

국내 폐광산 지역의 *Vibrio fisheri*, *Selenastrum capricornutum*, 그리고 *Daphnia magna*를 이용한 생태 위해성 평가

김기태 · 이병천 · 김동욱* · 김상돈†

광주과학기술원 환경공학과 · *국립공주대학교 환경공학과

(2006년 10월 12일 접수, 2007년 1월 17일 채택)

Ecological Risk Assessment(ERA) of Abandoned Mine Drainage(AMD) in Korea Based on *Vibrio fisheri*, *Selenastrum capricornutum*, and *Daphnia magna*

Ki Tae Kim · Byoung Cheun Lee · Dong Wook Kim* · Sang Don Kim†

Department of Environmental Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology

*Department of Environmental Engineering, Gongju National University

ABSTRACT : Ecological risk assessment(ERA) to 5 abandoned mine drainage was investigated by using chemical measurement and bioassay experiment. From the results of chemical analysis, the high concentration of heavy metals are detected in most area. The Arsenite were mostly detected in Songcheon, Nakdong, and Dukum abandoned mine area, and various heavy metals were highly dispersed in Nakdong area. The study area have also high biological toxicity, resulted from the bioassay based on WET(Whole Effluent Toxicity) test by using *Vibrio fisheri*, *Selenastrum capricornutum*, and *Daphnia magna*. The maximum toxicity was shown in the point where the mine waters start to flow. The sensitivity of toxicity by *S. capricornutum* was relatively high considering the values of toxicity in all samples, from 1.3 to 32.0 TU. The different sensitivities of toxicity recommends the use of battery system, resulted from at least two test species for bioassay or ecological risk assessment of mine drainage. Besides, the results showed high hazard quotient(i.e., greater than 1 HQ value indicating potentially significant toxic risks) with regard to abandoned mine drainage area in this study. On the other hand, the biological toxicity results were sharply decreased by attenuation along further distance from discharging of mine waters. Therefore, environmental parameters including the dilution factor, dissolved organic matter, and hardness should be considered when the remediation and ERA of abandoned mine drainage is planned.

Key Words : ERA, AMD, Heavy Metals, *Daphnia magna*, *Selenastrum capricornutum*

요약 : 국내 5개 폐광산 지역의 갭내수 및 배출수에 대해 화학적 분석 및 생물학적인 독성 평가를 통한 생태 위해성 평가를 실시하였다. 본 연구에서 선정된 9가지 중금속의 화학적 분석 결과, 거의 모든 지점에서 높은 중금속 농도가 검출되었으며, 특히 송천, 낙동, 덕읍 지역에서는 상대적으로 비소가 높게 검출되었고, 낙동 지역은 하류까지 전체적으로 각 항목의 중금속이 높은 농도로 존재하였다. 통합 방류수 독성 평가(WET)에 기초해 *Vibrio fisheri*, *Selenastrum capricornutum*, *Daphnia magna*를 이용한 생물학적 독성 평가 결과, 모든 지점에서 높은 독성이 나타났다. 유출수가 처음 흐르는 갭구에서 가장 높은 독성이 나타났으며, *S. capricornutum*에 대한 독성이 모든 지점에 걸쳐 1.3~32.0 TU 사이의 독성이 나타나 독성 민감도가 가장 높은 것으로 나타났다. 각각의 독성 평가 종에 따른 독성 민감도 차이는 폐광산의 위해성을 평가함에 있어 두 종 이상의 평가 종이 사용되어야 함을 의미한다. HQ(Hazard Quotient) 개념을 적용한 생태 위해성 평가 결과, 폐광산에서 분석된 대부분의 중금속에 대해 HQ 값이 1보다 훨씬 크게 나타났으므로, 폐광산의 중금속에 대한 영향은 심각한 정도의 위해도를 가지고 있다고 판단된다. 한편, 생물학적 독성은 유하 거리의 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 폐광산의 복원이나 생태 위해성 평가 시 지점별로 회석률뿐 아니라 DOM, 경도 등 환경인자들이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

주제어 : ERA, 폐광산, 중금속, *Daphnia magna*, *Selenastrum capricornutum*

1. 서론

중금속은 수계를 포함한 환경에 존재하여 인간이나 생태계에 유해를 주는 주요 오염물질 중 하나이다. 특히, 인간의 광

산 활동의 결과물로 남은 휴·폐광산 지역은 높은 농도의 중금속이 존재하여 주변 지역까지 잠재적으로 심각한 중금속 오염을 내포하고 있다.¹⁾ 실제로, 2005년 환경부 조사에 따르면, 23개 조사 대상 중 약 70%를 차지하는 16개 휴·폐광산 지역이 토양이나 수질 오염 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 이는 높은 중금속을 함유하고 있는 휴·폐광산으로부터 유출된 폐광석, 광미, 갭내수 등이 주변 농경지 및

