

폐광산 지역의 비소오염에 대한 복원목표 설정  
— 미래 토지용도를 고려한 접근방법 —

이효민 · 윤은경 · 최시내 · 박송자\* · 황경엽\*\* · 조성용\*\* · 김선태\*\*\*

식품의약품안전청 독성연구소 위해도평가실,  
한국과학기술연구원 \*생체대사연구센터, \*\*환경복원연구센터, \*\*\*특성분석센터

Identification of Soil Remedial Goal due to Arsenic in Soil near Abandoned Mine

— Approach to Regarding Future Land Use —

Hyomin Lee, Eunkyung Yoon, Shinai Choi, Songja Park\*, Kyoungyub Hwang\*\*,  
Sungyong Cho\*\*, Suntae Kim\*\*\*

*Korea Food and Drug Administration  
National Institute of Toxicology Research, Division of Risk Assessment,  
Korea Institute of Science and Technology  
\*Bioanalysis and Biotransformation Research Center,  
\*\*Environment Remediation Research Center, \*\*\*Advanced Analysis Center*

ABSTRACT

Recently, It is increasing popularity to research on the soil remediation in aspect of management by reason of the hazardous impact on the contaminated soil in Korea. It was investigated high levels of arsenic salts in soil near abandoned five mines(Darak, Daduk, Jingok, Dalsung, Ilkwang) located in Youngnam area. Arsenic, classified as group A(Human Carcinogens) from IRIS, have shown statistically significant increment in skin cancer with oral exposure. This paper was conducted to predict excess cancer risk value (to the skin cancer) based on multiple pathway such as soil ingestion, dermal uptake and food(plant) ingestion contaminated by arsenic, and also, to identify the remedial goal regarded in future land use. The mine having the highest arsenic level was Daduk(mean: 1950mg/kg) and the next rank was Jingok(1690mg/kg), Ilkwang(352.37mg/kg), Dalsung(86.08mg/kg), Darak(0.83mg/kg).

The chronic daily intake to the multiple exposure were calculated using Monte-Carlo simulation regarded in future land use and used  $Q_i^*$  value was  $1.5(\text{mg/kg/day})^1$  to the

oral proposed by IRIS(1997). The computed excess cancer risk 95th value to all the mine regarding future land use as residential and rural area were more than  $10^{-4}$ . If the level of acceptable risk is aimed for  $1 \times 10^{-6}$ , it could be used Darak as commercial and industrial area without soil remediation due to the lowest risk value ( $6 \times 10^{-6}$  and  $3 \times 10^{-6}$ ). Computed remedial goal based on  $1 \times 10^{-6}$  of acceptable risk to the future land use as the residential, rural, commercial and industrial area were 0.02mg/kg, 0.003mg/kg, 97.31mg/kg and 194.62mg/kg, respectively

**Key words :** Abandoned mine, Excess cancer risk, Monte-Carlo simulation, Acceptable risk, Soil remediation

## 요 약 문

최근, 오염된 토양에 의한 유해영향들이 보고되면서 보건관리차원에서 토양복원에 대한 관심이 고조되고 있다. 본 연구에서는 영남지역에 위치하고 있는 5곳의 폐광산지역(다락광산, 다덕광산, 진곡광산, 달성광산, 일광광산)을 대상으로 광산입구와 주변지역의 토양중 비소오염도를 조사하였고, 위해성평가 방법론을 활용하여 오염된 토양에 의한 인체노출경로를 확인하고, 장기적인 노출시 만성일일노출량과 초과발암위해도를 계산하므로, 지역의 미래토지이용도를 고려한 복원목표를 설정하였다. 비소는 인체 발암물질(Human Carcinogen, IRIS 1997)로 구분되는 유독물질로서 경구노출에 의해 피부암 유병률이 통계학적으로 유의하게 높은 것으로 알려지고 있다. 토양중 비소는 구강을 통한 직접섭취, 피부흡수, 토양비소가 식물로 전달된 식품의 섭취를 통해 인체에 노출될 수 있다.

광산별 비소오염도 수준은 다덕광산이 가장 높아, 평균값이 1950mg/kg 이었으며, 진곡광산도 1690mg/kg 수준으로 높았고, 오염도 순위는 다덕광산, 진곡광산, 일광광산, 달성광산, 다락광산 순이었다. 비소오염도에 근거한 토지용도별 위해도치 계산을 위하여 미래의 토지용도를 주거지역, 농경지역, 상업지역, 공장지역으로 구분하고 각각의 노출시나리오(토양섭취, 피부흡수, 식품을 통한 노출)를 설정하여 지역별 만성일일노출량을 구하고, 발암력  $1.5(\text{mg/kg/day})^{-1}$  (IRIS, 1997)을 환산함으로써 비소에 대한 피부암 초과발암위해도치를 구한 결과, 계산된 95th 값 수준은 주거지역, 농경지역의 경우 모든 광산이  $10^{-4}$ 이상 수준이었고 상업지역의 경우는 다락광산이  $6 \times 10^{-8}$ 수준으로 가장 낮았으며, 공장지역의 경우는  $3 \times 10^{-8}$ 수준으로 다락광산이 가장 낮았다.

비소의 복원목표 설정을 위해 초과발암위해도 수준  $10^{-6}$ 을 허용수준으로 하였을 경우 현 상태에서 복원작업 없이도 토지활용이 가능한 광산으로  $10^{-6}$ 수준의 위해도치를 나타낸 다락광산의 경우 상업지역과 공장지역으로의 활용이 가능할 것으로 판단되었다. 또한 허용위해도 수준을  $10^{-6}$  수준으로 하고 토양의 비소오염도 수준을 역추적하므로 구한 복원목표치는 주거지역, 농경지역, 상업지역, 공장지역의 경우 각각 0.02 mg/kg, 0.003mg/kg, 97.31mg/kg, 194.62mg/kg 수준으로 추계되었다. 즉, 일광광산의 경우 공장지역으로 활용코자 한다면 지역의 비소오염도 수준을 194.62mg/kg 이하 수준(복원목표수준)으로 낮춰야 한다.

**주제어** : 폐광산, 초과발암위해도, 허용위해도, 토양복원

## 1. 서 론

광산은 채광이 진행중인 경우에도 주변환경을 오염시켜 여러 가지 악영향을 주지만, 폐광이 된 후 적절한 조치 없이 방치되면 주변 환경의 오염을 더욱더 가중시키게 된다. 폐광산을 발생오염물질의 종류에 따라 구분하면, 산폐수가 주로 문제시되는 폐석탄 광산, 중금속을 유출시키는 폐금속광산, 그리고 특별한 오염물질을 발생시키지는 않지만 인근 주변을 황폐화시키는 폐석회 및 시멘트 광산 등으로 구분할 수 있다. 현재 전국적으로 집계되고 있는 폐광산의 수는 212군데 정도로 알려지고 있어, 폐광산 주변지역의 오염확산예방과 주변지역의 토지용도와 관련된 보건관리 차원에서 구체적인 토양복원(Soil remediation) 기술연구가 활발히 진행되고 있다.

토양복원기술의 예로 미국의 superfund 사례를 살펴보면, 기초조사 단계인 PA/SI/LSI (Preliminary Assessment/Site Inspection/List Site Inspection), HRS scoring/NPL listing, RI/FS(Remedial Investigation/Feasibility study), RD/RA(Remedial Design/Remedial Action)등의 4단계로 크게 구분되는데, 지역조사와 함께 인체건강평가(human Health evaluation)를 실시하여 현 오염상태의 보건학적 의의를 평가하고 있고 궁극적인 복원목표(remedial goal) 설정시 미래의 토지용도에 대한 장기적인 인체건강영향을 고려하여 복원목표를 설정하고 있다<sup>1),2)</sup>.

이와 같이 어떤 유해물질이나 유해환경에 대한 장·단기적인 노출에 따른 건강영향을 정량적으로 평가하는 일을 건강위해성 평가(health risk assessment)라 하며, 그 평가의 결과는 노출로 인한 추가발암위해도(extra risk)수준을 제시하여 준

다. 최근 국내에서도 분야별 토양복원 기술연구가 활발히 진행되고 있으며 토양복원전의 목표설정 뿐만 아니라, 복원후의 적용기술평가를 목적으로 위해성 평가의 방법론을 최대한 활용할 수 있도록 제반연구가 진행되고 있다<sup>3)</sup>.

