

폐금속광산지역 중금속의 위해성 평가

이진수* · 권현호 · 심연식 · 김태혁

광해방지사업단 기술연구센터

Risk Assessment of Heavy Metals in the Vicinity of the Abandoned Metal Mine Areas

Jin-Soo Lee* · Hyun-Ho Kwon · Yon-Sik Shim · Tae-Heok Kim

Technology Research Center, Mine Reclamation Corporation

ABSTRACT

An environmental survey from three abandoned metal mine areas was undertaken on to assess the risk of adverse health effects on human exposure to heavy metals influenced by past mining activities. Tailings contained high concentrations of heavy metals may have a impact on soils and waters around the tailing piles. In order to perform the human risk assessment, chemical analysis data of soils, rice grains and waters for As, Cd, Cu and Pb have been used. The HQ values for heavy metals via the rice consumption were significantly higher compared with other exposure pathways in all metal mine areas. The resulting HI values in three mine areas were higher than 9.0, and their toxic risk due to rice ingestion was strong in these mine areas. The cancer risk of being exposed to As by the rice consumption from the A, B and C mine areas was 5.1×10^{-3} , 6.8×10^{-3} and 3.1×10^{-3} , respectively. The As cancer risk via the exposure pathway of rice ingestion from these mine areas exceeds the acceptable risk of 1 in 10,000 set for regulatory purposes. Thus, the daily intakes of rice by the local residents from these mine areas can pose a potential health threat if exposed by long-term As exposure.

Key words : Arsenic (As), Exposure pathway, Toxic risk, Cancer risk, Risk assessment

요 약 문

본 연구에서는 폐금속광산 지역에서 중금속이 인체에 미치는 위해영향을 정량적으로 평가하기 위하여 3개 금속광산 주변 지역에서 농경지 토양, 농작물 및 지하수를 채취하여 화학분석을 실시하였다. 이들 폐금속광산 주변에 야적된 광산폐기물(광미)은 바람이나 집중 강우에 의해 광미담 하부에 있는 농경지나 하천으로 유입되어 주변 환경을 오염시킬 가능성이 크다. 따라서 폐금속광산에서의 인체노출경로는 농사활동을 통한 토양의 섭취, 지하수(식수)의 섭취, 쌀의 섭취, 농사활동에 의한 토양의 피부접촉 등 4가지로 파악할 수 있었다. 각 노출경로별 비발암성위해도 평가 결과, 모든 광산에서 쌀의 섭취를 통한 중금속의 독성위해도가 가장 높게 나타났다. 광산별 4가지의 인체노출경로를 총합한 HI 지수가 3개 광산 모두 9.0 이상을 나타내었으며, 특히 B 광산이 HI 29.2로 중금속에 의한 독성위해도가 가장 높은 것으로 판명되었다. 비소에 대한 발암위해도 평가 결과, 3개의 폐금속광산 지역에서 쌀 섭취의 노출경로를 통한 비소에 의해 암이 발생할 확률이 천명중의 1명 이상으로 높게 나타났다. 이는 환경부 토양오염 위해성평가지침(안)과 미국 EPA에서 제시한 허용가능한 초과발암위해도보다도 크므로 이들 지역 주민들이 비소에 의해 오염된 농작물(쌀)을 지속적으로 장기간 섭취하게 된다면 비소가 건강에 미치는 위해영향이 크다고 판단된다.

주제어 : 비소, 노출경로, 독성위해도, 발암위해도, 인체위해성 평가

*Corresponding author : jslee@mireco.or.kr

원고접수일 : 2007. 2. 15 게재승인일 : 2007. 2. 21

질의 및 토의 : 2007. 4. 30 까지

1. 서 론

현재 알려진 유독성 중금속들(As, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb, Zn)은 다양한 이동 매체를 통해서 생태계에 축적되어 동식물과 인간의 건강에 악영향을 미치고 있다. 특히 폐금속광산에서는 과거 채광이나 선광·제련과정 등의 광산활동으로 인하여 배출된 광산폐기물들(폐석, 광물찌꺼기 등)은 집중 강우나 바람에 의해 하부로 유실되거나 산성광산배수(Acid Mine Drainage)의 발생 원인으로 작용하여 주변 하천수와 지하수 및 토양을 오염시키는 등 많은 사회문제를 발생시키고 있다. 따라서 이들 지역들의 유독성 중금속의 존재나 처리방법 등의 오염도 평가뿐만 아니라, 중금속에 노출됨에 따라 발생 가능한 인체영향에 대한 정도와 심각성을 정량적으로 산정하는 인체위해성 평가시스템이 오염물질의 관리 및 오염환경 복원 전략에 있어서 매우 중요한 과정으로 인식되고 있다.

