

폐금속광산 지역에서 As, Cd 및 Zn의 노출경로에 따른 인체위해도 평가

이진수 · 전효택¹⁾

1. 서론

현대 사회에서는 유독성 원소들의 존재 여부나 처리방법 등의 오염도 평가뿐만 아니라, 이들 원소들에 노출됨에 따라 발생 가능한 인체영향에 대한 정도와 심각성을 정량적으로 평가하고 이를 홍보해 나가는 것에 초점을 두고 있다. 최근 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 구체적인 방법론으로 위해성 평가(risk assessment)를 실행하고 있으며, 이미 선진 각국의 규제 기관 즉, 미국 환경보호청, 식품의약국 등과 같은 주로 유해화학물질의 규제와 관련된 기관에서는 위해성 평가를 정책결정(decision-making) 수단으로 사용하고 있다.

그러나 국내의 경우 환경오염에 대한 연구가 1990년대에 들어 많은 연구가 진행되고 있으나 독성원소들이 인간의 건강에 미치는 악영향을 정량적으로 평가하는 실험 및 모델링 연구는 전무한 상태이다. 따라서 국내에서도 다양한 오염원에 의해 오염된 지역의 주민들에 대한 체계적이고 종합적인 오염평가 분석기술 및 위해성 평가 기법의 개발이 시급한 실정이다. 본 연구에서는 폐금속광산지역 주변 광미, 토양, 하상퇴적물, 농작물 시료들에 대한 화학분석자료를 바탕으로 독성 원소들이 이들 지역 주민들의 건강에 미친 악영향을 평가하기 위해 인체위해성 평가 모델링을 실시하였다.

2. 이론적 고찰

인체위해성 평가는 어떤 독성 물질이나 위험상황에 노출되어 나타날 수 있는 개인 혹은 집단의 건강 피해 확률을 추정하는 과학적인 과정이라고 정의할 수 있다(Kolluru et al., 1996). 다시 말하면 위해성 평가란 단순히 환경 중 오염도를 위해도로써 알기 쉽게 수치적으로 제시하는 과정만이 아니라 오염물질의 발생에서부터 인체로의 영향까지를 통계학적, 독성학적, 수학적, 사회정책 및 경제학적 측면 등을 모두 고려하여 사람이 환경적 위험에 노출되었을 경우, 발생 가능한 영향을 정성 또는 정량적으로 추정하는 과정이다.

위해성평가 방법이 가장 보편적으로 받아들여지고 있는 것은 미국 국가연구위원회(NRC; National Research Council)에 의해 고안된 위해성 확인(hazard identification), 노출평가(exposure assessment), 용량-반응 평가(dose-response assessment) 및 위해도 결정(risk characterization)의 주요 4 단계이다.

3. 폐금속광산 지역에서의 독성 원소들의 위해성 평가

위에서 언급한 것처럼 인체위해성평가 모델링은 4단계로 구분되는데, 1단계는 폐금속광산지역 주변 광미, 토양, 농작물 및 자연수 시료에 대한 화학분석결과를 바탕으로 주요오염원

주요어: 독성원소, 노출평가, 독성위해도, 발암위해도, 인체위해도 평가

1) 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부

을 파악하며, 독성 원소들의 유해성을 확인한다. 2단계에서는 오염지역 주민들이 독성 원소들에 노출되는 경로를 파악하기 위해 노출경로에 대한 개념적 모델을 구성하고 파악된 노출 경로에 따라 노출평가를 실시한다. 3단계에서는 발암물질과 비발암물질로 구분하여 용량-반응평가(독성평가) 정보를 수집한다. 마지막 4단계에서는 노출평가와 독성평가 결과를 통합하여 독성 원소들의 독성(비발암성)위해도와 발암위해도를 정량적으로 결정한다.

본 연구지역인 동일, 옥동 및 명봉광산 주변지역 주민들이 오염원인 광미로부터 독성 원소들에 노출되는 경로를 지하수(식수)노출경로 및 농작물(음식)노출경로 등으로 파악할 수 있다. 농작물(쌀과 배추)과 지하수에 대한 화학분석자료중 As, Cd, Zn에 대한 자료만이 인체위해성평가 모델링을 위한 변수로 이용되었고, 대상 노출 집단은 한국 성인(여성) 농부들로서 이들에 대한 평균몸무게, 평균수명, 일일음식섭취량, 노동시간 등도 변수로 투입되었다.