비소는 주로 arsenate ( $As^V O_4^{3-}$ ), arsenite ( $As^{III} O_3^{3-}$ ), arsenide ( $As^{3-}$ ), organic arsenic compounds ( $As-C-$ ) 등의 상태로 존재하는데, 자연계 내에서는 arsenite나 arsenate 형태로 주로 토양과 수질에 존재하며, 유기물질의 형태보다는 무기물질 형태에서 독성을 강하게 나타낸다. 비소는 용광로나 화로에서 연소과정시 입자상 형태인 arsenic oxide가 형성되어 토양이나 수계로 유입될 수 있으며, 농업용이나 특수부지에서 제초제 등으로 쓰이기도 한다. 또한, 소량이지만 하나 유리 및 도자기 산업에서 용제로 이용시 주로 arsine 형태로 이용하는데, 다른 염들과는 달리 arsine은 가스상으로 인체에 노출되어, 직접 헤모글로빈과 결합, 적혈구를 용해시킨다. 미생물 분해로도 arsine이 생성되긴 하지만 산화가 빠르게 진행되어 arsenate나 arsenite로 쉽게 전환되며, 자연계에서는 arsenate가 안정된 형태이어서 주로 이 형태로 존재한다.

일단 환경 중에 노출된 비소는 토양의 미립자에 흡착된 형태로 장기간 존재하나, 수계로 쉽게 유실될 수 있어 황광산지역이나 화산지역 등, 지질학적으로 비소 농도가 높은 지역의 경우 주변지역의 수계나 식물에서 비소농도가 높음이 입증되고 있다<sup>4)</sup>.

수용액상 arsenite와 arsenate의 경우 생체흡수율은 인체와 대부분의 실험동물에서 90%이상 높게 보고되고 있으며<sup>5)</sup>, 흡연을 통해 인체내 폐로 유입된 비소도 85-90%정도가 흡수되는 것으로 알려지고 있다<sup>6)</sup>. 또한 피부 흡수를 알아보고자 원숭이

를 대상으로 한 실험에서 수용액상의 비소는 6.3%, 토양중의 비소는 4.5%의 피부 흡수율을 나타내었다<sup>7)</sup>. 비소에 대한 급성 혹은 아만성 노출에 관한 인체 독성들은 호흡기계, 소화기계, 순환기계, 신경계 등 인체 여러 기관에 걸쳐 나타나며, 비소가 피부, 호흡기, 눈에 노출시 심한 자극 증세를 나타내고, 인체에 고농도 노출시 비정상적인 심전도 등 심장에 영향을 미친다. 만성적인 노출의 경우 대표적 증상으로 코뼈에 궤양이나 구멍이 나타나는 것으로 보고되고 있으며, 고농도로 혹은 반복적인 노출시 신경손상이 유발되는데, 핀으로 찌르는 듯한 통증, 화끈거림, 무감증, 수족 약화 등이 나타나는 것으로 알려지고 있다. 또한, 피부의 약화나 접촉부위의 피부색소 침착, 소실 등이 나타나고, 손톱에 백선이 나타나기도 한다. 이 밖에도 만성적인 노출로 인한 간장의 손상이나 혈관축소, 골수에서의 조절작용 위축 등이 보고되고 있다<sup>8)</sup>.

비소는 이러한 일반 독성이외에도 인체와 동물에서의 최기원성이 알려지고 있는데, 예를 들어 작업장 근무자들과 주변 주민들에게서 높은 기형발생과 유산빈도 등이 보고된바 있으며<sup>9)</sup>, 일부 역학조사에 따르면 비소에 노출된 어린이의 청력발달장애

가 알려지고 있다<sup>10)11)</sup>. 또한 비소가 인체의 폐, 피부 그리고 여러 기관에서 암을 유발시킴이 역학연구에 의해 입증된 바 있어<sup>12)~14)</sup>, U.S.EPA에서는 비소를 인체발암물질(Group A)로 분류하고 있다<sup>15)</sup>.

본 연구에서는 영남지역의 폐광산 5곳을 대상으로 광산 입구와 주변지역의 토양중 비소 오염도를 조사하였고, 비소오염도에 근거한 토지용도별 위해도치를 계산하였으며, 광산별 위해도치를 비교하였고, 복원목표설정 위해성평가 방법론을 활용하므로 미래토지이용도를 고려한 각 광산별 복원목표를 모색하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 연구대상지역

경북지역의 다락광산, 다덕광산, 진곡광산, 달성광산, 그리고 경남지역의 일광광산등 모두 5곳의 폐광산을 대상으로 하였으며 Table 1에 표기하였다.

Table 1. Selected Mines in This Study

Name of abandoned mine	Main product	Abandoned date	Operating period
(1) Darak	Au	1967	1931-45, 1965-67
(2) Daduk	Pb, Zn	1944(?)	1930-?
(3) Jingok	Au	?	?
(4) Dalsung	Cu, W	1972	1961-1972
(5) Ilkwang	Au, Ag, Cu	1983	?

### 2.2 복원목표 설정방법

각 지역별 토양 비소오염도에 근거한 미래의 토

지용도별 복원목표설정을 위하여 위해성평가 방법론<sup>12)</sup>을 활용하였다. 전체적인 복원목표설정 방법론은 Fig. 1과 같았다.

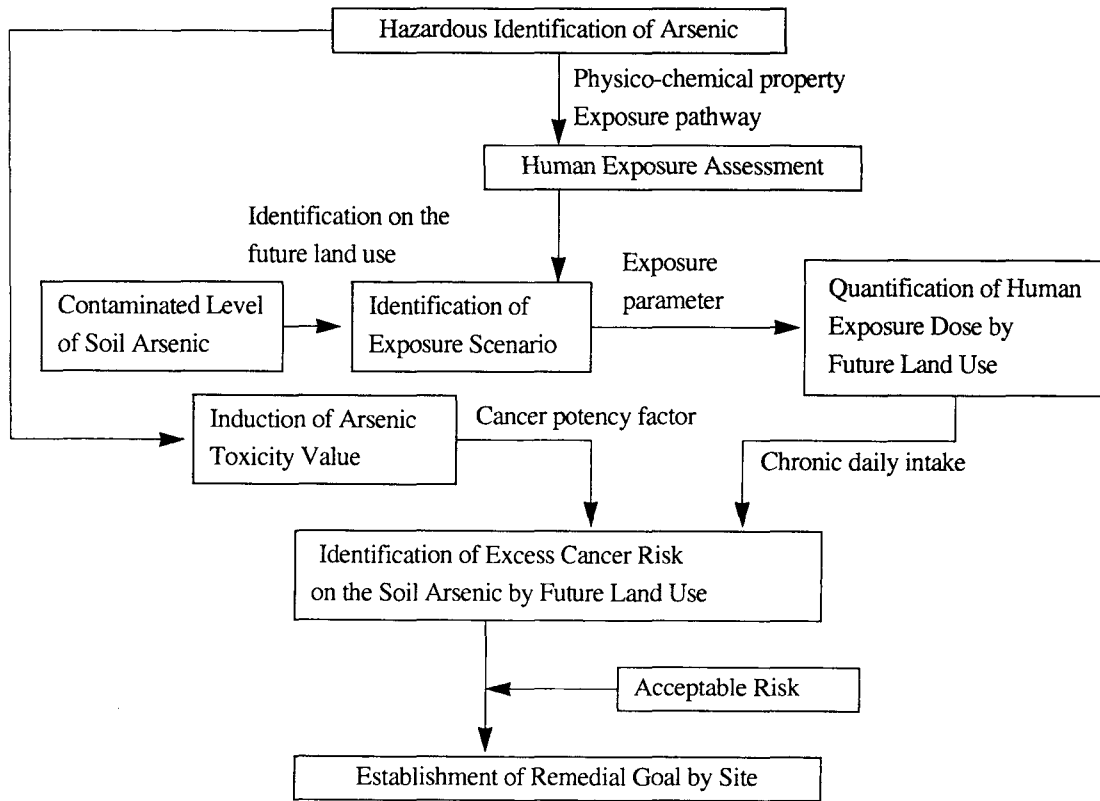


Fig. 1. Scheme for establishment of remedial goal using risk assessment.