† Corresponding author
E-mail: sdkim@gist.ac.kr
Tel: 062-970-2455

Fax: 062-970-2434

수계에 심각한 환경오염을 유발시키고 있음을 의미한다.²⁾

1,000 여개가 존재한다고 알려져 있는 국내 휴·폐광산의 중금속 오염에 대한 관심이 증가하면서, 환경부에서는 폐금속 광산 토양오염실태를 조사하고 있으며, 많은 연구자들이 폐광산 주변의 중금속 오염 실태를 보고하고 있다.^{3~5)} 그러나 대부분의 연구는 주변 토양, 지하수, 퇴적물을 중심으로 중금속의 농도 분석을 통한 오염 실태 파악에 중점을 두고 있다. 생물학적 위해성 평가가 누락된 채 측정된 중금속 농도를 기본으로 하는 오염 실태 파악은 인체나 수계 생태계에 미치는 실제적인 위해성을 평가하는 데에 많은 비약이 따른다. 이와 전⁶⁾이 노출 경로별로 제시된 모델식을 통해 일평균 노출량을 계산하여 비소의 인체 위해성을 예측하고자 하였듯이 농도 기본의 오염 실태 파악은 실제 수계에 존재하는 생물체를 이용한 독성 평가와 같은 추가적인 절차가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 갯내수 및 폐광산 배출수의 시료 채취가 가능한 국내 5개 폐광산 지역의 생태 위해성 평가를 위해 통합 방류수 평가를 기본으로 하여 Microtox, 조류, 물벼룩을 이용한 생물 독성 평가를 수행하였다. 또한 갯내수가 유출되기 시작하는 광구로부터의 유하 거리에 따른 위해성 저감 정도를 알아보고자 하였으며, HQ(Hazard Quotient) 개념을 적용하여 물벼룩에 대한 생태 위해성 평가를 수행하였다.

생물학적인 독성 평가를 통해 얻어진 독성 값(예; LC₅₀, 시료에 노출된 개체의 50% 치사율을 보이는 치사농도)을 기준으로 이루어지는 통합 방류수 독성 평가는 미량 오염물질이 다량 존재하는 방류수의 배출 기준의 근거가 되어 선진국 등에서 방류수의 안정성을 확보하기 위해 실시되고 있는 방법⁷⁾으로, 휴·폐광산에 적용되어 휴·폐광산의 갯내수나 배출수에 존재하는 다양한 중금속에 대한 통합적인 생물학적 독성 모니터링을 가능하게 한다. 생태독성 평가를 위해서 해양성 박테리아 *Vibrio fisheri*, 조류 *Selenastrum capricornutum*, 물벼룩 *Daphnia magna*를 사용하였다. 이들 종은 배양이 쉽고, 독성에 민감하며 생태계 먹이사슬에서 중요한 위치를 차지하고 있어 생태 독성 평가에 널리 이용되고 있다.

2. 재료 및 실험방법

2.1. 폐광산 배출수 시료 채취 및 화학적 분석

강원도와 전라도 지역에 분포 하고 있는 5개 폐광산 지역, 내리천(N), 송천(SC), 낙동(ND), 덕읍(DU), 점동(JD)에 대해서 갯내수가 직접 배출되고 있는 폐광산 지역을 중심으로 갯내수 영향이 없다고 간주되는 상류 지역과 큰 본류로 합류되기 전, 갯내수가 흐르는 거리별로 한 지역에서 2~5개의 시료를 채취하였다. 시료 채취 후에는 부가적인 실험을 위해서 4°C에서 시료를 냉장 보관하였다. 독성에 많은 영향을 주는 주요 인자로 알려진 경도(hardness), 알칼리도(alkalinity)에 대해서는 표준 시험법(Standard method)⁸⁾에 따라 분석하였다.

5개 폐광산 지역의 중금속 농도를 측정하기 위해, 생태 독성이 있다고 간주되는 비소(As), 카드뮴(Cd), 코발트(Co), 크롬(Cr), 구리(Cu), 망간(Mn), 니켈(Ni), 납(Pb), 아연(Zn) 등 9

개 중금속에 대해서 Induced Coupled Plasma Mass Spectroscopy(ICP-MS, Agilent 7100)를 이용하여 화학적 분석을 실시하였다. 시료는 시료 채취 후, 2% v/v 질산화 처리를 하여 냉장 보관한 시료를 사용하였고, 모든 실험은 시료 채취 후 5일이 경과하지 않도록 하였다.

2.2. *S. capricornutum* 과 *D. magna* 배양

한국 화학연구소로부터 처음 분양받은 *D. magna*와 *S. capricornutum*은 수 독성 평가에 대표적으로 사용되는 대표 생물종으로서 본 실험실에서 한국 화학연구소로부터 분양받아 4년 이상 배양해오고 있다. 본 실험실에 구비된 clean room에서 온도 25±1°C와 습도 50%를 일정하게 유지시켜 주며 배양하였다.