3-1. 노출 평가

동일, 옥동 및 명봉광산 지역에서의 지하수 및 음식(쌀과 배추)의 노출경로에 따른 각각의 독성원소들의 인체노출량 ADD의 계산결과에 의하면, 지하수노출경로에 의한 As의 인체노출량은 동일광산에서, Zn는 옥동광산에서 가장 높게 나타났다. 쌀알노출경로에 의해서는 Cd와 Zn의 인체노출량이 모두 동일광산에서 가장 높게 나타났다. 동일광산에서만 배추시료를 채취하였기 때문에 동일광산지역의 배추노출경로에 의한 Cd의 인체노출량은 쌀알에서보다 더 높았고, Zn는 경우는 쌀알노출에 의해서 인체노출량이 더 높았다.

3-2. 위해도 결정

독성(비발암)위해도의 정량화 : 독성위해도는 참고노출량과 비교함으로써 평가할 수 있으며, 비발암성 노출로 정의된다. 이 독성위해도는 HQ (Hazard Quotient) 지수로 나타내며, 이는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$HQ = \frac{\text{intake or exposure}}{\text{reference dose}} = \frac{\text{ADD (from exposure assessment)}}{\text{RfD (from IRIS of USEPA)}}$$

여기서 참고노출량(RfD)은 미국환경보호청 IRIS 데이터베이스 (<http://www.epa.gov/ngispgm3/iris>)의 자료를 인용하였다. 모든 노출경로에 따른 독성위해도는 이들 HQ 지수들을 총합한 HI(Hazard Index) 지수를 나타내며 다음과 같이 구할 수 있다.

$$HI = \sum HQs \text{ (sum of hazard quotients)}$$

위의 식에 의해 평가된 동일, 옥동 및 명봉광산에서의 As, Cd, Zn에 대한 독성위해도 HI 지수에 의하면, 동일광산 지역에서만 As과 Cd의 HI 지수가 각각 1.08과 2.52로 계산되었다. 따라서 As과 Cd에 대한 HI 지수가 모두 1 이상으로 동일광산 지역의 주민들에게 이들 원소들에 대한 독성이 발생할 가능성이 있음을 시사하고 있다.

발암위해도의 정량화 : 발암위해도는 독성원소들에 의한 장기간의 인체노출로부터 암이 발생할 수 있는 확률로 나타내며, 이 위해도는 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$\text{Incremental risk of cancer} = \text{ADD (average daily dose)} \times \text{SF (slope factor)}$$

여기서 ADD는 노출평가에 의해 산출되며, SF는 용량-반응평가를 통해 산출된 발암잠재력 수치로 SF는 RfD와 마찬가지로 미국환경보호청 IRIS 데이터베이스의 자료를 인용하였

다. 그러나 SF의 값이 As에 대해서만 산출되어 있으므로 본 연구에서는 지하수노출경로에 따른 As의 발암위해도 평가만 수행한 결과, 지하수의 노출경로를 통한 As의 발암위해도 평가 결과는 동일광산 지역에서 만명중의 4.9명(4.9×10^{-4})으로 가장 크게 나타났으며, 다음으로 명봉광산 지역에서 만명중의 3.1명(3.1×10^{-4})으로, 옥동광산 지역에서 십만명중의 6.1명(6.1×10^{-5})으로 나타났다.

4. 결 론

(1) 독성 원소들의 노출평가 결과, 지하수노출경로에 의한 As의 인체노출량은 동일광산에서, Zn는 옥동광산에서 가장 높게 나타났으며, 쌀알노출경로에 의해서는 Cd와 Zn의 인체노출량이 모두 동일광산에서 가장 높게 나타났다.

(2) 독성위해도 평가 결과, 동일광산 지역의 As과 Cd의 HI 지수가 각각 1.08과 2.52로 모두 1을 초과하므로 이들 원소들에 대한 독성이 발생할 가능성이 있음을 나타내고 있다.

(3) As에 대한 발암위해도 평가 결과, 지하수의 노출경로에 따른 As의 발암위해도가 동일광산과 명봉광산 지역에서 각각 만명중의 4.9명(4.9×10^{-4}) 및 만명중의 3.1명(3.1×10^{-4})으로 높은 확률로 나타났다. 이는 US-EPA에서 제시한 허용발암위해도($1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-6}$)보다도 크므로 이 지역 주민들이 As에 오염된 지하수를 식수로 계속적으로 장기간 섭취하게 된다면 As이 건강에 미치는 악영향이 크다고 판단된다.

참고문헌

- Kolluru, R.V., Bartell, S.M., Pitblado, R.M., Stricoff, R.S., 1996, *Risk assessment and management handbook*, McGraw-Hill, Inc., 620p.
- US-EPA., 1989, *Risk assessment guidance for superfund: Volume I Human health evaluation manual*, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC. EPA/540/1-89/002.