2.2.1 위험성 확인

비소의 환경중 동태와 급·만성 독성 및 역학자료 등을 파악하기 위하여 IRIS(1997), MSDS(1997), Cheminfo(1997), HSDB(1997) 등의 자료를 검색 정리하였다<sup>15)~18)</sup>.

2.2.2 인체노출평가

지역별 비소오염도자료를 Crystal Ball®의 fitting program을 이용하여 각각의 분포형태를 파악하였고, 만성일일노출량(chronic daily intake, 이하 CDI로 표기) 계산시 오염도 분포값을 활용하였다<sup>19)</sup>.

비소의 위험성 확인자료를 고려하고, 토지의 미

래이용도에 근거하여 Table 2와 같이 주거지역, 농경지역, 상업지역, 공장지역으로 구분하여 각각의 노출시나리오(토양섭취, 토양피부흡수, 식품을 통한 노출)를 설정하였고, 각 시나리오에 따른 지역별 CDI값을 구하였다.

각각의 토지용도별 노출비율은 성인을 대상으로, 생활하면서 발생할 수 있는 경로별 노출시 오염토양에 노출될 비율을 고려하여 설정한 것으로 상업지역과 공장지역으로 사용할 때는 오염된 토양에서 재배된 식품의 섭취비율이 거의 없을 것으로 가정하여 zero로 하였으며, 농경지역으로 사용할 경우는 오염토양에서 재배된 야채를 섭취할 것으로 가정하여 노출비율을 0.6으로 설정하였다<sup>20)</sup>.

Table 2 . Exposure Scenario and Exposure Parameter by Future Land Use

Land use	Fraction of contaminated source			Exposure frequency <sup>2)</sup> (day/year)	Exposure duration <sup>3)</sup> (year)
	FI-soil	FD	FC-food		
Residential area	0.3	0.3	0.1	350	30
Rural area	0.5	0.5	0.6	350	30
Commercial area	0.2	0.2	0	250	25
Industrial area	0.1	0.1	0	250	25
All same applied exposure parameter					
Soil ingestion rate(mg/kg/day)	0.14 ± 0.28 <sup>20)</sup> (Mean ± S.D.) <sup>20)</sup>		Averaging time (day)	25550 <sup>1)</sup> (for carcinogenic chemicals)	
Body weight (kg)	70 ± 14.0 <sup>20)</sup> (Mean ± S.D.)		Skin area (cm <sup>2</sup> /kg bw)	0.024 ± 0.00144 <sup>20)</sup> (Mean ± S.D.)	
Skin adherence (mg/cm <sup>2</sup> )	0.5 ± 0.2 <sup>20)</sup> (Mean ± S.D.)		Dermal absorption(ABS)	0.003 <sup>20)</sup> (estimated value)	
Food(vegetable) ingestion(g)	272.4		Food(root) ingestion(g)	19.2	

FI-soil : fraction direct ingested from contaminated source(unitless)

FD : fraction direct dermal uptake from contaminated source(unitless)

FI-food : fraction indirect ingested through food(homegrown plant) from contaminated source(unitless)

이 밖에도 토양의 섭취비율과 피부노출비율 설정은 농경지역과 주거지역의 경우 직접 농업에 종사하거나, 가정에서 하루종일 머무는 성인을 대상으로 하였고, 상업지역과 공장지역의 경우는 출·퇴근하는 근로자 성인을 대상으로 설정하였다. 노출기간은 주거지역에 대한 성인 노출량 계산시 U.S.EPA (1989b)에 근거하여 30년으로 설정하였으며, 상업지역과 공업지역의 경우는 25년을 적용하였다. 기대수명은 비소가 발암물질이므로 70년으로 하였으며<sup>1)</sup> 체중과 체표면적, 피부침착율, 피부흡수율, 토양섭취량 등은 평균값과 표준편차를 이용 분포값을 활용하므로 Monte-Carlo simulation 을 통해 CDI를 계산하였다. CDI의 계산수식은 Table 3과 같다.

### 2.2.3 독성값의 활용

IRIS(1997)의 정보검색을 통해 U.S.EPA에서 제안하고 있는 비소의 인체발암자료를 선택하였다<sup>15)</sup>.

### 2.2.4. 초과 발암위해도 계산

인체노출평가에서 구해진 광산지역별, 토지용도별, CDI 값과  $Q_1^*$ 를 환산<sup>1)</sup>하여 비소의 초과 발암위해도를 percentile 값으로 구하였다.

### 2.2.5 복원목표설정

허용 위해도 수준이  $10^{-6}$ 에 해당하는 토지용도별 비소농도(복원목표가 되는)를 Fig.1의 역추산에 의해 구하였고, 이것을 실제 광산지역별, 토지용도

**Table 3. Pathway Specific Exposure Equations as Which Suggested the Risk Assessment Guidance for Superfund**

Exposure pathway	Equation
Soil ingestion	$C \times \frac{IR_{\text{soil-ingestion}}}{BW} \times FI \times \frac{EF \times ED}{AT} \times CF$
Dermal uptake	$C \times \frac{SA}{BW} \times Sa \times ABS \times FC \times \frac{EF \times ED}{AT}$
Food(plant) Ingestion	$\frac{((C \times IR_{\text{root-ingestion}} \times BCF_{\text{root}}) + (C \times IR_{\text{stem-ingestion}} \times BCF_{\text{stem}}))}{BW} \times FI \times \frac{EF \times ED}{AT} \times CF$

(U.S.EPA, 1989b)

- C : Chemical concentration in soil(mg/kg)
- SA : Skin surface area available for contact (cm<sup>2</sup>/kg)
- IR : Ingestion rate (mg/kg/day)
- Sa : Skin adherence(mg/cm<sup>2</sup>)
- ABS : Dermal absorption factor(unitless)
- CF : Conversion factor
- FI, FC : Fraction ingested(FI) or contacted(FC) from contaminated source (unitless)
- BCF : Bioconcentration factor

별 초과발암위해도와 비교하므로 복원목표를 설정하였다.

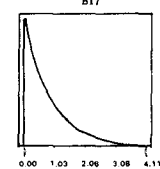
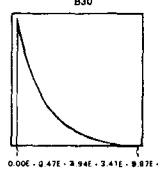
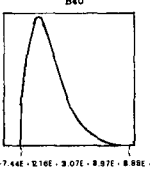
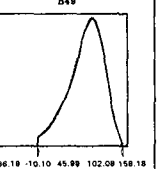
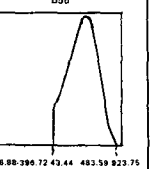
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 광산지역별 비소오염도

지역별 비소 오염도는 다덕광산이 가장 높아 그 평균값이 1950 mg/kg 이었으며 진곡광산도 1690 mg/kg수준으로 높았고 대체로 최저값과 최고값의 범위가 매우 컸다. 모든 광산의 비소 오염도 분포는 정규분포 형태를 취하고 있지 않고, exponential distribution, extreme value distribution등의 형태를 취하고 있어 실제적으로

평균값을 대표값으로 인정할 수 없었다. 이럴 경우 대표값으로 중앙값, 최빈값 등을 사용하게 되는데 본 연구에서는 CDI 계산시 분포값을 모두 고려하여 Monte-Carlo simulation에 활용하므로 대표값 선정오류에 의한 결과의 영향을 줄이고자 하였다. 실질적인 복원작업 수행시 지역의 시료채취위치, 시료수, 오염도 검출한계, background 수준 등이 모두 고려되어 구체적인 작업 계획이 설정되었지만, 개략적인 오염도자료를 살펴볼 때 다덕광산의 경우 15개의 시료중 최저값과 중앙값, 평균값의 오염도 차이는 크지 않으나, 최대값과의 차이는 매우 큰 것으로 보아 지역의 일부만이 심한 오염도를 나타내는 것으로 판단되어져, 복원토양의 면적