*S. capricornutum*과 *D. magna* 배양 방법은 각각 EPA에서 추천하는 방법을 따랐다.^{9,10)} *S. capricornutum*의 배양을 위해서 3차 증류수를 사용하여 제조된 배양액에서 100 cps로 진탕시켜 주었으며, 86±8.6 μE/m²/sec 광도와 16 hr light, 8 hr dark 광주기를 유지하였다. *D. magna*의 배양을 위해서 3차 증류수를 이용하여 pH 7.6~8.0, 경도 160~180(mg/L as CaCO₃), 그리고 알칼리도 110~120(mg/L as CaCO₃)로 제조된 배양액을 사용하였으며, 20~30마리/3 L의 밀도로 stock culture를 실시하였다. 개체 배양을 추가적으로 병행하여 실험에 사용할 *D. magna*를 건강하게 유지함으로써 실험의 정확성을 높이고자 하였다. Stock culture와 개체 배양을 위해서 먹이는 3.0~3.5 × 10⁷ cells/mL 밀도를 가진 *S. capricornutum*과 YCT(yeast, cerophyl, trout chow)를 혼합하여 사용하였으며, YCT는 2일마다, *S. capricornutum*은 매일 주었다. 10~20 μE/m²/s의 광도를 유지하였고 광주기는 *S. capricornutum*과 같이 16 hr light, 8 hr dark 상태를 유지하였다.

2.3. 생물학적 독성 평가

생물학적 독성 평가는 통합 방류수 독성 평가를 기본으로 급성독성 평가 방법을 사용하였다. 각각의 생물종에 따른 독성 평가 방법은 US-EPA에서 추천하는 방법을 따랐으며,^{9,10)} 국내에도 익히 알려져 있다.⁷⁾

먼저, 해양성 박테리아인 *V. fisheri*에 대한 생물 독성 평가를 위해서 Microtox(SDI Model 500)의 WET 방법을 사용하였다. 별도의 여과 전처리 없는 10 mL 시료에 삼투압을 맞춰주기 위해 0.2 g의 NaCl을 넣었고 15 min 동안의 영향을 기준으로 하였다.

S. capricornutum 생물 독성 평가는 96 hr 준 만성독성 평가 방법을 사용하였다. 실험실에서 7일 동안 계대 배양된 조류를 사용하였으며, 조류 세포의 개수는 1.5 × 10⁶ cell/mL에서 시작하였다. 이 개수는 흡광도와 조류 세포 수 사이의 상관 그래프에 의해서 결정되었으며, 이 상관 그래프는 haemocytometer를 사용하여 현미경으로 직접 세포의 수를 계수하고, UV-spectrometer(UV-160PC, Shimadzu, Japan)를 이용하여 최적의 파장(686 nm)에서 조류의 세포 수에 대한 흡광도를 측정하여 작성하였다. 50 mL 총 시험 용액을 100 mL 삼각 플라스크에 2배씩 희석하여 100, 50, 25, 12.5, 6.25%

(v/v)에 해당되는 배출수 농도를 사용하였다. 희석수는 *S. capricornutum*의 배양을 위해 사용된 제조된 배양액을 사용하였다. 또한 *S. capricornutum* 독성 평가를 위해 0.2 µm 친수성 나일론필터(Millipore, USA)를 사용하여 여과를 실시하여 흡광도에 영향을 미치는 부유물질(SS, suspended solids)을 제거하였다. 시험 동안에는 산소 공급은 실시하지 않았고 스펀지 마개를 이용해 입구를 막은 후 일정한 속도(125 rpm)로 교반시켜주었다. 스펀지 마개는 외부에서 유입되는 오염물질 및 박테리아의 영향을 최소화하기 위한 방법이다. 온도, 광도 그리고 광주기는 배양 때와 동일하게 유지하였다. 특히, *S. capricornutum* 독성 평가 시에는 주 영양 염류인 질소(N), 인(P)을 일정하게 맞춰주어야 하므로,⁷⁾ Ion Chromatography (DX-120, DIONEX)를 이용하여 질소와 인을 분석하였으나, 본 연구에서는 배양액의 N, P 농도와 큰 차이는 없었다. 기본적으로 경도와 알칼리도는 *S. capricornutum*에 영향이 없도록 알맞게 조정하였다.

D. magna 독성 평가는 48 hr 급성독성 평가 방법이 사용되었다. 개체 배양을 통해 얻어진 건강한 *D. magna*에서 3번째 세대 이상의 태어난 지 24 hr 이내의 새끼들을 사용하였으며, 폐광산 배출수의 농도는 *S. capricornutum*의 실험 방법과 같이 2배씩 희석하여 100, 50, 25, 12.5, 6.25%(v/v)로 하였다. 희석수는 *D. magna*의 배양을 위해 사용된 제조된 배양액을 사용하였다. 시험 용액은 총 25 mL를 사용하였으며, 농도별 4개의 반복을 두고 5마리씩 새끼들을 노출시켰다. 높은 중금속 농도를 감안해 플라스틱 용기를 사용하였다. pH나 온도, 알칼리도 등은 *S. capricornutum* 실험과 마찬가지로 *D. magna*에 영향을 미치지 않도록 실험 전에 조정하였고, 온도, 광도 그리고 광주기는 배양 때와 동일하게 유지하였다.