선진국의 경우 오염된 토양, 지하수 및 농작물 등의 환경매체내 유해오염물질들이 인간의 건강에 미치는 독성 및 발암성을 정량적으로 평가하는 위해성평가 시스템의 개발이 선도적으로 활발하게 진행되고 있다(Kolluru et al., 1996; Kimmel et al., 1999; Akagi et al., 2000; Alcock et al., 2000; Green et al., 2000; Lee et al., 2000; Paustenbach, 2002; Sekhar et al., 2003; Lee et al., 2004). 특히, 미국에서는 1980년대 ‘Superfund’ 법을 기점으로 ‘superfund site’로 지정된 오염지역에 대해 체계적, 통합적으로 운영·관리하는 프로그램이 실시되었다. 이 프로그램의 궁극적인 지침은 유해물질로부터 위협받고 있는 환경과 인간의 건강을 보호하는 것으로, 위해성 평가 과정이 오염환경 관리의 중요한 한 부분임을 강조하고 있고 유해물질의 규제와 관련하여 위해성 평가 결과가 정책결정의 중요한 수단 중 하나로 사용되고 있다. 특히, 지난 1992년 브라질 리우에서 열린 UNDP 세계환경회의에서 위해성을 이용한 유해화학물질의 관리에 합의가 이루어진 이후 전 세계적으로 위해성 개념을 이용한 유해화학물질 및 오염지역의 관리가 강화되고 있다.

국내의 경우 오염환경에서 유해 중금속들의 오염도 평가에 대한 연구는 1980년대 후반부터 시작되었으나, 대부분의 연구들이 이들 중금속의 오염조사에 국한되었으며, 중금속이 인간의 건강에 미치는 악영향을 평가하는 위해성평가 모델링을 적용한 연구는 극히 일부 연구지에 의해 수행되었으며(이진수 등, 2001; 이진수 등, 2003; 이진수와 전효택, 2004, 2005; Lee et al., 2000; Lee et al., 2005a, 2005b, Chung et al., 2005), 거의 전무한 상태이

다. 국제적 추세를 맞추어 1992년부터 환경부 G7 선도기술과제와 2001년부터 환경부 차세대핵심과제를 통해 위해성 평가 연구가 수행되어 왔으나, 환경관리를 위한 위해도분석 시스템으로 활용하기에는 아직 미흡하고 제도적인 뒷받침이 부족한 실정이다. 그러나 2004년 12월에 개정된 토양환경보전법 제15조의5의 규정에 의해 위해평가 제도가 도입되어 오염원인자에 의한 오염토양의 정화가 곤란할 경우 시장·군수·구청장이 오염토양을 정화하는 경우에는 오염물질이 인체와 환경에 미치는 위해의 정도를 평가하여 그 결과를 정화범위 및 정화시기 등을 반영할 수 있도록 하였고, 이에 2006년 9월에 토양오염 위해성평가지침(안)이 제정되었다.

따라서 본 연구에서는 폐금속광산지역 독성 중금속에 의해 노출됨으로써 오염지역의 수용체인 인간에게 미치는 악영향(adverse effect)의 정도를 과학적인 예측하기 위하여 금속광산지역 주변 토양(농경지), 자연수 및 농작물(쌀) 시료를 채취하여 중금속의 오염수준을 규명하고, 이들 화학분석자료를 바탕으로 지역 주민에 대한 중금속의 인체 노출경로를 파악하여 건강에 미치는 악영향(독성 및 발암성)을 정량적으로 산출하는 위해성 평가를 수행하고자 하였다.