**Table 4. Levels of Arsenic in Soil near Mine by Individual Site**

Arsenic concentration (mg/kg)	Name of abandoned mine ( sample number)				
	Darak (15)	Daduk (11)	Jingok (8)	Dalsung (7)	Ilkwang (5)
Mean $\pm$ S.D	0.833	1950	1690	86.085	352.375
Median	0.45	1500	1790	91.3	379
Minimum	0.25	286	242	27.9	11.5
Maximum	2.25	4520	3360	129	1300
Data distribution					

을 고려한 차별작업이 적용되어야 할 것으로 여겨지며, 반면, 달성광산은 최고값과 중앙값, 평균값의 차이가 미미하여 이 지역의 오염도수준은 지역이 대체로 유사한 것으로 판단되어, depth 오염도 자료에 의한 보다 구체적인 계획이 세워지겠지만, 우선적으로 위 오염도 자료에 근거한 개략적인 복원작업계획은 다락광산과 같이 복원토양면적을 고려한 차별작업은 배제되어도 될 것으로 판단된다.

### 3.2 비소의 환경내 동태 및 발암, 비발암독성

환경중 비소는 토양, 하천 저층토양, 동/식물체, 해양생물체 등에 널리 분포되어 있고, 주로 토양과 식물체에 존재하는 것으로 보고되었다<sup>4)</sup>. 토양중 비소는 arsenate로 전환되어 다른 금속의 hydrous oxides에 결합되고, 일부는 서서히 수계로 용해되기도 하며, 일부 비소는 biomethylation을 거쳐 휘발되어 대기 중에서 산화형태로 존재하거나 식물로 전달되어 인체에 노출된다.

이와 같은 토양중 비소화합물의 환경내 동태에

관여하는 변수들은 대체로 증기압 (vapor pressure), pH등이 있으며, 비소산화물의 경우 수용해도는 낮으나, hydrochloric acid가 존재하거나 알칼리 상태에서의 용해도는 비교적 큰 편이어서 수계와 식물체로의 이동이 용이하고 biomethylation에 의해 토양중 비소가 일부 휘발가능하지만 미미한 수준이다. 그러나 토양중 비소의 다른 매체로의 이동은 주로 생물체로의 농축현상이 비울적으로 큰 편이다. 이러한 이유로 본 연구에서는 노출되는 경로를 고려하였고, 수계로의 이동에 의한 노출은 음용수 섭취패턴을 설정할 수 없어 고려하지 못하였다.

비소는 인체발암물질로 알려져 피부암과 폐암을 유발시키는 것으로 역학연구를 통해 입증되고 있고<sup>15), 21)~24)</sup>, 신장암, 간암 등에 대한 증거도 알려지고 있다<sup>25)</sup>.

대표적인 식품오염사례로 일본의 분유사건을 들 수 있다. 그 당시 15-24 mgAs/kg으로 오염된 분유가 12,000명의 신생아에게 1.3-3.6mg/day정도로 노출되어 130명의 목숨을 앗아갔는데, 노출후 몇



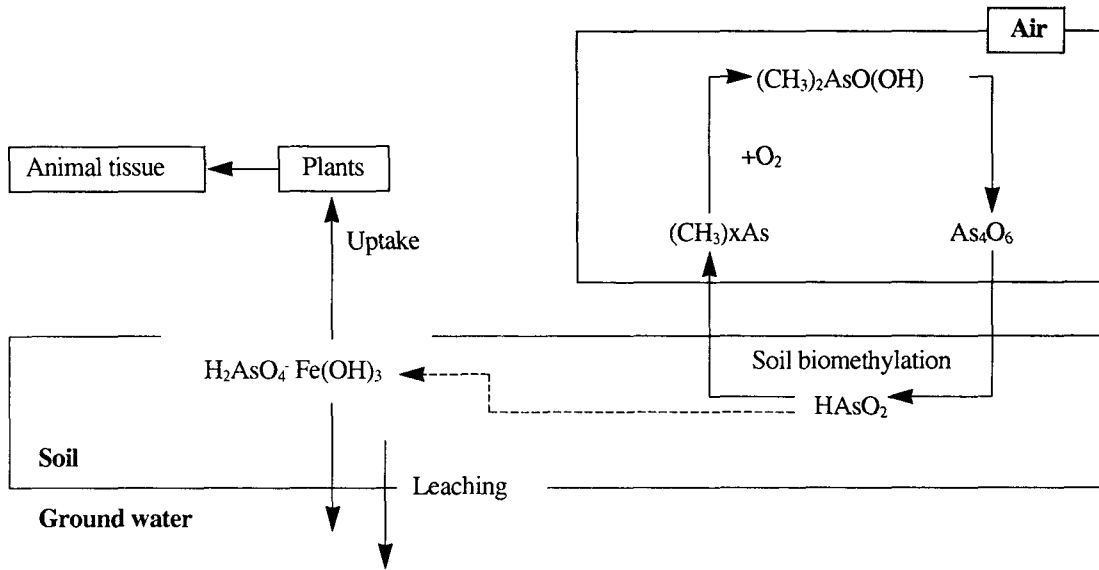


Fig. 2. Translocation of arsenic in soil

Table 5. Toxicity of Arsenic in Human

Toxicity	Effects
Carcinogenicity	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increased lung cancer mortality in exposed people to inhalation</li> <li>• Increased multiple internal organ (lung, kidney, liver and bladder) skin cancer incidence in populations consuming drinking water</li> </ul>
General toxicity	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acute - Gastrointestinal distress, skin eruptions, severe diarrhea, kidney failure, convulsions, coma, death</li> <li>• Chronic - Skin hyperpigmentation, garlic odor of the breath, liver and kidney failure, lethargy and peripheral neuritis</li> </ul>
Mutagenicity	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non or slight</li> <li>• Chromosomal breakage, chromosomal aberrations, and sister chromosomal exchange in cultured cells including human cell</li> <li>— Chromosomal aberration in lymphocytes of Swedish copper smelter (Nordenson et al., 1978)</li> <li>— Sister chromatid exchange rate elevated in lymphocytes of patients treated with flower's solution (&gt;3mg/day, Burgdorf et al., 1977)</li> </ul>
Teratogenicity /Reproductive toxicity	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Higher frequency of congenital malformation in the children of women at smelter (Nordström et al., 1979)</li> <li>• Higher frequency of abortions was in woman living nearest the factory than reference population (Nordström et al., 1978)</li> </ul>

주간은 열과 불면증, 거식증 등의 증세가 관찰되었고, 일부 생존자들에서는 15년후 중추신경계 이상과 비정상적인 심전도, 심한 청력장애가 나타난 것으로 보고되고 있다<sup>10), 26)</sup>. 또한, 비소로 오염된 우물을 식수로 이용하는 마을에서 blackfoot 증세가 나이와 상관성 있게 나타남이 역학연구에 의해 보고되고 있으며<sup>27)</sup>, 이와 연계되어 U.S.EPA에서는 이들 역학 연구에서 나타난 hyperpigmentation과 keratosis 그리고 이와 관련된 혈관계 합병증에 따른 NOAEL 값 0.009mg/L (0.0008mg/kg/day; 55kg, 4.5L/day)을 취하여 RfD값 선정에 응용하고 있다<sup>15)</sup>.

이밖에도 임신 중에 금속제련 작업에 참여한 임산부에게서 태어난 신생아 기형빈도가 주변지역 기형 발생률의 2배, 전체 기형발생률의 5배에 달하며, 비소, 납, 구리 제련소 공장 부근에 사는 임산부는 공장밖 50km 이상에서 사는 임산부보다 유산 빈도가 매우 높은 것으로 알려지고 있다<sup>9), 26)</sup>.