생물학적 독성 평가를 해석하기 위해, 독성 값은 아래의 식과 같이 TU(Toxic unit) 개념을 기준으로 산정하였다. TU를 사용한 독성 값 표현 통일은 배출수의 상대적인 독성 값을 쉽게 비교할 수 있는 장점이 있다.

$$TU = \frac{100}{\text{Toxicity Reference Values (TRVs)}}$$

여기에서, Toxicity Reference Values는 생물 검정을 통한 독성 결과를 표현하는 값으로, TU 값이 1보다 크게 되면 배출수 자체만으로도 독성이 있음을 의미한다. *V. fisheri*를 위해서는 EC₅₀(개체에 50% 영향을 주는 유효 농도), *S. capricornutum*은 IC₂₅(개체에 25% 저해를 주는 저해 농도), 그리고 *D. magna*를 위해서는 LC₅₀ 값들을 사용하였다. 특별히, *D. magna*의 LC₅₀ 독성 값은 US-EPA에서 제시하는 probit 방법, spearman-karber 방법, trimmed spearman-karber 방법을 사용하여 통계적으로 처리하였으며, *S. capricornutum*에 대한 IC₂₅ 독성 값도 역시 US-EPA에서 제시하는 ICp 프로그램⁹⁾을 사용하여 산정하였다.

2.4. 중금속의 기준 독성 값 산정

7개의 중금속에 대해서 *D. magna*에 대한 생태 위해성 평

Table 1. The relationship between hardness(as CaCO₃ mg/L) and LC₅₀(µg/L) values to *D. magna* from ECOTOX database

Heavy metals	Equations	Correlation coefficient, r ²
Cd	LC ₅₀ = 0.27 × hardness + 1.25	r ² = 0.87
Cu	LC ₅₀ = 0.62 × hardness - 13.15	r ² = 0.53
Pb	LC ₅₀ = 12.86 × hardness - 196.29	r ² = 0.88
Ni	LC ₅₀ = 24.30 × hardness - 344.47	r ² = 0.88
Zn	LC ₅₀ = 3.97 × hardness + 42.71	r ² = 0.70

가를 실시하였으므로, 측정된 9개의 중금속 중에서, 코발트와 망간을 제외하고 기준 독성 값을 산정하였다. *V. fisheri*의 7개 중금속에 해당되는 EC₅₀ 값은 Microtox database에서 구하였으며, *S. capricornutum*과 *D. magna* 각각의 IC₂₅, LC₅₀ 값들은 EPA ECOTOX database를 이용하였다. 한편, *D. magna*의 중금속에 대한 독성 값은 경도와 밀접한 연관이 있으므로,⁷⁾ 카드뮴, 구리, 납, 아연, 니켈에 대해서는 시료로부터 측정된 경도를 익히 알려진 경도와 *D. magna*의 LC₅₀과의 상관관계에 넣어 계산하였다(Table 1). 또한 비소에 대한 *D. magna*의 독성 값은 pH, 비소의 형태에 따라 독성 값이 달라지므로,¹¹⁾ 본 연구에서는 pH 8을 기준으로 비소 3가와 비소 5가의 LC₅₀ 평균값을 사용하였다.

2.5. 생태 위해성 평가(Ecological Risk Assessment)

HQ(hazard quotient) 위해도 개념은 생태 위해성 평가를 수행하는데 종종 이용된다.¹²⁾ HQ 값은 아래와 같은 식으로 나타낸다.

$$HQ = \frac{EC(\text{Exposure Concentration})}{TRV} \times PAF(\text{Proposed Assessment Factor})$$

여기서, EC 값은 일반적으로 환경적으로 존재하는 농도(EC, Environmental Concentration)와 같은 의미로 화학적 분석을 통해 얻어진 중금속 농도가 이에 해당된다. TRV는 기준 독성 값으로 앞서도 언급했듯이 급성독성 평가 결과를 사용하였다. PAF는 AF(Assessment factor)나 UF(Uncertainty factor)로도 알려져 있으며, 독성 평가 수행 시 제한적인 실험실 환경 등을 보완하기 위해 곱해지는 평가계수이다. PAF는 일반적으로, 급성, 만성 독성인가, 혹은 한 종류, 최소 3종류 이상의 종을 사용 하였는가 등 독성 평가 수행에 따라 다양하게 적용된다.¹²⁾ 본 연구에서는 *D. magna*에 대해 생태 위해성 평가를 HQ를 적용해 실시하였으며, *D. magna* 급성독성 결과를 사용하였으므로, 많은 변수가 있다는 가정 하에, OECD(Organization for Economic Cooperation and Development)에서 추천하는 평가계수 100을 사용하였다. 일반적으로, HQ 값이 1보다 클 경우, 위해도가 있는 것으로 간주된다.

