



# 토양오염방지 및 관리

## 4차시

# 1. 위해성평가 개념 및 적용 범위

## 1.1. 위해성평가의 개념

- 부지의 위해성 평가(Risk Assessment)는 어떤 독성물질이나 위험상황에 노출되어 나타날 수 있는 개인 또는 집단의 위해 확률을 추정하는 과학적인 과정으로 “부지의 토양이 깨끗한가?”를, 즉 부지의 오염여부를 결정할 수 있는 합리적인 수단임
- 위해성 평가는 그 대상에 따라 건강위해성 평가(Human Health Risk Assessment), 생태위해성평가 (Eco Risk Assessment)등으로 구분
  - ※ 건강위해성 평가란 인구 집단이 환경적 위험(Environmental Hazard)에 노출되었을 경우에 나타날 수 있는 악영향(건강장애)을 평가(예측)하는 것이며, 생태위해성평가란 생태계(예를 들면, 서식하는 특정동식물 등)에 나타나는 악영향을 평가하는 것임
- 위해성 평가 결과는 유해물질의 한정된 조건에서 허용 위해(Acceptable risk)의 수준을 정하여 허용농도, 기준치 등과 같은 관리 수준, 오염된 지역의 환경복구를 위한 처리기술의 목표 설정 등을 결정하는 등 정책결정(decision-making)의 수단으로 활용할 수 있음
- 이 수단은 대상부지의 지역적인 특성, 부지의 이용, 수용체에 대한 오염물질의 위해성과 노출경로 등을 종합적으로 고려함으로써, 토양질 기준의 사용에 따른 단점을 보완할 수 있으며, 오염된 지역의 정화목표를 제공할 수 있음

## 1.2. 위해성평가의 적용

- 미국을 포함한 선진국들에서는 오염된 환경매질의 정화, 복구 사업을 수행하는데 있어 정화의 최종목표농도를 화학적 추출법에 의해 결정되는 잔류물질의 농도와 기존의 독성학적 자료에만 의존하여 설정하는 것은 비합리적, 비경제적이라는

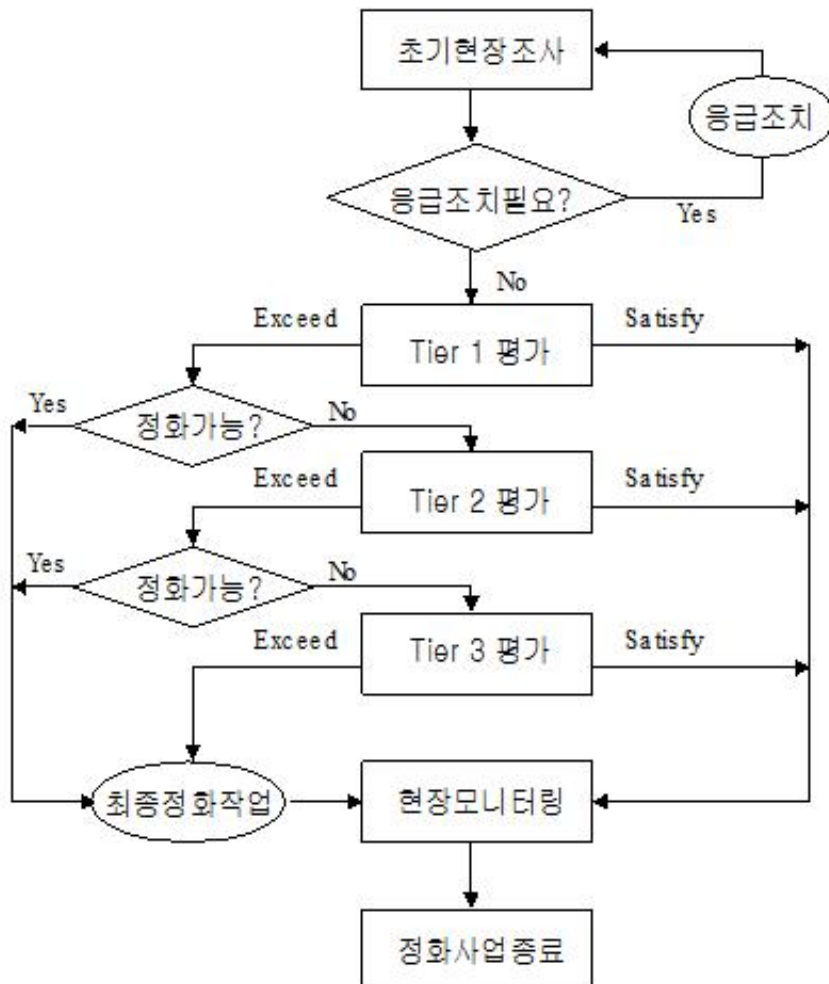
인식이 점차 높아져가고 있으며, 이러한 배경을 바탕으로 토양오염의 위해성 평가 개념과 방법이 발전