비소의 인간에 대한 발암연구는 제련소 근로자들을 대상으로 많이 이루어졌는데 폐암으로 인한 사망률과의 상관성 연구<sup>22)~24)</sup> 그리고 농약 관련 제조업 종사자들과 근처 주민들의 폐암으로 인한 사망률 증가<sup>28)~30)</sup> 등 충분한 역학연구결과들이 알려지고 있다. 이 밖에도 무기 비소로 오염된 음용수에 노출된 일부 태국인들에게서 신장, 피부, 폐, 간장 등의 암 발생률이 높았다고 보고되고 있다<sup>25)</sup>.

### 3.3 지역별 토지용도별 인체노출량

토지용도별 인체노출량을 살펴보면, 농경지역의 경우 모든 광산에서 다른 용도지역에 비해 CDI 값이 월등히 높게 계산되었다. 50th 값을 기준으로 할 때 다락광산의 경우 농경지역, 주거지역, 상업지역, 공장지역의 순서로 CDI값이 높았고 그 비는

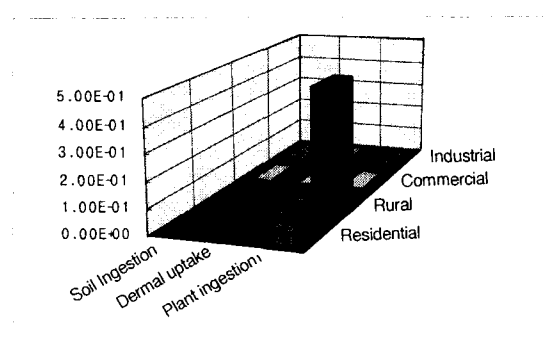


Fig. 3. Comparison of chronic daily intake by exposure route and future land use in Daduk abandoned mine.

대체로  $1 : 10^1 : 10^4 : 10^5$  이고 다른 광산지역도 모두 비슷한 양상을 보였다(Table 6). 이와 같은 이유는 농경지역과 주거지역의 경우 식품섭취를 통한 노출이 고려되었기 때문이며 실제로 농경지역과 주거지역의 경우 전체 인체노출량에서 식품을 통한 섭취의 비율이 개략적으로 전체의 98%정도여서 그 기여도가 크기 때문이다. 이밖에도 CDI계산시 적용한 노출빈도와 노출기간은 U.S.EPA(1989b)에서 제시하고 있는 값들을 써서, 주거지역의 경우 1년중 다른 지역으로의 여행일을 고려한 350일과 노출기간 30년, 상업지역이나 공장지역의 경우 1년의 작업일수를 고려한 250일과 노출기간 25년을 고려했기 때문에 상대적으로 CDI값이 주거지역에 비해 낮게 계산되었다.

Fig. 3에 따르면 다덕광산의 경우 인체노출경로별 노출기여비율은 식품을 통한 노출, 토양섭취, 토양피부흡수 순으로  $1 : 10^3 : 10^7$  순이었다.

각 광산에서 CDI 95th 값의 의미는 비록 그 값은 크지만 실제 출현빈도는 매우 낮은 경우에 해당하는 upper bound level로서 대체로 관리적 차원에서 worst시나리오를 감안하여 이 값들을 근거 data로 활용하기도 한다. 따라서 실제 토양비소오

**Table 6. Percentile Value of Chronic Daily Intake produced by using Monte-Carlo Simulation**

Land use	Name of abandoned mine	Chronic daily intake (mg/kg/day)					
		5th	25th	50th	75th	95th	Mean
Residential area	Darak	1.87x10 <sup>-6</sup>	1.09x10 <sup>-5</sup>	2.58x10 <sup>-5</sup>	5.10x10 <sup>-5</sup>	1.13x10 <sup>-4</sup>	3.75x10 <sup>-5</sup>
	Daduk	4.65x10 <sup>-3</sup>	2.57x10 <sup>-2</sup>	6.24x10 <sup>-2</sup>	1.24x10 <sup>-1</sup>	2.66x10 <sup>-1</sup>	8.92x10 <sup>-2</sup>
	Jingok	1.14x10 <sup>-2</sup>	3.77x10 <sup>-2</sup>	6.39x10 <sup>-2</sup>	9.87x10 <sup>-2</sup>	1.69x10 <sup>-1</sup>	7.37x10 <sup>-2</sup>
	Dalsung	1.25x10 <sup>-3</sup>	2.84x10 <sup>-3</sup>	3.81x10 <sup>-3</sup>	4.66x10 <sup>-3</sup>	5.76x10 <sup>-3</sup>	3.70x10 <sup>-3</sup>
	Ilkwang	9.06x10 <sup>-6</sup>	2.43x10 <sup>-5</sup>	4.24x10 <sup>-5</sup>	6.82x10 <sup>-5</sup>	1.31x10 <sup>-4</sup>	5.23x10 <sup>-5</sup>
Rural area	Darak	1.12x10 <sup>-5</sup>	6.51x10 <sup>-5</sup>	1.55x10 <sup>-4</sup>	3.06x10 <sup>-4</sup>	6.78x10 <sup>-4</sup>	2.25x10 <sup>-4</sup>
	Daduk	2.79x10 <sup>-2</sup>	1.54x10 <sup>-1</sup>	3.74x10 <sup>-1</sup>	7.43x10 <sup>-1</sup>	1.60	5.39x10 <sup>-1</sup>
	Jingok	6.84x10 <sup>-2</sup>	2.26x10 <sup>-1</sup>	3.83x10 <sup>-1</sup>	5.92x10 <sup>-1</sup>	1.02	4.42x10 <sup>-1</sup>
	Dalsung	7.47x10 <sup>-3</sup>	1.71x10 <sup>-2</sup>	2.28x10 <sup>-2</sup>	2.79x10 <sup>-2</sup>	3.45x10 <sup>-2</sup>	2.22x10 <sup>-2</sup>
	Ilkwang	2.13x10 <sup>-2</sup>	6.93x10 <sup>-2</sup>	1.09x10 <sup>-1</sup>	1.43x10 <sup>-1</sup>	1.86x10 <sup>-1</sup>	1.07x10 <sup>-1</sup>
Commercial area	Darak	2.29x10 <sup>-10</sup>	2.01x10 <sup>-9</sup>	6.20x10 <sup>-9</sup>	1.57x10 <sup>-8</sup>	4.61x10 <sup>-8</sup>	1.25x10 <sup>-8</sup>
	Daduk	5.79x10 <sup>-7</sup>	4.71x10 <sup>-6</sup>	1.48x10 <sup>-5</sup>	3.78x10 <sup>-5</sup>	1.07x10 <sup>-4</sup>	2.96x10 <sup>-5</sup>
	Jingok	9.74x10 <sup>-7</sup>	6.67x10 <sup>-6</sup>	1.66x10 <sup>-5</sup>	3.37x10 <sup>-5</sup>	7.59x10 <sup>-5</sup>	2.47x10 <sup>-5</sup>
	Dalsung	8.09x10 <sup>-8</sup>	4.59x10 <sup>-7</sup>	1.00x10 <sup>-6</sup>	1.76x10 <sup>-6</sup>	3.14x10 <sup>-6</sup>	1.23x10 <sup>-6</sup>
	Ilkwang	2.87x10 <sup>-7</sup>	1.93x10 <sup>-6</sup>	4.47x10 <sup>-6</sup>	8.51x10 <sup>-6</sup>	1.64x10 <sup>-5</sup>	5.91x10 <sup>-6</sup>
Industrial area	Darak	1.14x10 <sup>-10</sup>	1.01x10 <sup>-9</sup>	3.10x10 <sup>-9</sup>	7.86x10 <sup>-9</sup>	2.31x10 <sup>-8</sup>	6.23x10 <sup>-9</sup>
	Daduk	2.89x10 <sup>-7</sup>	2.35x10 <sup>-6</sup>	7.39x10 <sup>-6</sup>	1.89x10 <sup>-5</sup>	5.36x10 <sup>-5</sup>	1.48x10 <sup>-5</sup>
	Jingok	4.87x10 <sup>-7</sup>	3.33x10 <sup>-6</sup>	8.31x10 <sup>-6</sup>	1.68x10 <sup>-5</sup>	3.80x10 <sup>-5</sup>	1.23x10 <sup>-5</sup>
	Dalsung	4.04x10 <sup>-8</sup>	2.30x10 <sup>-7</sup>	5.02x10 <sup>-7</sup>	8.82x10 <sup>-7</sup>	1.57x10 <sup>-6</sup>	6.13x10 <sup>-7</sup>
	Ilkwang	1.43x10 <sup>-7</sup>	9.67x10 <sup>-7</sup>	2.23x10 <sup>-6</sup>	4.26x10 <sup>-6</sup>	8.18x10 <sup>-6</sup>	2.96x10 <sup>-6</sup>

염도가 높았던 다덕광산이나 진곡광산의 경우 CDI 95th 값이 각각 1.60, 1.02 mg/kg/day로 매우 높게 계산되었다. 실제 이런 상황이 발생할 확률은 매우 낮다고 할 수 있다.