2. 인체노출 현장모델

위해성평가 대상 폐금속광산 지역들의 주요오염원은 광산 폐기물인 광물찌꺼기(광미)로 비소를 비롯한 중금속을 다량 함유하고 있으며, 이들 광미들이 집중 강우나 바람에 의해 하부로 유실되어 광미땀 하부에 위치한 농경지를 오염시키고, 오염된 농경지에서 재배되는 농작물은 중금속에 의해 오염된다. 또한 광미 적치장으로 유입된 물은 광미장을 거치면서 다량의 중금속을 함유한 광산배수(침출수)가 생성되어 광미장 하부 수계(지표수 및 지하수)를 오염시킨다. 이들 폐금속광산 주변에 거주하는 주민들은 비소 및 중금속으로 오염된 농작물, 지하수 및 토양을 섭취, 접촉함으로써 중금속의 위해성에 노출된다. 따라서 폐금속광산 지역에서의 오염원-수용체 사이의 상호작용에 대한 노출경로를 중심으로 구성한 개념적 현장모델(CSM)은 Fig. 1과 같다. 오염된 토양, 농작물(쌀) 및 지하수의 섭취, 농사활동에 의한 토양의 피부접촉 등 인체노출경로는 총 4가지로 파악될 수 있다. 본 연구에서는 비산먼지 흡입에 의한 노출경로는 제외하였으나 현장 상황에 따라 비산먼지 흡입 경로도 고려할 수 있다.

폐금속광산지역(3개 지역) 반경 2 km 이내에서 채취한

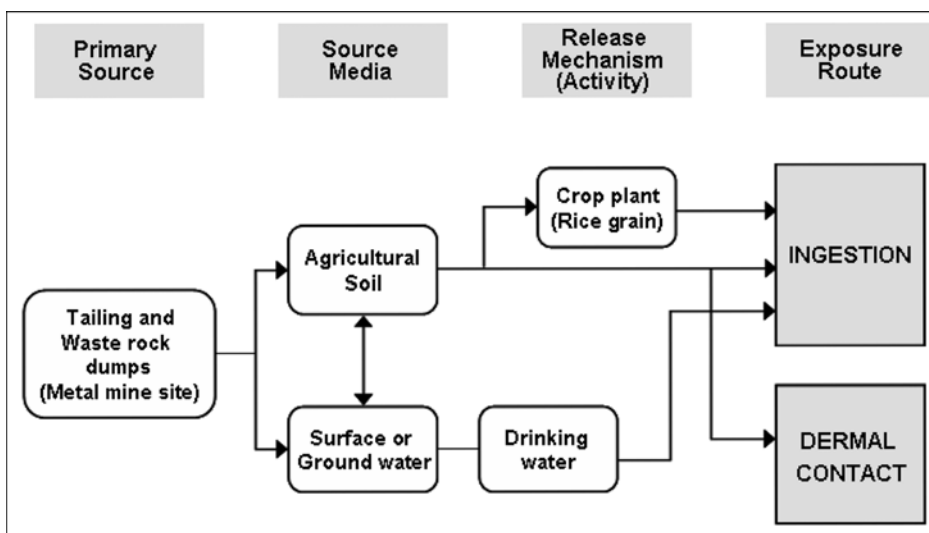


Fig. 1. Conceptual site model (CSM) for risk assessment in the abandoned metal mine areas.

Table 1. Mean concentrations of As, Cd, Cu and Pb in soils, waters and rice grains from the abandoned metal mine areas (unit in mg/kg)

Mine		As	Cd	Cu	Pb
A mine	Agricultural soils	0.90	0.83	8.97	46.50
	Waters*	0.001	1.48E-6	0.055	8.31E-5
	Rice grains	0.57	0.15	2.75	0.72
B mine	Agricultural soils	5.12	0.42	17.41	5.01
	Waters*	0.004	7.51E-7	0.106	8.96E-6
	Rice grains	0.76	0.14	5.30	3.99
C mine	Agricultural soils	2.01	0.43	13.23	13.11
	Waters*	0.001	7.69E-7	0.080	2.34E-5
	Rice grains	0.35	0.19	3.21	0.99

* Heavy metal concentrations in waters are calculated.

