

광산배수 오염평가 기준도출에 관한 연구

지상우, 고주인, 강희태*, 김재욱*, 김선준

한양대학교 지구환경시스템공학과, (재)자원산업연구원* (geochemistry@hanmail.net)

<요약문>

QAMDI(Quantified Acid Mine Drainage Index) was developed for more synthesised, qualified and quantified assessment index which can be applied to both coal and metal mine drainage. QAMDI is calculated using three parameter groups i.e. acidity, sulfate contents and toxic metal contents. Since QAMDI expressed in terms of concentration. It reveals the different status of each mine drainage more clearly. QAMDI can be converted to the quantity of pollutant loading by being multiplied by the water flux.

key word : acid mine drainage, QAMDI, pollutant loading

1. 서론

석탄광에서 발생하는 광산배수는 낮은 pH, 높은 황산염, Fe, Al, Mn 농도가 특징적으로 나타나며, 금속광산에서는 이외에도 Pb, Zn, Cu, Cd, As 등 독성 중금속에 의한 오염 또한 문제로 제기되고 있다. 이러한 광산배수의 오염에 대한 평가는 주로 탄광에서 발생하는 광산배수에 대해서 이루어져 왔으며, 사용된 인자 또한 다양한 중금속을 제외한 주로 석탄광에서 문제시 되고 있는 인자만을 사용하였다^{(1),(2)}. 또한, 광산배수에 의한 주변 환경 오염의 영향범위를 추정하기 위해서는 이러한 정성적인 면 뿐만 아니라 유량같은 정량적인 측면을 동시에 고려하여야 할 것이다. 따라서, 본 연구에서는 석탄광 및 금속광에서 발생하는 광산배수의 종합적인 오염 평가 기준을 도출하기 위하여 기존에 연구되어진 평가 방법을 살펴보고, 보다 종합적이고 정성·정량적인 평가방법을 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1. 기존의 광산배수 오염평가 기준

가) 산도(Acidity)

산도는 물의 단위 부피당 염기중화능력에 대한 측정치이다. 산도는 양성자산도, 유기산도, 광물산도의 3가지로 구분되는데, 광산배수에는 용존 유기탄소 함량이 매우 낮기 때문에 산도는 양성자산도와 광물산도로 구성된다⁽³⁾. 광물산도를 유발시키는 금속들의 수화 반응으로부터 광산배수에 대하여 다음 식과

같이 총산도(total acidity)를 계산할 수 있다.

$$\text{Acid}_{\text{calc}} = 50\left(\frac{2\text{Fe}^{2+}}{56} + \frac{3\text{Fe}^{3+}}{56} + \frac{3\text{Al}^{3+}}{27} + \frac{2\text{Mn}^{2+}}{55} + 1000(10^{-\text{pH}})\right) \quad (1)$$

위 식에 의해 계산된 산도와 Greenberg(1992)에 의해 제시된 총산도 측정법과의 차이는 크게 나지 않으며, 광산배수에 의한 산도는 양성자산도에 비해 광물산도가 월등히 큰 것으로 나타났다⁽⁴⁾.

나) Best available technology economically achievable(BAT)

Hellier(1993)는 미국의 Clean Water Act 304조에서 규정하는 Best available technology economically achievable(BAT)에 만족하는 광산배수 처리기술의 적용을 위한 인공 소택지 설계를 위해 광산배수의 순산도(Net acidity)와 순알칼리도(Net alkalinity)를 이용하여 5가지로 분류하였다⁽²⁾. 이 기준은 현장에서 광산배수 처리 계획을 세우는 데에 적용되고 있으며, 여기서 평가된 분류에 따라 처리시설의 규모를 결정하고 있다. 국내에서도 1996년부터 설치되기 시작한 자연정화처리시설의 설계에 있어서 이 분류방식에 의거한 설계를 하고있다.

다) AMDI(Acid Mine Drainage Index)

최우진(1997)에 의해 제시된 오염지수로 Scottish Development Department에서 1976년에 제시한 “water-quality index” (WQI)를 국내 폐 석탄 산성배수의 특성을 가장 잘 나타낼 수 있는 7개의 변수 즉, pH, 황산염, 철, 알루미늄, 망간, 구리 및 아연 함량을 이용하여 계산하였다⁽¹⁾.

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

제시된 AMDI의 water quality값 ($q_i \cdot w_i$)은 사용된 변수가 오염도에 미치는 상대적인 중요도를 감안하여 가중치를 사용하였으며, pH 및 황산염 함량에 가장 높은 가중치를 부여하였다.