본 연구에서 CDI계산에 사용한 값들은 California EPA(1997)에서 California 지역에 거주하는 일반인들을 대상으로 구한 변수들이어서 U.S.EPA(1989b)에서 상업지역과 공장지역에서 일일 토양섭취율에 해당하는 50mg/day와 비교하면 California EPA에서 제시하는 값은 9.8mg/day이므로 매우 차이가 있지만, 본 연구에서는

모든 지역에 동일한 변수를 적용하여 노출비율을 달리 부여하므로 노출시나리오에서 차별을 두었고, 또한 California EPA 변수들의 경우 분포값을 활용할 수 있어서 출현 가능한 모든 경우를 확률값으로 표현할 수 있었다.

### 3.4 독성값의 활용

앞에서 설명한 바와 같이 비소의 발암등급은 U.S. EPA의 분류로 group A에 해당하는 인체발암물질로서 역학자료에 의한 발암증거가 다수 알려

**Table 7. Toxicity Value Based on Human Carcinogenic Epidemiology Data of Arsenic**

Tumor site	Exposure route	Toxicity value	Quantitative evidence	References
Skin cancer	Drinking water	· Oral slop factor : $1.5(\text{mg/kg/day})^{-1}$	Time and dose-related formulation of the multistage model	Tseng et al., 1968 ; Tseng, 1977
Lung Cancer	Occupational inhalation	· Unit risk : $4.3 \times 10^{-3}(\text{ug/m}^3)^{-1}$	Geometric mean of unit risks (Anaconda smelter <sup>a</sup> and ASARCO smelter <sup>b</sup> )	Brown and Chu, 1983 <sup>a</sup> Lee-Feldstein, 1983 <sup>a</sup> Higgins et al., 1982 <sup>a</sup> Welch et al., 1982 <sup>a</sup> and Enterline and Marsh, 1982 <sup>b</sup>

지고 있다. 대다수의 독성물질 경우 인체 자료의 수가 매우 부족하여 동물자료를 통해 중간 외삽과 용량-스케일링 등을 거쳐 발암력에 해당하는 독성값을 유도하게 되는데 인체자료가 충분할 경우는 동물자료이용에 대한 여러 가지 불확실성을 최소화하기 위하여 인체자료를 사용한다.

Table 7에서처럼 IRIS(1997)에서는 비소의 인체피부암자료를 제시하고 있고, 그 발암력을  $1.5(\text{mg/kg/day})^{-1}$ 로 제시하고 있어 초과 발암위해도 계산시 이 값을 활용하였다. 일반적으로 동물자료를 사용할 때 발암등급 A에 해당하는 물질은 one-hit model을 이용하여 독성값을 유도하는데<sup>1)</sup> 이 경우는 case-control study 결과를 써서 multistage model에 의한 독성값을 유도하였다.

### 3.5 토지용도별 초과발암위해도 및 복원목표설정

계산된 초과발암위해도의 확률값은 실제의 출현 가능한 확률을 고려하고 있다. 95th 값의 경우 값은 크지만 출현빈도가 매우 낮은 극단적인 노출을 설명할 경우가 있어서 일반적으로 최대 발생 가능성이 기대되는 50th 값에 해당하는 MLE(Maximum Likelihood Estimate)값을 선택 사용한다<sup>2)</sup>. 지역별 총 초과발암위해도 역시

CDI값 순서인 농경지역, 주거지역, 상업지역, 공장지역의 순으로 나타났다. 50th 값을 기준으로 볼 때  $10^6 \sim 10^5$  수준이상으로 추계된 지역들은 복원작업 없이 해당용도로 활용되었을 경우 상당한 수준의 risk가 기대된다고 판단할 수 있다. 예를 들어, 농경지역으로 활용시 모든 지역의 risk값이 매우 높아 이후의 농경지로의 토지활용이 부적합할 것이 기대된다.

다덕광산의 경우, 주거지역과 농경지역에대한 초과발암위해도는 다른 지역에 비해 매우 높고, 극단적인 값을 나타내어 현재의 계산된 수치에 근거하여 설명이 부적합할 정도로 지역에 대한 용도 활용이 적절치 못함을 파악할 수 있다.

현오염상태에 근거한 위해도치 95th 값을 기초로 복원작업전 토지이용가능성을 판단하여 보면(비소의 발암등급 A에 근거하여 관리목표치를  $10^6$  수준으로 설정<sup>3)</sup>할 경우) 주거지역, 농경지역으로의 토지활용이 5곳 광산 모두 기대할 수 없는 수준이었고, 상업지역으로의 토지활용은  $6 \times 10^8$ 수준이어서  $10^6$ 수준에 비해 훨씬 낮으므로 복원작업 없이 쓰여질 수 있으며, 공업지역으로의 토지활용 역시 다덕광산이  $3 \times 10^8$ 수준이어서 복원작업 없이도 쓰여질 수 있을 것으로 기대되어진다.

