며, 일부 인자에 대한 자료가 부족한 경우에도 오염지표를 추정하는 것이 가능하다.
- 제시된 오염지표를 이용하여 국내 폐탄광 갱내유출에 대한 오염도를 검토하였다. 경북 문경에 소재한 석봉탄광이 조사탄광중에서 상대적으로 산성폐수에 의한 오염도가 높았으며, 지역적으로 영동지역에 위치한 폐탄광에서 유출되는 갱내 유출수가 영서, 중부, 서부 및 남부에 위치한 폐탄광 산성폐수에 비해 훨씬 오염도가 높음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 석탄동향, 제 205호, 석탄산업합리화 사업단, 1996.
2. Scottish Development Department, Development of Water Quality Index, Report AR3, Edinburgh, 1976.
3. Sengupta, M., Environmental Impacts of Mining, Lewis Publishers, 1992.
4. Michaud, L.H., Recent Technology Related to the Treatment of Acid Drainage, Earth & Mineral Sciences, Vol. 63, 1995.
5. Kelly, M.G., Mining and the Freshwater Environment, Elsevier Applied Science, London, 1988.
6. Malhotra, D and Tuka, R. F., Overview of Water Treatment Technologies, Emerging Process Technologies for a Cleaner Environment, eds. S. Chander, P. E. Richardson and H. El-shall, SME, Littleton, CO., PP. 169-173, 1992
7. Choquette, M., Gelinas, P. and Isabel, D., Monitoring of Acid Mine Drainage : Chemical Data From the Neutral Drainage (MEND) Program, MEND Report 1. 14. 2, PP. 1-95, 1994.
8. 권광수, 국내 휴·폐광산의 환경영향분석 및 활용방안, 휴·폐광산의 환경오염 복구 및 활용방안에 관한 심포지움, 1997.

9. 최우진, 광산폐수 처리기술의 개발현황, 한국 자원공학회지, Vol. 32, No. 2, pp.204~ 208, April, 1995.
10. 최우진, 산성폐수에 의해 오염된 지표수의 오염도 평가에 관한 연구, 한국토양환경학 회 춘계학술발표회 논문집, 고려대학교, 5월 16일, 1997.
11. Kleinmann, R. L. P. Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation, *Min. Eng.* 33(3):300~305 (1981).
12. Singer, P. C. and W. Stumm. Acid mine drainage: the rate-determining step, *Science* 167:1121~1123 (1970).
13. Nordstrom, D. K. Hydrogeochemical and Microbiological Factors Affecting the Heavy Metal Chemistry of an Acid Mine Drainage System, Ph.D. thesis, Stanford University, Stanford, CA (1977).
14. Dugan, P. R. Bacterial ecology in strip mine areas and the relationship to the production of acidic mine drainage, *Ohio J. Sci.* 75(6):266~279 (1975).
15. Kleinmann, R. L. P. *Thiobacillus ferrooxidans* and the formation of acidity in simulated coal mine environments, *Geomicrobiol. J.* 1(4):373~388.
16. Walsh, F. and R. Mitchel. A pH dependent succession of iron bacteria, *Environ. Sci. Technol.* 6(9):809~812 (1972).
17. Sobek, A. A. Successful Reclamation Using Controlled Release Bactericides, American Society for Surface Mining and Reclamation Conference, Charleston, WV (1990).