

산성폐수에 의해 오염된 지표수의 오염도 평가에 관한 연구

A Study on the Assessment of the Contamination of Surface Water by Acid Mine Drainage

최우진

수원대학교 환경공학과

1. 서론

산성광산폐수(Acid Mine Drainage, AMD)는 지표수를 비롯하여 지하수 및 주변토양환경을 오염시키기 때문에 비단 국내 뿐만아니라 세계적인 환경문제중의 하나이다. 국내에는 현재 140개가 넘는 폐탄광에서 유출되는 산성폐수의 양이 하루 57,000m³이상이며 그로인한 인접 하천의 오염이 심각한 수준이다. AMD는 산화환경에 노출된 황화광물이 산소 및 물과 반응하면서 생성되며 주변의 암석, 광물등과 반응하면서 경우에 따라 독성원소를 용해시켜 지표수, 지하수 및 토양환경을 유해중금속으로 오염시킨다.

그러나, 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 pH값, 황산염(Sulfate), 철, 알루미늄, 망간, 구리 및 아연함량을 이용하여 계산하였다. 사용된 변수는 오염도에 미치는 상대적인 중요도를 감안하여 가중치를 사용하였으며, pH값 및 Sulfate함량에 가장 높은 가중치를 부여하였다. 일반적으로 pH 및 Sulfate는 흡착과정에 큰 영향을 받지 않으며, 반면에 Sulfate는 자연중화반응에 의해서도 크게 영향을 받지않는다. 본 연구에서 제시된 오염지표는 산성폐수에 의해 오염된 지표수나 지하수의 탐지 및 오염정도를 정량화 할수 있을 뿐만아니라, 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.

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

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, 위식은 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.

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

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

그러나, 기하학적인 가중치를 이용한 지표의 경우 사용된 인자중에 한 개의 인자라도 그값이 0이면 WQI값이 0이 되는 문제가 있다.

Scottish Development Department의 수질오염도 평가에서 사용된 10개의 변수는 Table 1에 나타나 있으며, 표에서 알수있듯이 용존산소, BOD, 암모니아, 대장균수, pH, 전도도, 총산화질소, 인, 온도 및 부유입자등이다. 사용된 변수는 중요도에 따라 가중치를 부여하였다.

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 (℃)	0.05
9	Conductivity (μ ho/cm)	0.06
10	E. coli (no./100ml)	0.12
Total weighting(ΣW_i)		1.00

본 연구에서 제시한 산성폐수 오염도 지표(AMDI)는 다음식과 같다.

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

제시된 AMDI의 water quality값($q_i w_i$)은 국내 폐탄광 산성폐수의 특성을 가장 잘 나타낼 수 있는 7개의 변수 즉, pH값, 황산염(Sulfate), 철, 알루미늄, 망간, 구리 및 아연함량을 이용하여 계산하였다. 사용된 변수는 오염도에 미치는 상대적인 중요도를 감안하여 가중치를 사용하였으며, pH값 및 sulfate 함량에 가장높은 가중치를 부여하였다. Table 2는 사용된 변수의 가중치를 보여주고 있다. Table 3은 각변수에 대한 $q_i w_i$ 값을 보여주고 있으며 각 변수에 해당되는 score를 모두 더해서 제공한 값을 100으로 나누어서 AMDI값을 산정하였다.

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	Copper (mg/l)	0.08
7	Zinc (mg/l)	0.10
Total weighting		1.00

3. 국내 폐탄광 산성폐수의 오염도 평가

Table 4는 국내주요 폐탄광 갱내 유출수에 대한 오염도를 평가한 결과이다. 표에서 알수있듯이 AMDI값이 가장나쁜 폐탄광의 갱내 유출수는 문경에 소재하고 있는 석봉탄광이었으며 강릉와룡, 태백성원, 평창대용 및 화순지역의 동양탄광등이 상대적으로 오염도 지표가 높게 나타났다. 문경소재의 석봉광산은 현재 석탄산업합리화사업단에서 AMD처리를 위한 자연정화 시설을 건설중에 있다. 폐탄광의 산성폐수문제는 상당히 장기간(보통 50년이상)에 걸쳐 하천 생태계에 영향을 미치기 때문에 이들 폐광지역에 보다 적극적인 AMD처리방법이 강구되어야 할 것으로 사료된다.

Table 3. Water-quality ratings ($q_i w_i$) 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

Table 5는 한국자원연구소에서 지난 1993년부터 1994년에 걸쳐 조사된 폐탄광 주변의 수질특성을 나타낸 것이다. 본 표에서 알수있듯이 탄광지역의 지질학적 특징의 차이, 폐광년수 등에 의해 지역적으로 다른 수질특성을 나타낸다. 영동지역의 조사된 14개 탄광의 평균 AMDI값은 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 지표수, 오염 및 오염되지 않은 하천수등 광범위한 시료를 분석하므로써 산성폐수에 의해 오염된 수질의 오염정도를 지역적, 시간적 변화에 따라 정량화하는 것이 가능할것으로 사료된다.

Table 4. 폐탄광 갱내유출수 오염현황

(단위 : mg/l)

지역	광산명	유출량(톤/일)	pH	Fe	Al	Mn	황산이온	AMDI
강릉	(와룡)태우	778	4.0	208	32	2	911	32.8
태백	함태탄광	982	5.2	131	15	5	1,134	40.2
	(성위)위진	49	2.6	33	16	1	577	32.9
정선	자미위	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 5. 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)

4. 결론

- 본 논문에서는 산성광산폐수에 의해 오염된 지표수나 지하수의 오염정도를 평가할수 있는 수학적 지표를 제시하였음. 오염지표(AMDI)는 수질의 오염정도를 가장 잘 나타낼수 있는 7개의 변수 즉, pH값, 황산염(sulfate), 철, 알루미늄, 망간, 구리 및 아연함량을 이용하여 계산하였음.
- 본 오염지표의 장점은 오염의 수준을 측정할 수 있는 물리적, 화학적 인자(physico-chemical parameters)를 모두 고려하였으며, 일부 인자에 대한 자료가 부족한 경우에도 오염지표를 추정하는 것이 가능함.
- 제시된 오염지표는 산성폐수에 의해 오염된 수질의 오염정도를 지역적, 시간적변화에 따라 정량화 할 수 있을 뿐만 아니라, AMD의 sources 및 sites에 따른 영향을 비교하는데도 유익하다.
- 제시된 오염지표를 이용하여 국내 폐탄광 갱내유출에 대한 오염도를 검토하였으며, 지역적으로 영동지역에 위치한 폐탄광에서 유출되는 갱내 유출수가 영서, 중부, 서부 및 남부에 위치한 폐탄광 산성폐수에 비해 훨씬 오염도가 높게 나타났다.

참고문헌

1. Sengupta, M., Environmental Impacts of Mining, Lewis Publishers, 1992.
2. Scottish Development Department, Development of Water Quality Index, Report AR3, Edinburgh, 1976.
3. Michaud, L.H., Recent Technology Related to the Treatment of Acid Drainage, Earth & Mineral Sciences, Vol. 63, 1995.
4. Kelly, M.G., Mining and the Freshwater Environment, Elsevier Applied Science, London, 1988.
5. 석탄동향, 제 205호, 석탄산업합리화 사업단, 1996.
6. 권광수, 국내 휴·폐광산의 환경영향분석 및 활용방안, 휴·폐광산의 환경오염 복구 및 활용방안에 관한 심포지움, 1997.