**Table 8. Percentile Value of Excess Cancer Risk based on Skin Cancer produced by using Monte-Carlo Simulation**

Land use	Name of abandoned mine	Excess Cancer Risk(percentile value)					
		5th	25th	50th	75th	95th	Mean
Residential area	Darak	2.81x10 <sup>-6</sup>	1.63x10 <sup>-5</sup>	3.88x10 <sup>-5</sup>	7.66x10 <sup>-5</sup>	1.70x10 <sup>-4</sup>	5.62x10 <sup>-5</sup>
	Daduk	6.98x10 <sup>-3</sup>	3.86x10 <sup>-2</sup>	9.36x10 <sup>-2</sup>	1.86x10 <sup>-1</sup>	3.99x10 <sup>-1</sup>	1.34x10 <sup>-1</sup>
	Jingok	1.71x10 <sup>-2</sup>	5.65x10 <sup>-2</sup>	9.58x10 <sup>-2</sup>	1.48x10 <sup>-1</sup>	2.54x10 <sup>-1</sup>	1.11x10 <sup>-1</sup>
	Dalsung	1.87x10 <sup>-3</sup>	4.27x10 <sup>-3</sup>	5.71x10 <sup>-3</sup>	6.99x10 <sup>-3</sup>	8.64x10 <sup>-3</sup>	5.55x10 <sup>-3</sup>
	Ilkwang	1.36x10 <sup>-5</sup>	3.65x10 <sup>-5</sup>	6.36x10 <sup>-5</sup>	1.02x10 <sup>-4</sup>	1.97x10 <sup>-4</sup>	7.85x10 <sup>-5</sup>
Rural area	Darak	1.68x10 <sup>-5</sup>	9.76x10 <sup>-5</sup>	2.32x10 <sup>-4</sup>	4.59x10 <sup>-4</sup>	1.02x10 <sup>-3</sup>	3.37x10 <sup>-4</sup>
	Daduk	4.19x10 <sup>-2</sup>	2.31x10 <sup>-1</sup>	5.61x10 <sup>-1</sup>	—	—	8.02x10 <sup>-1</sup>
	Jingok	1.03x10 <sup>-1</sup>	3.39x10 <sup>-1</sup>	5.74x10 <sup>-1</sup>	8.88x10 <sup>-1</sup>	—	6.63x10 <sup>-1</sup>
	Dalsung	1.12x10 <sup>-2</sup>	2.56x10 <sup>-2</sup>	3.43x10 <sup>-2</sup>	4.19x10 <sup>-2</sup>	5.18x10 <sup>-2</sup>	3.33x10 <sup>-2</sup>
	Ilkwang	3.20x10 <sup>-2</sup>	1.52x10 <sup>-1</sup>	2.15x10 <sup>-1</sup>	2.15x10 <sup>-1</sup>	2.79x10 <sup>-1</sup>	1.60x10 <sup>-1</sup>
Commercial area	Darak	3.43x10 <sup>-10</sup>	3.02x10 <sup>-9</sup>	9.31x10 <sup>-9</sup>	2.36x10 <sup>-8</sup>	6.92x10 <sup>-8</sup>	1.87x10 <sup>-9</sup>
	Daduk	3.68x10 <sup>-7</sup>	7.06x10 <sup>-6</sup>	2.22x10 <sup>-5</sup>	5.67x10 <sup>-5</sup>	1.61x10 <sup>-4</sup>	4.44x10 <sup>-5</sup>
	Jingok	1.46x10 <sup>-6</sup>	1.00x10 <sup>-5</sup>	2.49x10 <sup>-5</sup>	5.05x10 <sup>-5</sup>	1.14x10 <sup>-4</sup>	3.70x10 <sup>-5</sup>
	Dalsung	1.21x10 <sup>-7</sup>	6.89x10 <sup>-7</sup>	1.51x10 <sup>-6</sup>	2.65x10 <sup>-6</sup>	4.71x10 <sup>-6</sup>	1.84x10 <sup>-6</sup>
	Ilkwang	4.30x10 <sup>-7</sup>	2.90x10 <sup>-6</sup>	6.70x10 <sup>-6</sup>	1.28x10 <sup>-5</sup>	2.45x10 <sup>-5</sup>	8.87x10 <sup>-6</sup>
Industrial area	Darak	1.72x10 <sup>-10</sup>	1.51x10 <sup>-7</sup>	4.65x10 <sup>-9</sup>	1.18x10 <sup>-8</sup>	3.46x10 <sup>-8</sup>	9.35x10 <sup>-9</sup>
	Daduk	4.34x10 <sup>-7</sup>	3.53x10 <sup>-6</sup>	1.11x10 <sup>-5</sup>	2.84x10 <sup>-5</sup>	8.04x10 <sup>-5</sup>	2.22x10 <sup>-5</sup>
	Jingok	7.31x10 <sup>-7</sup>	5.00x10 <sup>-6</sup>	1.25x10 <sup>-5</sup>	2.53x10 <sup>-5</sup>	5.69x10 <sup>-5</sup>	1.85x10 <sup>-5</sup>
	Dalsung	6.07x10 <sup>-8</sup>	3.45x10 <sup>-7</sup>	7.53x10 <sup>-7</sup>	1.32x10 <sup>-6</sup>	2.36x10 <sup>-6</sup>	9.20x10 <sup>-7</sup>
	Ilkwang	2.15x10 <sup>-7</sup>	1.45x10 <sup>-6</sup>	3.35x10 <sup>-6</sup>	6.38x10 <sup>-6</sup>	1.23x10 <sup>-5</sup>	4.44x10 <sup>-6</sup>

- : inadequate value

이상과 같은 자료에 근거하여 비소에 대한 허용 위험도 수준을 10<sup>-6</sup>으로 기준을 삼았을 때, 토지용도별 제한 비소 평균농도를 역추적함으로써 복원목표치를 구하였고, 그 결과들을 외국의 관리 기준과 비교하였다(Table 9).

토양비소에 대한 허용 위험도 수준을 10<sup>-6</sup>수준으로 하고 토양의 비소오염도 수준을 역추적하므로 구한 복원목표치는 주거지역, 농경지역, 상업지역, 공장지역의 경우 각각 0.2mg/kg, 0.003mg/kg,

97.31mg/kg, 194.62mg/kg 수준으로 추계되었다.

미국의 경우 각주마다 다른 기준을 적용하고 있는데, 대체로 거주지역, 공장지역으로 크게 구분된 기준을 확보하고 있고, 그 기준도 큰 차이를 나타낸다. 각 나라마다 적용한 변수와 노출시나리오가 상이하여 결과의 차이를 보이고 있으나, 각 나라별 기준 설정과정의 검토를 통해서, 우리 기준 설정에 방법론을 활용할 수 있을 것이다.

**Table 9. Comparison of Computational Remedial Goal with Foreign Management Limits**  
(mg/kg)

Management limit(soil)		Residential	Rural area	Commercial area	Industrial area
Computational Remedial Goal	Based on $10^{-6}$ (excess cancer risk)	0.02*	0.003*	97.31*	194.62*
National <sup>32)</sup> Guidance	Criteria	—	6	—	20
	Guideline	—	15	—	50
U.S.A. <sup>31)</sup>	Texas	0.366	—	—	3.27
	Tennessee	20	—	—	200
	Oregon	0.4	—	—	3
Canada <sup>31)</sup>		30	20	—	50
Netherland <sup>31)</sup>		20-30	—	—	—

\* Computational remedial goal calculated in this study

현재의 우리나라 기준<sup>32)</sup>과 본 연구에서 제안한 값들을 비교하여 볼 때 우리 나라 현재의 우려기준은 대책기준의 40%정도로 더 이상 오염이 심화되는 것을 예방하기 위한 수준을 의미하고 있고, 대책기준은 오염의 정도가 사람의 건강과 동·식물의 생육에 지장을 초래할 우려가 있어 토지의 이용금지, 시설의 설치금지 등 규제조치가 필요한 정도의 오염상태를 관리하기 위한 것이어서 기준설정시 행정적인 영향의 고려가 필요함을 알 수 있으며, 그 값들이 위해도에 근거한 값들과 큰 차이를 보여 위해도를 고려한 재검토가 필요할 것으로 여겨진다.

이러한 값들에 근거하여 복원목표 설정에 응용하여 보면 일광광산을 공장지역으로 활용할 경우, 평균 비소오염도 수준 352mg/kg을 194mg/kg이하 수준으로 낮추어야 한다고 판단할 수 있다. 이와 같은 복원목표치 설정은 노출변수와 노출평가시 설정된 오염된 토양에 대한 노출확률(fraction of contaminated source)값에 크게 좌우될 것으로 판단되며, 비소의 공장지역 복원목표치 194mg/kg 수준은 미국 Tennessee 주의 관리기준 200mg/kg과 유사함을 확인할 수 있다. 이상과 같은 방법론 활용은 노출시나리오의 구체화로 실질적

인 토양복원작업에 적극 쓰여질 것으로 기대된다.

#### 4. 결 론

영남지역의 폐광산 5곳을 대상으로 광산입구와 주변지역의 토양중 비소오염도를 조사하였고, 비소오염도에 근거한 토지용도별 위해도치를 계산하였으며, 광산별 위해도치를 비교하였고, 복원목표설정시 위해성 평가방법론을 활용하므로 미래 토지이용도를 고려한 복원목표를 설정하였다.

1. 광산별 비소오염도 수준은 다덕광산이 가장 높아, 평균값이 1950mg/kg 이었으며, 진곡광산도 1690mg/kg 수준으로 높았고, 오염도 순위는 다덕광산, 진곡광산, 일광광산, 달성광산, 다락광산 순이었다.
2. 비소오염도에 근거한 토지용도별 위해도치 계산을 위하여 미래의 토지용도를 주거지역, 농경지역, 상업지역, 공장지역으로 구분하고 각각의 노출시나리오(토양섭취, 피부흡수, 식품을 통한 노출)를 설정하였으며, 지역별 만성일일노출량 수준을 구하였다. 비소의 피부암 초과 발암위해도치 계산은 만성일일노출량에 발암력

1.5(mg/kg/day)<sup>-1</sup>(IRIS, 1997)을 환산해 주므로 구하였다. 계산된 초과 발암위해도(피부암에 근거한) 95th 값 수준은 주거지역, 농경지역에 대해 모든 광산이 10<sup>4</sup>이상 수준의 위해도치를 나타내었고, 상업지역에 대해서는 다락광산이 6 × 10<sup>8</sup>수준으로 가장 낮았으며, 공장지역에 대해서도 다락광산이 3 × 10<sup>8</sup> 수준으로 가장 낮았다.