Table 2. The environmental measured concentrations of 9 heavy metals of abandoned mine drainage in the study area

Sample	pH	Hardness	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
N		27.3	37.3	0.2	0.3	0.4	2.0	0.9	0.3	ND ^c	64.7
SC(0 ^a)	7.1	154.7	590.6	0.7	4.2	0.5	13.2	107.5	4.2	0.4	259.7
SC(+1.0)	7.3	154.7	603.6	0.4	6.5	0.3	3.3	70.8	6.5	ND	67.7
ND(0)	6.8	160.2	91.3	0.4	0.7	0.9	1.2	7.3	0.7	0.1	92.6
ND(+0.1)	7.8	158.3	255.2	0.2	1.0	0.4	46.6	4.0	1.0	0.5	30.4
ND(+0.3)	7.6	80.1	620.1	188.6	22.6	6.6	190.1	2.9	22.6	387.0	26.9
ND(+0.6)	7.9	180.2	870.1	167.9	19.8	5.9	175.1	1.7	19.8	2.0	35.2
ND(+1.0) ^b	8.1	154.7	1.4	1.0	0.6	0.3	3.9	32.3	0.6	0.5	30.9
DU(-0.1)	6.7	360.4	2.8	0.4	0.2	0.3	4.9	2.8	1.2	ND	38.2
DU(0)	7.8	334.9	229.1	0.3	0.3	0.7	0.5	3.9	0.6	ND	9.8
DU(+0.5)	8.2	38.2	2.3	95.6	13.6	3.4	98.9	5148.0	11.3	ND	6326.0
DU(+1.2)	7.5	58.2	2.3	87.1	12.3	3.2	90.4	4643.0	10.6	ND	5817.0
JD(-0.1)	7.4	49.1	0.7	1.1	0.2	0.3	1.5	119.0	1.2	ND	163.6
JD(0)	7.6	58.2	3.0	0.3	1.0	0.3	1.6	25.5	0.6	ND	22.0
JD(+0.2)	7.2	52.8	0.6	0.2	0.1	0.3	1.5	5.7	11.3	ND	45.0
JD(+0.4)	7.8	43.7	0.6	0.3	1.5	0.3	1.0	35.8	10.6	ND	15.5

Unit : µg/L(ppb)

The names of the initial sample sites are indicated as follows: N, Naeri river(Gangwon province); SC, Songcheon(Gangneung city, Gangwon province), ND, Nakdong(Jeongseon country, Gangwon province); DU, Dukum(Naju city, South Cholla province); JD, Jumdong(Gwangyang city, SC province).

^a Indicates the distance(km). The 'minus' means the upstream of site where the mine water is start to flow.

^b Sampled in big stream to which the mine water is discharged.

^c Not detection.

3. 결과 및 고찰

3.1. 화학적 분석 결과

5개 지역의 갱내수가 배출되는 광구로부터 유하 거리 별로 16개 시료에 대해서 화학적 분석을 통해 얻어진 중금속 농도를 Table 2에 나타내었다.

대부분의 시료에서 중금속이 높은 농도로 검출되었다. ND 지역에서 카드뮴, 크롬, 구리, 그리고 납 등이 타 지역에 비해 상대적으로 높게 검출되었다. ND 지역에서는 유하 거리에 따라 중금속 농도가 일반적으로 증가하다가 갱내수 유출구로부터 1 Km 떨어진 곳(ND+1.0)에서 이전보다 농도가 급격히 줄어드는 결과를 보였는데, 이는 갱내수가 강과 합류되는 지점으로 중금속 농도가 희석되었기 때문이다. DU 지역에서는 광구로부터 유하 거리가 멀어질수록 As 농도는 감소하지만, 다른 중금속 농도는 증가하였다. 특히, 0.5 Km, 1.2 Km 지점에서 망간이 5.2 mg/L까지, 아연이 6.3 mg/L까지 고농도로 검출되었다. 맹독성이며 발암성 물질로 알려져 최근 관심이 높아진 비소는 SC, ND, DU 지역에서 전반적으로 높게 검출되었다. Table 2 결과에 따르면 유하 거리가 증가할수록 중금속 농도가 증가하고 있는 경향을 보이는데, 갱내수가 흘러 하류로 갈수록 축적되고 있음을 나타낸다. 그러나 다른 지역과 달리, 금은광산인 DU 지역에서의 비소 농도는 유하거리에 따라 감소하는 것으로 나왔는데, 주변 지역에 인접한 지천에 의한 희석 때문인 것으로 판단할 수 있다.