- 오염토양의 위해성을 평가하는 일반적인 방법은 US EPA (US Environmental Protection Agency), US AFCEE (US Air Force Center for Excellent Environment), ASTM (American Society for Testing Materials) 등을 이용
- 토양오염지역의 위해성 평가는 오염지역의 위해성이나 또는 오염원을 효율적으로 관리하기 위한 의사결정과정 (decision-making process) 중의 일부로 위해성에 근거한 오염지역의 복원(RBCA, Risk-Based Corrective Action)에 이르는 과정임
  - RBCA는 특별한 오염물질, 특수한 오염지역에 국한되는 것이 아니라 일반적인 방법론이며 RBCA를 수행하는 과정에 필요한 오염물질의 독성학적, 물리, 화학적 자료와 오염현장의 수리, 지질학적 자료들을 적절히 변화시킴으로써 효율적인 위해성의 관리 (risk management) 또는 오염지역의 정화, 복구라는 목적을 달성할 수 있음
- 위해성에 근거한 오염토양의 복원은 토양에 존재하는 독성물질이 인간이나 생태계와 같은 수용체 (receptor)로 전이되어 발현되는 독성을 감소시키는 것을 목적으로 함
  - 오염지역의 위해성평가 과정에서는 토양에 오염된 물질의 절대농도뿐만 아니라 토지이용용도 (예; 주거지, 산업/상업용지 등), 노출경로 (exposure pathway)와 기간, 수용체의 특성 (예; 나이, 체중, 흡입량, 피부면적 등), 그리고 오염이 발생한 토양과 지하수 층의 물리, 화학적 특성 등을 고려해서 산정한 오염토양의 위해성이 중요한 요소가 됨
  - 예를 들어, 토지이용용도를 고려할 때 오염물질의 인간으로의 전이는 주거지는 24시간 노출을, 산업/상업용지는 8시간 노출을 가정하여 위해성을 산출
  - 이러한 요소들을 고려하여, US EPA, US AFCEE, ASTM 등에서는 아주 보수적인 (conservative) 노출경로와 독성학적 자료를 바탕으로 한 일반적인 허용기준치

(risk-based screening level)를 마련. 이 수준은 가장 나쁜 경우 (worst-case-scenario)를 예상하더라도, 현재 알려진 지식과 정보에 근거하여 판단해 볼 때, 인간에게 거의 해를 미치지 않는 오염농도를 의미함

- 토양오염이 예상되는 지역의 위해성평가와 현장조사(site assessment)에는 기본적으로 어느 정도의 불확실성 (uncertainty)이 존재함
  - RBCA에서는 이러한 불확실성 문제를 자료의 보수성 (conservatism)과 단계적 접근법 (tiered approach)으로 해결
  - 즉, 낮은 단계의 평가 (예; Tier 1)에는 일반적 (generic), 보수적인 (conservative) 자료를 이용함으로써 위해성평가 결과의 불확실성에 대한 실질적 위험을 줄여나가고 높은 단계 (예; Tier 2)의 평가에서는 현장에 특이적인 조건 및 자료들을 직접 수집하여 이용함으로써 불확실성 자체를 감소시켜 나가고 있음
- RBCA의 수행에 필요한 사항들과 중요 결정과정들을 <그림 2>에 제시

〈그림 2〉 기본적인 RBCA 진행과정의 흐름도 (Atlantic PIRI, 1999)