경작지 토양에 대하여 산가용성침출법에 의해 추출한 중금속 함량을 Table 1에 나타내었다. 또한 이들 경작지 토양에서 재배되는 쌀 시료내 중금속 함량과 이들 지역에서 음용수로 사용되는 지하수의 중금속 함량은 식에 의해 계산한 결과를 Table 1에 제시하였다. 이들 시료내 중금속 함량은 인체위해성 평가를 위한 오염물질의 농도로 이용된다.

3. 노출경로별 인체노출량 산정

폐금속광산 지역에서 현장모델 CSM 작성시 조사된 잠재적인 인체노출경로는 오염된 토양이나 농작물 및 지하수의 경구섭취 또는 피부접촉으로 파악되며 이들 노출경로별로 중금속의 일평균 인체노출량을 계산하는데 사용되는 수학적 식들이 Table 2에 제시되어 있다. 이들 노

출량을 산출하기 위해선 오염물질의 농도 이외에 노출변수 및 인체노출인자의 자료가 파악되어야 한다. 미국 EPA의 경우 이러한 노출변수에 관한 수많은 연구가 제시되어 있으며, 특히, 1989년 이후 1997년에 노출인자 핸드북(Exposure Factors Handbook)을 발행하여 그간의 노출변수에 관한 자료를 추가하고 새로이 검토함으로써 노출변수에 대한 새로운 권고값을 제시하고 있다(US EPA, 1989, 1997). 이러한 자료는 많은 연구자들에 의해 수행된 것으로서 특정지역에 대한 자료가 가용하지 않을 때 default 값으로서 사용된다. 본 연구에서는 환경부 토양오염 위해성평가지침(안)에서 정한 노출변수를 적용하여 인체노출량을 산정하고자 하였으며, 이 지침안에서 제시한 노출변수들은 주로 EPA의 자료를 적용하였으며, 일부 노출변수 및 인체노출인자는 국내의 통계자료를 사용하였다(Table 3).

Table 2. Equations of average daily dose (ADD) according to exposure routes (unit in mg/kg-day)

Exposure route	Average daily dose or intake
Soil ingestion	$ADD = \frac{C * IRS * ED * EF}{BW * AT * 365}$
Water ingestion	$ADD = \frac{C * IRw * ED * EF}{BW * AT * 365}$
Rice ingestion	$ADD = \frac{C * IRr * ED * EF}{BW * AT * 365}$
Dermal contact of soil	$ADD = \frac{C * SAS * AF * ABS * ED * EF}{BW * AT * 365}$

Table 3. Exposure factors and parameters for risk assessment

Factor/Parameter	Symbol	Units	Residential/ Agricultural
Exposure Duration	ED	years	30
Exposure Frequency	EF	days/year	365
Averaging Time	AT	years	70
Body Weight	BW	kg	60
Ingestion rate	IR		
Soil	IRs	kg/day	100 × 10 ⁻⁶
Rice (Farmer)	IRr	kg/day	0.358
Drinking water	IRw	L/day	2.0
Skin surface area	SA		
Skin surface area (forearms etc.)	SAs	cm ²	5700
Skin surface area (whole body)	SAw	cm ²	17000
Adherence factor	AF	mg/cm ²	0.07
Absorption factor	ABS	-	0.001 (Cd) 0.03 (As)

4. 용량-반응 평가 및 위험도 결정

노출평가를 통해 산출한 비소의 인체노출량을 이용하여 발암위험도와 비발암위험도를 결정하기 위해서는 용량-반응평가를 통해 산출된 중금속의 발암계수(SF)과 비발암참

고치(RfD) 수치가 필요하다. 화학물질의 발암성에 따른 미국 EPA의 분류에 의하면, As는 A 그룹으로 인체발암물질에 해당하며, Cd는 흡입시에만 B1 그룹으로 발암(의심) 물질로 규정하고 있으며, Cu와 Pb는 각각 D와 B2 그룹으로 비발암물질로 분류하고 있다(Table 4). 환경부 토양오염위해성평가지침(안)에 제시된 이들 중금속에 대한 경구 발암계수(SF_o), 피부흡수 발암계수(SF_{abs}), 경구 비발암참고치(RfD_o) 및 피부흡수 비발암참고치(RfD_{abs}) 값을 Table 5에 정리하여 제시하였다.