또한 DU 지역에서 망간 농도가 최대 5.1 mg/L, 아연 농도가 최대 6.3 mg/L 까지 높게 검출되었는데, 임 등¹³⁾의 연구에서도 아연 농도가 7.3 mg/L로 높게 검출되었다. 전반적으로 검출된 중금속 농도는 임¹³⁾ 등의 연구와 유사한 수치를 보였다.

pH는 중성을 나타냈으며, 경도 분석 결과 N과 JD 지역을 제외하면, 약 경수(75~150 mg/L as CaCO₃) 또는 경수(150~300 mg/L as CaCO₃)의 특성을 나타내었다. 임 등의 결과¹³⁾에서는 DU 지역 두 곳에서 pH가 산성으로 나타났다. 광산 폐수의 pH는 보통 산성인 것으로 알려져 있으나, 대부분의 지역에서 흙을 덮는 복원이 이루어져 pH는 본 연구에서와 같이 중성을 띄는 것으로 판단된다. 경도는 N과 JD 지역에서 연수(0~75 mg/L as CaCO₃)를 보였으며, DU 지역에서는 유하 거리가 클수록 강 경수(300 mg/L as CaCO₃ 이상)에서 연수 형태로 변화하였다.

3.2. 생태 독성 평가 결과

유하 거리에 따른 *V. fisheri*, *S. capricornutum*, 그리고 *D. magna*에 의한 생태 독성 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3의 독성 평가 결과와 같이 ND, DU, 그리고 JD 지역에서 *D. magna*의 독성이 각각 15.2, 32, 41.7 TU으로 가장 높게 나타났다. 또한 갱내수가 배출되는 지점에서 전반적으로 매우 높은 생물 독성이 나타났다. *S. capricornutum*의 독성 평가 결과, 모든 지점에서 1 TU 이상의 독성 값을 나타내고 있어 본 연구의 평가종 중에서 가장 민감한 것

Table 3. The results of bioassay expressed by TU(Toxic Unit) calculated as 100 divided by EC₅₀, IC₂₅, LC₅₀ for *V. fisheri*, *S. capricornutum*, and *D. magna*, respectively

Sample	<i>V. fisheri</i>	<i>S. capricornutum</i>	<i>D. magna</i>
N	2.6	3.2	ND ^b
SC(0)	ND ^a	2.8	ND
SC(+1.0)	ND	2.8	ND
ND(0)	1.5	1.6	15.2
ND(+0.1)	1.4	2.0	0.4
ND(+0.3)	ND	3.2	0.5
ND(+0.6)	ND	3.1	ND
ND(+1.0)	ND	1.5	ND
DU(-0.1)	1.1	1.3	ND
DU(0)	12.8	31.5	32
DU(+0.5)	ND	1.5	ND
DU(+1.2)	ND	3.7	ND
JD(-0.1)	ND	1.3	ND
JD(0)	ND	32	41.7
JD(+0.2)	ND	1.4	ND
JD(+0.4)	ND	1.4	ND

^a Not Detection. The effect shows below 50% even in 100% test solution.
^b Not Detection. The mortality do not show even in 100% test solution.

로 나타났다. 종마다 다양한 독성 민감도를 보이므로 생태 독성을 평가하고 판단하는 데에는 두 종류 이상의 독성 결과값이 고려되어야 한다.

Table 3에 나타난 독성 값을 보면 모든 지점에서 동일하게 유해 거리가 증가함에 따라 세 가지 독성 평가 종의 독성이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Table 2에서와 같이 유해 거리가 멀어질수록 중금속 농도가 높게 측정되고 있는 것과는 상반되는 결과로서, 높은 중금속 농도를 가지고는 있지만 실질적으로 생물체에 미치는 영향은 감소하고 있음을 알 수 있다. 본 연구가 갯내수의 흐름을 따라 독성 평가를 실시하였으나, 갯내수의 유출이나 축적에 의하여 영향을 받는 지하수나 토양을 포함하는 종합적인 독성 평가 측면에서는 미흡할 수 있으므로, 유해 거리에 따른 중금속 농도와 생태 독성 결과 사이에 유의도가 떨어지는 것으로 사료된다. 이는 향후 용존성 유기물질(DOM, Dissolved Organic Matter)이나 입자성 유기물질(POM, Particulated Organic Matter) 등과 같은 독성에 영향을 주는 좀 더 많은 환경적인 요인을 고려한 연구가 필요함을 의미하며, 중금속의 축적도가 더 높다고 판단되는 토양 등에 대해서 지렁이 등을 이용한 독성 평가의 보완이 필요할 것이다. 또한 Ag과 같은 금속은 *D. magna*에 LC₅₀ 값이 0.47 µg/L로 매우 높은 독성을 보이듯이,^{14,15)} 본 연구에서 고려되지 못한 중금속이 독성 결과에 영향을 주었을 가능성도 존재하므로 독성이 잠재적으로 더 높아질 가능성이 남아있다. 또한 DU와 JD 지역에서의 결과와 같이 갯내수가 유출되어 희석되는 하류 지점보다 갯내수가 유출되는 지점에서 훨씬 높은 독성이 나타나는 것으로 나타

나 적절한 대책 없이 갯내수가 계속해서 흐른다면 주변 환경에 잠재적인 독성 증가가 있을 것이다.