3. 비소의 복원목표 설정을 위해 초과 발암위해도 수준 10<sup>6</sup>을 허용수준으로 하였을 경우 현 상태에서 복원작업 없이도 토지활용이 가능한 광산으로 10<sup>8</sup>수준의 위해도치를 나타낸 다락광산의 경우 상업지역, 공장지역으로의 활용이 가능할 것으로 판단되었다. 또한 허용위해도 수준을 10<sup>6</sup> 수준으로 하고 토양의 비소오염도 수준을 역추적하므로 구한 복원목표치는 주거지역, 농경지역, 상업지역, 공장지역의 경우 각각 0.02 mg/kg, 0.003mg/kg, 97.31mg/kg, 194.62mg/kg 수준으로 추계되었다. 즉, 일광광산의 경우 공장지역으로 활용코자 한다면 지역의 비소오염도 수준을 194.62mg/kg 이하 수준(복원목표수준)으로 낮춰야 한다.

이상과 같은 방법론 활용은 노출시나리오의 구체화로 추후 실질적인 토양복원작업에 적극 쓰여질 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

- 1) U.S.EPA, "Risk Assessment Guidance for Superfund. Volume I Human Health Evaluation Manual(Part A, baseline risk assessment)", *Office of Emergency and Remedial Response*. EPA/540/1-89/002. (1989a)
- 2) U.S.EPA, "Risk Assessment Guidance for Superfund. Volume I Human Health Evaluation Manual(Part B, development of risk-based preliminary remedial goals)", *Office of Emergency and Remedial Response*. EPA/540/1-89/002 (1989b)
- 3) U.S.EPA, "Risk Assessment Guidance for Superfund. Volume I Human Health Evaluation Manual(Part C : remedial alternative risk evaluation)", *Office of Emergency and Remedial Response*. EPA/540/1-89/002. (1989c)
- 4) ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. "Toxicological Profile for Arsenic", U.S. Department of Health and Human Services. *Agency for Substances and Disaese Registry* (1991)
- 5) Vahter, M., "Metabolism of arsenic. In : Biological and Environmental Effets of Aesenic", *Flowler BA(ed.), Elsevier Science Publisher B.V., Amsterdam, Netherland* 6, pp171-198, (1983)
- 6) Holland RH, McCall MS, Lanz HC. "A Study of Inhaled As in Man", *Cancer Res.* 19, pp1154-1156 (1959)
- 7) Wester RC, Maibach HI, Sedik L, Melendres J, Wade M. "In Vivo and In Vitro Percutaneous Absorption and Skin Decontamination of Arsenic from Water and Soil", *Fundam. Appl. Toxicol.* 20, pp336-340 (1993)
- 8) U.S.EPA "AQUIRE database", ERL-Duluth, ; *FWS Biological Rpt* 85(1.12) ; EPA rpt #EPA-450-85-002 (1986)
- 9) Nordstrom, S., Bexkman, L., Nordenson, I., "Occupational and Environmental Risks in and in the Around a Smelter in Northern Sweden √. Spontaneous Abortion among Female Employees and Decreased Birth Weight in Their Offspring", *Hereditas* 90, pp291-296 (1979)
- 10) Yamasita N, Doi M, Nishio M, Hojo H, and Tanaka M. "Cerrent State of Kyoto Children by

- Arsenic Tainted Morinaga Dry Milk", *Jpn. J. Hyg.* 27, pp364-399 (1972)
- 11) Bencko V and Symon K. "Health Aspects of Burning Coal with a High Arsenic Content", *Environ. Res.* 13, pp378-385 (1977)
  - 12) Matanoski G, landau E, Tonascia J et al. "Cancer Mortality in Industrial Area of Baltimore" *Environ. Res.* 25, pp8-28 (1981)
  - 13) Tseng, W.P. Chu, H.M., How, S.W., Fong, J.M., Lin, C.S. and Yen, S., "Prevalance of Skin Cancer in an Endemic Area of Chronic Arsenicism in Tai", *J. Natl. Cancer Inst.*, 40(3), pp453-463 (1968)
  - 14) Cebrían ME, Albores A, Aquilar M, and Blakely E. "Chronic Asenic Poisoning in the North of Mexico", *Human Toxicol.* 2, pp121-133 (1983)
  - 15) IRIS : Integrated Risk Information System, US Environmental Protection Agency, Arsenic, Inorganic. *TOMES PLUS DATABASE*, (1997)
  - 16) MSDS : Material Safety Data Sheets, *Canadian Centre for Occupational Health and Safety*, (1997)
  - 17) Cheminfo : Occupational Health and Safety Information on Chemicals. *Canadian Centre for Occupational Health and Safety*, (1997)
  - 18) HSDB : Hazardous Substance Data Bank National Library of Medicine, National Toxicology Information Program, Bethesda, MD. *TOMES PLUS DATABASE*. (1997)
  - 19) Crystal Ball®. Version 4.0, *Decisioneering, Inc.*, pp144-152 (1996)
  - 20) CalTOX : A Multimedia Total Exposure Model for Hazardous-waste Sites. Health-based screening levels for surface soil contamination. California Environmental Protection Agency, Sacramento, California, U.S.A. (1997)
  - 21) Brown CC and Chu KC "Approaches to Epidemiologic Analysis of Prospective and Retrospective Studies : Example of lung cancer and exposure arsenic" In : Risk Assessment Proc. *SIMS Sonf. on Environ. Epidemiol. 1982, Alta,VT.* SIAM Publication. (1983)
  - 22) Lee-Feldstein. "Arsenic and Respiratory Cancer in Man : Follow - an occupational study", In : *Arsenic : Industrial, Biomedical, and Environmental Perspectives*, W. Leder and R. Fensterheim, Ed. Van Nostr Reinhold, New York. (1983)
  - 23) Higgins I, Welch K, and Burchfield C. "Mortality of Anaconda Smelting Workers in Relation to Arsenic and Other Exposures" *University of Michigan Dept. Epidermiology, Ann Arbor, MI.* (1982)
  - 24) Enterline PE and Marsh GM. Cancer among workwes exposed to arsenic ans other substances in a copper smelter. *Am. J. Epidemiol.* 116, pp895-911 (1982)
  - 25) Chen, C-J., Chen, CW. Wu, M-M. and Kuo, T-L. "Cancer Potential in Lung, Bladder and Kidney due to Ingested Inorganic Arsenic in Drinking Water" *Br. J. Cancer* 66(5), pp888-892 (1992)
  - 26) Ohira M and Aoyama H, "Epidemiology Studies on the Morinaga Powdered Milk Poisoning Incident", *Jpn. J. Hyg.*, 27, pp500-531 (1972)
  - 27) Tseng, W.P. "Effects and Dose-Response Relationships of Skin Cancer, Black Foot Disease with Arsenic", *Environ. Health. Perspect.* 19, pp109-119 (1977)
  - 28) Mabuchi K, Lilienfeld A and Snell L. "Lung Cancer among Pesticide Workers Exposed to Inorganic Arsenicals", *Arch. Environ. Health.* 34, p312 (1979)
  - 29) Axelson O, Dahlgren E, Jansson CD, and



- Rehnlund SO. "Arsenic Exposure and Mortality : A Case Referent Study from a Swedish Copper Smelter" *Br. J. Ind. Med.* 35, pp8-15 (1978)
- 30) Ott MG, Holder B, and Gordon HL. "Respiratory Cancer and Occupational Exposure to Arsenicals", *Arch. Environ. Health* 29, pp250-255 (1974)
- 31) Marsall Sitting, "World-Wide Limits for Toxic and Hazardous Chemicals in Air, Water and Soil", Noyes publications, pp58~59 (1994)
- 32) 환경부. "토양환경보전업무 편람", p13 (1996)