4.1. 비발암위험도 산정

폐금속광산 3개 지역들에 대한 각 노출경로별 중금속의 위험비율인 HQ 지수와 모든 노출경로를 총합한 중금속의 위험지수 HI 값을 Table 6에 제시하였다. Table 6에 제시한 대로 4가지의 인체 노출경로별 HQ 수치를 비교한 결과, 3개 광산 모두 광산 주변 농토양에서 재배되는 쌀 섭취를 통해 중금속의 비발암(독성) 위험도가 발생하는 것으로 나타났다. 반면, 토양의 섭취, 지하수의 섭취 및 토양의 피부접촉을 통한 HQ 지수가 모든 광산에서 1.0 이하로 나타나 이들 노출경로를 통해서는 독성위험도가 존재하지 않는 것으로 판단된다. 광산별 4가지의 인체노출 경로를 총합한 위험지수 HI 값이 3개 광산 모두 9.0 이상을 나타내었으며, 특히 B 광산이 HI 29.2로 중금속에 의한 독성위험도가 가장 높은 것으로 판명되었다. 또한 쌀 섭취를 통한 중금속별 독성위험도는 A 광산의 경우는 As의 독성위험도가, B와 C 광산의 경우는 Pb의 독성위험도가 가장 높게 나타났다. 따라서 이들 광산 지역에 거주하는 주민들이 지속적으로 As, Cd 및 Pb로 오염된 농작물(쌀)을 섭취한다면 이들 중금속에 의한 독성위험도가 발생할 가능성이 큼을 시사하고 있다.

4.2. 발암위험도 산정

폐금속광산지역의 각 노출경로에 따른 As의 발암위험도 평가 결과를 Table 7에 나타내었다. 이 결과에 의하면

Table 4. Classification of chemicals according to the weight of evidence from animal experiments, clinical experience and epidemiologic studies

Category	Criteria
A	Human carcinogen (sufficient evidence of carcinogenicity in humans)
B1	Probable human carcinogen (limited evidence of carcinogenicity in humans)
B2	Probable human carcinogen (sufficient evidence of carcinogenicity in animals with inadequate or lack of evidence in humans)
C	Possible human carcinogen (limited evidence of carcinogenicity in animals with inadequate or lack of human data)
D	Not classifiable as to human carcinogenicity (inadequate or no evidence)
E	Evidence of noncarcinogenicity for humans (no evidence of carcinogenicity in adequate studies)

Table 5. Slope factors and reference doses for As, Cd, Cu and Pb

Element	RfD (mg/kg-day)		SF (mg/kg-day) ⁻¹	
	RfD _o	RfD _{abs}	SF _o	SF _{abs}
As	3.0E-4	2.9E-4	1.5E-0	6.1E+1
Cd	1.0E-3(food) / 5.0E-4(water)	1.3E-5	-	-
Cu*	3.7E-2	-	-	-
Pb	5.0E-4	-	-	-

* Decision Support System (DSS) developed in the API (American Petroleum Institute)

Table 6. Hazard index (HI) and hazard quotient (HQ) of As, Cd, Cu and Pb according to exposure routes in the abandoned metal mine areas

Mine / Element	Exposure route	Hazard Quotient (HQ)				HI
		Soil ingestion	Water ingestion	Rice ingestion	Soil dermal contact	
A mine	As	0.002	0.029	4.859	0.000	4.890
	Cd	0.001	0.018	1.458	0.006	1.482
	Cu	0.000	0.000	0.010	-	0.010
	Pb	0.066	0.002	3.682	-	3.751
	SUM	0.069	0.049	10.009	0.006	10.133
B mine	As	0.012	0.168	6.478	0.002	6.659
	Cd	0.004	0.101	1.943	0.034	2.081
	Cu	0.000	0.000	0.010	-	0.010
	Pb	0.007	0.000	20.406	-	20.413
	SUM	0.02	0.269	28.837	0.036	29.163
C mine	As	0.005	0.066	2.983	0.001	3.055
	Cd	0.001	0.039	0.895	0.013	0.949
	Cu	0.000	0.000	0.013	-	0.013
	Pb	0.019	0.001	5.063	-	5.083
	SUM	0.025	0.106	8.954	0.014	9.100