3.3. HQ를 적용한 생태 위해성 평가 결과

Table 2에서 나타난 중금속 농도를 *D. magna*의 기준 독성 값(LC₅₀)으로 나눈 후, 평가계수 100을 곱해주어 산정된 HQ 값을 Table 4에 나타내었다. 유해 거리에 따라 대부분의 채수 지점에서 1보다 높은 HQ 값을 보이고 있다. 이는 높은 평가계수가 고려되었다는 점을 감안하더라도 높은 수치로써 폐광산 지역이 현재 심각한 생태 오염 상태에 있으며 향후 생태계에 많은 영향을 미칠 것임을 의미한다. 그러나 오염물 농도와 환경 그리고 인체 건강에 대한 영향 사이의 과학적인 판단 기준이 되는 WQC(Water Quality Criteria, EPA)¹⁶⁾와 비교해보면 실제보다 높게 예측되었을 위험성이 있다. Table 2에 나타난 비소, 카드뮴, 구리, 니켈 그리고 아연의 환경적으로 존재하는 농도는 WQC 중 급성 영향을 의미하는 CMC(Criteria Maximum Concentration) 농도보다 적게 검출되었으나, Table 4에 나타난 HQ 값은 1보다 큰 값을 나타내고 있다. 비소, 카드뮴, 구리, 니켈, 그리고 아연의 CMC 농도는 각각 340, 2, 13, 470, 120 µg/L이다. 크롬의 경우에도 역시 3가와 6가의 CMC 농도 값(각각 570, 16 µg/L) 보다 모두 적게 검출되었으나 네 곳에서는 1보다 큰 HQ 값을 보였다(Table 4). 이는 안전평가계수(safety factor) 100이 곱해졌기 때문이다. 한편, 비소 농도가 매우 높게 검출된 ND 두 지역인 ND(+0.3), ND(+0.6)과 아연 농도가 높게 검출된 DU 두 지역인 DU(+0.5), DU(+1.2)은 CMC 농도를 감안하더라도 위해도가 있는 것으로 판단된다.

Table 4. The results of Ecological Risk Assessment(ERA) on *D. magna* based on HQ(hazard quotient) value. The corresponding HQ less than 1 indicates a negligible toxicity, and HQ greater than 1 indicates a significant risk

Sample	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
N	<1	2.3	<1	53.0	<1	<1	42.8
SC(0)	10	1.6	<1	15.9	<1	<1	39.5
SC(+1.0)	10.2	<1	<1	4.0	<1	<1	10.3
ND(0)	1.5	<1	<1	1.4	<1	<1	13.6
ND(+0.1)	4.3	<1	<1	54.8	<1	<1	4.5
ND(+0.3)	10.5	824.4	5.6	520.7	1.4	46.4	7.5
ND(+0.6)	14.7	336.4	5.0	177.5	<1	<1	4.6
ND(+1.0)	<1	2.3	<1	4.7	<1	<1	4.7
DU(-0.1)	<1	<1	<1	2.3	<1	<1	2.6
DU(0)	3.9	<1	<1	<1	<1	<1	<1
DU(+0.5)	<1	826.3	2.9	936.8	1.9	<1	3253.4
DU(+1.2)	<1	513.1	2.7	393.7	1.0	<1	2123.6
JD(-0.1)	<1	7.6	<1	8.7	<1	<1	68.8
JD(0)	<1	1.8	<1	7.0	<1	<1	8.0
JD(+0.2)	<1	1.3	<1	7.7	<1	<1	17.8
JD(+0.4)	<1	2.3	<1	7.2	<1	<1	7.2

HQ 개념은 환경적으로 존재하는 오염물의 농도에 많은 영향을 받는다. 높은 농도로 존재하는 중금속은 그만큼 높은 위해도가 있을 가능성이 높은 것이다. 그러나, 개별 중금속에 따른 *D. magna*의 민감도 차이는 HQ 값의 산정에 있어 중금속 농도보다도 더 큰 영향을 미친다. *D. magna*의 독성 민감도가 떨어진다면 높은 농도로 존재한다 하더라도 실제 생물체에 미치는 영향은 적게 나타나기 때문이다. Table 4에서 카드뮴이나 구리는 검출 농도에 비하여 상대적으로 높은 HQ 값을 보이는 반면, 높은 검출 농도에 비하여 *D. magna*의 독성 민감도가 낮으므로 비소가 낮은 HQ 값을 보이고 있는데, 이러한 이유는 개별 중금속에 대한 *D. magna*의 독성 민감도 차이 때문이다. 높은 독성 민감도를 가지고 있는 구리에 대한 HQ 값이 낮은 이유이기도 하다. 일반적으로, 카드뮴 > 구리 > 크롬 > 아연 > 납 > 니켈 > 비소 순으로 독성 민감도가 나타나지만, 앞에서 언급했듯이 중금속에 대한 독성 값은 Table 1에 나타나는 경도를 고려된 값이어야 한다.