라) MAMDI(Modified Acid Mine Drainage Index)

AMDI가 서로 다른 광산배수끼리의 상대적인 비교는 가능하지만 각각의 광산배수가 어느 정도 오염되었는지에 대한 절대적인 정보는 제공하기 못하기 때문에 적절한 기준을 선정하여 광산배수 및 그로 인해 오염된 지표수의 오염수준을 평가하고자 제시되었다⁽⁵⁾. 이 지수는 각 AMDI 값을 기준값의 AMDI로 나누어 역수를 취한 것이다. 표준 AMDI의 기준값으로 pH, Fe, Mn, Cu, Zn은 “오염물질 배출 허용 기준”(pH 5.8, Fe 10mg/l, Mn 10mg/l, Cu 3mg/l, Zn 5mg/l)을, Al은 석탄합리화 사업단 폐수처리 목표수질인 5mg/l로, 황산염은 먹는 샘물 기준인 200mg/l를 사용하였다. MAMDI가 1보다 큰 경우 시급한 처리가 필요한 것으로 판단할 수 있다.

$$\text{MAMDI} = \frac{\text{AMDI}_i}{\text{AMDI}_{\text{std}}} \quad (3)$$

2.2. QAMDI (Quantified Acid Mine Drainage Index)

여러 오염평가기준이 도입되었으나 BAT나 산도는 pH, Fe, Al, Mn 만을 다루고 황산염에 관련된 인자가 없어 종합적인 오염평가를 하기에 부족한 것으로 판단된다. AMDI나 MAMDI는 종합적인 표현을

했으나 금속광산에서 문제가 되는 독성 중금속인 As, Cd, Pb 등이 평가에서 제외되는 단점이 있다. 또한 지수개념의 오염평가는 주변 환경 오염의 영향범위를 판단하기에는 부적당하다. 본 연구에서는 광산 배수의 오염정도를 종합적으로 평가하기 위한 방안으로 농도형태로 표현될 수 있는 오염지수를 도입하고자 한다.

먼저 각각의 변수에 대한 환경기준치를 1로 환산해 주되 pH, Fe, Mn, Al은 산도로 환산한 값을 적용한다 (환경기준치를 산도로 환산하면 63.9 mg/l as CaCO₃이다.). 이때 환경기준은 산도와 황산염의 경우 김주용 (1998)이 적용한 것과 동일하게 취하고, As, Cd, Pb는 방류수 수질기준(As = 0.5mg/l, Cd = 0.1mg/l, Pb = 1mg/l)을 적용하였다. 또한 중금속은 TM(Toxic Metal)항목으로 묶어주어 하나의 변수로 바꾸어준다. TM항목은 다른 중금속원소를 추가하거나 포함된 것 중 제외하는 것이 가능하다. 즉 각 중금속 농도에 환경기준치의 역수를 곱하여 준 후 합산한 값을 포함된 중금속의 수로 나누어주는 방법을 취한다.

$$TM = \frac{\sum([M] \times \frac{1}{[STD]})}{n} \quad (4)$$

따라서 오염지수를 계산하기 위한 변수항목은 3개 항목으로 구성할 수 있다.

$$QAMDI = \frac{[Acid.]}{[STD]} \times 0.45 + \frac{[SO_4^{2-}]}{[STD]} \times 0.20 + [TM \times 0.35] \quad (5)$$

식(5)에서 각 항목에 대한 가중치는 각 변수가 오염도에 미치는 상대적인 중요도를 감안하여 적용하였다. 최우진(1997)의 경우 가중치 부여에 있어서 pH와 황산염에 높은 가중치를 부여하였는데, 석탄광 광산배수에 대한 적용을 하는 경우에는 적합할 수 있겠으나 상대적으로 독성이 강한 중금속을 고려해야 하는 금속광에 대한 적용을 위해서는 중금속 항목인 TM에 가중치를 더 높게 주어야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 전체적인 산성광산배수의 특성을 볼 수 있는 산도 항목에 0.45를, 대표적인 음이온 값이면서 흡착이나 중화 반응에 영향을 받지 않는 황산염에 0.2를, 그리고 중금속 항목에 0.35의 가중치를 각각 부여하였다.