Table 7. Cancer risk of As according to exposure routes in the abandoned metal mine areas

Exposure route Mine	Soil ingestion	Water ingestion	Rice ingestion	Soil dermal contact	SUM
A mine	2.3×10^{-6}	3.1×10^{-5}	5.1×10^{-3}	1.1×10^{-5}	5.2×10^{-3}
B mine	1.3×10^{-6}	1.8×10^{-4}	6.8×10^{-3}	6.2×10^{-5}	7.1×10^{-3}
C mine	5.1×10^{-6}	6.9×10^{-5}	3.1×10^{-3}	2.5×10^{-5}	3.2×10^{-3}

3개 광산 모두 쌀 섭취를 통해 As의 발암위해도가 천명 중의 1명 이상으로 높게 나타났다($3 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-3}$). 이는 환경부 토양오염 위해성평가지침(안)에서 제시한 허용가능한 초과발암위해도를 상회하고 있으므로 이들 지역 주민들이 As로 오염된 농작물(쌀)을 지속적으로 장기간 섭취하게 된다면 As가 인간 건강에 미치는 악영향(발암성)은 크다고 판단된다. 이외의 노출경로를 통해서도 허용가능한 발암위해도 이하로 나타났다.

5. 결 론

3개 폐금속광산 주변 농경지 토양, 지하수 및 농작물(쌀)을 대상으로 중금속의 위해성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 폐금속광산 지역들의 광미들은 집중 강우나 바람에 의해 하류로 유실됨으로써 주변 토양 및 수계를 오염시키고 있는 것으로 판단된다. 특히, 이들 지역들의 쌀내 중금

속 함량은 우리나라 평균 비이삭내 중금속 함량보다 모두 높게 나타났다.

(2) 폐금속광산 지역에서의 오염원-수용체 사이의 상호 작용에 대한 노출경로를 중심으로 구성된 개념적 현장모델(CSM)에 의하면, 인체노출경로는 ① 농사활동을 통한 토양 섭취, ② 지하수(식수) 섭취, ③ 쌀 섭취, ④ 농사활동에 의한 토양 피부접촉 등 4가지로 파악할 수 있었다.

(3) 각 노출경로별 비발암위해도 평가 결과, 모든 광산에서 쌀 섭취를 통한 노출경로에 의한 HQ 지수가 다른 노출경로에 비해 매우 높게 나타나 쌀 섭취에 의한 중금속의 비발암(독성) 위해도가 큼을 시사하고 있다. 다시 말하면, 이들 지역에서 쌀 섭취의 노출경로만 차단한다면 As, Cd, Pb의 독성위해도는 발생하지 않는다고 판단할 수 있다.

(4) As에 대한 발암위해도 평가 결과, 3개 광산 모두 지역 주민들이 장기간의 쌀 섭취를 통해 As에 의해 암이 발생할 확률은 천명중의 1명 이상으로 높게 나타났다 ($3 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-3}$). 이는 환경부 토양오염 위해성평가지침(안)과 미국 EPA에서 제시한 허용가능한 초과발암위해도보다도 크므로 이들 지역 주민들이 As에 의해 오염된 농작물(쌀)을 지속적으로 장기간 섭취하게 된다면 As가 건강에 미치는 위해영향은 크다고 판단된다.

(5) 3개의 폐금속광산에 대한 중금속의 인체위해성평가 결과, 광산별 인체위해도는 B 광산 > A 광산 > C 광산 순으로 나타났다. 이러한 결과는 폐광산지역의 광해방지 및 복구사업의 우선순위를 결정하거나 위해성에 근거한 정화 목표치를 설정하는 정책결정에 활용할 수 있다.