4. 결론

전라도와 강원도에 존재하는 5개 폐광산 지역의 *V. fisheri*, *S. capricornutum*, 그리고 *D. magna*를 이용한 생태 위해성 평가 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 중금속 성분 분석 결과, 중금속 농도가 전반적으로 높게 측정되었고, SC, DU, 그리고 ND 지역에서는 비소가 높게 측정되었다. 각 지점 별로 유해 거리에 따른 중금속 농도의 증가 또는 감소가 뚜렷하게 나타났다.

2) *D. magna* 독성 평가 결과에서는 광구에서만 높은 독성을 보였다. *S. capricornutum*이 상대적으로 민감한 독성 평가 종으로 나타났으며, 대부분의 지점에서 갭구로부터 유해 거리 별로 검출된 중금속 농도 증가에 따라 생물 독성 값은 증가하지 않은 것으로 나타났다. 또한 독성 평가 종에 따라 민감도가 다르게 나타났으므로, 2종 이상의 평가 종이 사용되어야 할 것으로 판단된다. 향후 중금속의 축적으로 영향 받는 주변 토양에 대한 독성 평가도 동시에 수행되어야 할 것으로 판단된다.

3) 생태 위해성 평가 결과, 폐광산의 중금속에 대한 영향은 심각한 정도의 위해도를 나타내었다(HQ>>1). 특히, 비소, 구리, 카드뮴 그리고 아연에 대해서는 유해 거리에 따라 하류까지 높은 HQ 값을 나타내었다. 이를 미루어 현재 폐광산 지역의 위해도가 심각한 바, 시급하게 실질적인 복원 대책이 필요하다.

참고문헌

1. 정명채, 정문영, 최연왕, “국내 휴/폐광 금속광산 주변의 중금속 환경오염 평가,” 대한자원환경지질학회지, 37(1), 21~33(2004).

2. 환경부, “2005 폐금속광산 토양오염실태 정밀조사결과” (2005).

3. 전관수, 이철희, 원양수, 신덕구, 정진욱, 박병삼, “금정 폐광산 주변환경의 중금속 농도 분포,” 대한환경공학회지, 21(10), 1945~1958(1999).

4. 정예진, 이상훈, “폐광산 복구지역 잔류광미로 인한 주변 지하수·토양 오염 가능성- 시흥 광산 사례,” 대한자원환경지질학회지, 34(5), 461~470(2001).

5. 이민희, 최정찬, 김진원, “고로폐광산 주변 농경지 토양 및 하천 퇴적토의 중금속 오염 분포 및 복원 대책 설계,” 대한자원환경지질학회지, 36(2), 89~101(2003).

6. 이진수, 전효택, “오염된 토양, 지하수 및 쌀의 인체 노출에 따른 비소의 위해성 평가,” 대한자원환경지질학회지, 38(5), 535~545(2005).

7. 나진성, 김기태, 김상돈, 장남익, 김용석, “*Daphnia magna*와 *Selenastrum capricornutum*을 사용한 방류수의 생물독성평가,” 대한환경공학회지, 26(12), 1326~1333(2004).

8. APHA-AWWA-WPCF, Standard Methods: For the examination of water and wastewater, 17th ed., APHA, Washington.

9. U.S. Environmental Protection Agency, “Short-term methods for estimating the chronic toxicity of effluents and receiving waters to freshwater organisms,” EPA/600/4-91/002(1994).

10. U.S. Environmental Protection Agency, “Methods for measuring the acute toxicity of effluents and receiving waters to freshwater and marine organisms,” EPA/600/4-90/02F(1993).

11. 임진희, Mixture toxicity of trace metals using *Daphnia magna* and risk assessment to mine drainage, 석사논문집(2004).

12. Duke, L. D. and Taggart, M., “Uncertainty factors in screening ecological risk assessment,” *Environ. Toxicol. Chem.*, 19, 1668~1680(2000).

13. Yim, J. H., Kim, K. W., Kim, S. D., “Effect of hardness on acute toxicity of metal mixtures using *Daphnia magna*: Prediction of acid mine drainage toxicity,” *J. Hazard Mater.*, B(138), 16~21(2006).

14. Bury, N. R., Shaw, J., Glover, C., Hogstrand C., “Derivation of a toxicity-based model to predict how water chemistry influence silver toxicity to invertebrates,” *Comp. Biochem. Phys. C*, 133, 259~270(2002).

15. Fjällborg, B., Ahlberg, G., Nilsson, E., Dave, G., “Identification of metal toxicity in sewage sludge leachate,” *Environ. Int.*, 31, 25~31(2005).

16. U.S. Environmental Protection Agency, “National recommended water quality criteria: 2002,” EPA-822-R-02-047 (2002).