2.3. 국내 폐광산 광산배수의 오염도평가

QAMDI를 적용하여 국내 일부 폐탄광과 폐금속광의 오염도를 평가하였다. MAMDI나 QAMDI 모두 1이 넘으면 오염이 심한 상태임을 지시하지만 오염이 심한 곳일수록 두 값의 차이가 커지는 것을 볼 수 있다. 지수개념으로 평가할 때에는 일정 농도 이상의 값은 모두 동일한 값으로 처리하였기에 볼 수 없었던 차이가 농도개념으로 표시할 때에는 나타날 수 있다. Table 2에서 와룡-태우탄광과 호남탄광(1갱)의 경우나 정원탄광과 삼마-태정탄광의 경우 MAMDI값은 거의 같으나 QAMDI값으로 볼 때 차이가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

금속광산의 광산배수에서는 석탄광에 발생하는 광산배수에 비해 Fe, Al, Mn 이외에도 각 광산의 광종에 따라 중금속의 농도가 높게 나타날 수 있다. QAMDI를 이용하면 기존에 제시된 오염평가 방안으로 해결하기 어려웠던 중금속 농도에 대한 평가를 포함 할 수 있다. Table 2에서 금속광의 경우를 보면 MAMDI값에 있어서는 일광, 울진, 달성광산 모두 금호광산보다 높은 오염정도를 나타내었으나 QAMDI값으로 볼 때는 금호광산의 오염도가 가장 높음을 볼 수 있다. 이는 금호광산의 TM, 즉 중금속 농도가 다른 광산에 비해 월등하게 높았으나 AMDI에서는 중금속 농도의 가중치가 낮았기 때문이다. 특히 금호광산 광산배수의 Cd의 농도가 14.44 mg/l로 매우 높았으나 AMDI에서는 Cd가 평가에 제외되어있다.

QAMDI는 농도형태로 제시되었으므로 유량을 곱하여 오염부하량(pollutant loading ; PL)으로 계산할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 광산배수가 주변 환경에 미치는 영향을 정량화하고 정화시설의 설계와 처리효율을 종합적으로 평가하는 데에도 유익하다.

Table 3. QAMDI of some abandoned coal and metal mines in Korea.

	Acid. (mg/l as CaCO ₃)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	TM (mg/l)	AMDI	MAMDI	QAMDI (mg/l)	Q* (m ³ /day)	PL** (Kg/day)
coal mine(adit)								
Waryong-taewoo	475.35	698.00	0.02	47.61	1.28	4.05	780	3.16
Honam(1)	134.41	352.13	0.01	49.00	1.24	1.30	108	0.14
Jeongwon	16808.04	3820.00	0.16	25.00	2.43	122.24	31	3.79
Samma-taejeong	1076.17	2746.00	0.19	26.01	2.34	10.39	37	0.38
Hanchang	156.10	669.07	0.00	65.61	0.93	0.57	190	0.34
Sungbong	784.65	2289.64	0.05	28.09	2.17	7.83	190	1.49
Youngdong	1047.66	1435.00	0.07	43.56	1.40	8.84	1689	14.93
metal mine(adit)								
Ilkwang	1353.25	3430.68	3.84	21.16	2.88	14.30	500	7.15
Dalsung	443.31	3046.20	1.85	36.00	1.69	6.82	80	0.55
Kumho(yoocheon)	707.15	1654.14	43.94	40.96	1.49	22.01	700	15.41
Wooljin	879.98	3840.60	0.41	28.09	2.17	10.18	400	4.07

* Q : Water flux ** PL : Pollutant Loading

3. 결론

제시된 QAMDI는 농도개념의 지수이므로 각각의 광산배수간에 오염정도를 상호 비교하는데 있어서 그 차이를 좀 더 명확하게 보여줄 수 있다. 또한 기존에 제시된 오염평가 방안으로 해결하기 어려웠던 Cd, As 과 같은 중금속 농도에 대한 평가를 포함 할 수 있다. 또한 오염부하량으로 환산할 수 있기 때문에 주변 환경에 미치는 영향을 정량화하고 정화시설의 처리효율을 종합적으로 평가하는 데에도 유익하다.

4. 참고문헌

- (1) 최우진, 1997, 국내폐탄광의 산성폐수 오염도 평가에 관한 연구, 한국토양환경학회지 Vol.2, No.3, p.31-38
- (2) Hellier, W.W, E.F. Giovannitti, and P.T. Slack. 1994. Best professional judgment analysis for constructed wetlands as a best available technology for the treatment of post-mining groundwater seeps. In Proceedings, International Land Reclamation and Mine Drainage Conference, U.S. Bureau of Mines SP 06A-94, 1994, p. 60-69.
- (3) Hedin, R.S., Nairn, R.W. and Kleinmann, R.L.P., 1994, Passive treatment of coal mine drainage, Bureau of mines information Circular, 35p.
- (4) 황지호, 1998, 도계탄광 부근 산성광산배수의 환경지구화학적 특성과 처리에 대한 연구, 서울대학교 공학박사학위논문, 103p.
- (5) 김주용, 1998, 산성광산배수에 의한 강릉탄전 임곡천 일대의 수계오염과 처리에 관한 연구, 서울대학교 공학박사학위논문, 204p.

5. 사 사

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