참 고 문 헌

- 이진수, Ben A Klinck, 전효택, 2001, 비소 및 독성중금속들의 인체위해성 평가 모델링, 한국자원공학회지, **38**(2), 136-145.
- 이진수, 전효택, 2004, 금속광산지역 독성 중금속원소들의 인체위해성 평가, 자원환경지질, **37**(1), 73-86.
- 이진수, 전효택, 2005, 오염된 토양, 지하수 및 쌀의 인체노출에 따른 비소의 위해성 평가, 자원환경지질, **38**(5), 535-545.
- 이진수, 전효택, 김경용, 김주용, 2003, 폐금속광산 지역에서의 독성중금속에 대한 위해성평가, 한국지구시스템공학회지, **40**(4), 264-273.
- 환경부, 2006, 토양오염 위해성평가지침(안).
- Akagi, H., Castillo, E.S., Cortes-Maramba, N., Francisco-Rivera, A.T. and Timbang, T.D., 2000, Health assessment for mercury exposure among schoolchildren residing near a gold processing and refining plant in Apokon, Tagum, Davao del Norte, Philippines, *Sci. Tot. Environ.*, **259**, 31-43.
- Alcock, R.E., Sweetman, A.J., Juan, C.Y. and Jones, K.C., 2000, A genetic model of human lifetime exposure to persistent organic contaminants: development and application to PCB-101, *Environ. Poll.*, **110**, 253-265.
- Chung, E.H. Lee, J.S. Chon, H.T. and Sager, M., 2005, Environmental Contamination and Digestibility of Arsenic and Heavy Metals around the Dongjeong Au-Ag-Cu mine, Korea, *Geochemistry: Exploration Environment Analysis*, **5**, 69-74.
- Green, E., Short, S.D., Stutt, E. and Harrison, P.T.C., 2000, Protecting environmental quality and human health: strategies for harmonization, *Sci. Tot. Environ.*, **256**, 205-213.
- Kimmel, G., Ohanian, E. and Vu, V., 1999, Framework for human health risk assessment, *Human. Ecol. Assess.*, **5**, 997-1001.
- Kolluru, R.V., Bartell, S.M., Pitblado, R.M. and Stricoff, R.S., 1996, Risk Assessment and Management Handbook, McGraw-Hill, New York, 870p.
- Lee, S.C., Guo, H., Lam, S.M.J. and Lau, S.L.A., 2004, Multipathway risk assessment on disinfection by-products of drinking water in Hong Kong, *Environ. Res.*, **94**, 47-56.
- Lee, J.S., Chon, H.T. and Jung, M.C., 2005a, Toxic risk assessment and environmental contamination of heavy metals around abandoned metal mine sites in Korea, *Key Eng. Mater.*, **277-279**, 542-547.
- Lee, J.S., Chon, H.T. and Kim, K.W., 2005b, Human risk assessment of As, Cd, Cu and Zn in the abandoned metal mine site, *Environ. Geochem. Hlth*, **27**, 185-191.
- Lee, J.S., Klinck, B. and Moore, Y., 2000, Dispersal, risk assessment modelling and bioavailability of arsenic and other toxic heavy metals in the vicinity of two abandoned mine sites in Korea, British Geological Technical Report WE/00/1, 91p.
- Paustenbach, D.J., 2002, Human and Ecological Risk Assessment: Theory and Practice, John Wiley and Sons, New York.
- Sekhar, K.C., Chary, N.S., Kamala, C.T., Rao, J.V., Balaram, V. and Anjaneyulu, Y., 2003, Risk assessment and pathway study of arsenic in industrially contaminated sites of Hyderabad: a case study, *Environ. Int.*, **29**, 601-611.
- US EPA, 1989a, Risk assessment guidance for superfund: Volume I Human health evaluation manual (Part A), EPA/540/1-89/002, Environmental Protection Agency, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, D.C., USA.
- US EPA, 1989b, Exposure Factors Handbook, EPA/600/8-89/043, Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, OH, USA.
- US EPA, 1997, Exposure factors handbook, EPA/600/P-95/002Fa (Update to Exposure Factors Handbook, EPA/600/8-89/043), Environmental Protection Agency Region I, Washington, D.C., USA.