1. 초기현장조사를 실시하여 필요한 자료들을 수집한다. 만약, 오염이 심하여 즉각적인 정화조치가 필요하면 응급조치를 한다.
2. Tier 1: 보수적 기본값들을 사용하여 일차적인 위해성평가를 실시한다. 그 결과를 현장의 오염농도와 비교하고 오염수준이 허용할 만한 것인지 만약 정화가 필요하다면 합리적인 수준의 정화가 가능한지를 판단한다.
3. Tier 2: 현장의 특수성을 반영한 자료들을 수집하여 현장특이적 위해성수준을 산정하여 위 과정을 반복한다.
4. Tier 3: 생태계에 대한 위해성평가를 포함하여 보다 더 현장특이적인 위해성평가를 실시한다. 이 과정은 일반적이지 않으며 본 연구에서도 제외하였다.
5. 위해성평가의 결과에 따라 최종정화목표수준과 정화방법을 결정하여 복구사업을 실시한다. 필요에 따라서는 지속적인 현장모니터링을 실시하며 정화사업을 종결한다.

## 2. 위해성평가 과정

○ 위해성 평가는 4단계로서 이루어짐 <표 1>

<표 1> 위해성 평가 단계

단계	특징	내용
1단계	위해성 확인 (Hazard Identification)	어떤 물질의 독성이 관심사가 될 수준인지를 결정
2단계	노출 평가 (Exposure Assessment)	환경 중에 존재하는 원인물질에 대한 인간 또는 동물 노출의 강도, 빈도 및 기간을 측정 또는 평가하는 과정
3단계	독성 평가(Toxicity Assessment)	어떤 화학물질에 대해 위해성이 확인되었다면 그 물질이 과연 얼마만한 위해도를 나타내는 가를 수량적으로 표현하는 단계로 투여량(용량)과 반응관계(dose-response assessment)를 정의
4단계	위해도 결정 (Risk Characterization)	이상의 자료들을 종합하여 위해 가능성을 정량적으로 결정

○ 국내 ‘토양오염물질 위해성평가 지침(환경부 고시 제 2015-64호)’ 에 따르면, 1) 오염범위 및 노출농도 결정 2) 노출평가 3) 독성평가, 4) 위해도 결정을 거치도록 되어 있음

### 2.1. 위해성의 확인(Hazard Identification)

- 평가의 대상(인간 또는 생태계)이 어떤 환경오염물질에 노출되었을 경우, 유해한 영향을 유발시키는가를 결정하는 단계로써, 각각의 오염물질에 대한 모든 동물 실험자료 및 사람에 대한 자료(역학 연구)를 근거로 평가
  - 환경오염물질은 발암성 물질과 비발암 독성물질로 분류: 발암성 물질과 비발암성 물질에 대한 유해영향을 추정하거나 안전수준을 결정하는 접근 방법이 다르기 때문임

- 유해화학물질의 위해성 여부에 대해 일반적으로 널리 사용하고 있는 미국 EPA(Environmental Protection Agency)의 분류체계에서는 유해화학물질을 5개 그룹으로 분류
  - A군은 인간에 있어서 발암물질로, 이 분류에 속하는 물질은 약품에의 노출과 암발생 사이의 인과관계를 설명할 수 있는 충분한 과학적 증거가 있는 물질들임
  - B군은 인간에 대해 상당한 발암성을 나타내는 물질이며, 이중에서 B1군은 제한적인 역학적 증거가 있는 경우이며, B2군은 인간에 대한 자료는 부족하나 동물실험에 의한 발암가능성을 충분히 보이고 있는 물질
  - C군은 제한된 동물조사실험에서 발암가능성을 보였으나 인간에 대한 자료가 없는 물질
  - D군은 사람에게 있어서 발암물질로 분류할 수 없는 물질로 사람에게 대한 자료와 동물조사 자료가 부족하거나 유용한 자료가 없는 물질
  - E군은 발암을 유발하지 않는 물질

〈표 2〉 수집된 동물 및 사람의 평가에 근거한 유해화학물질의 미국 EPA 분류 체계

인체 발암성에 대한 증거	동물 발암성에 대한 증거				
	충분	제한	불충분	자료없음	증거없음
충분	A	A	A	A	A
제한	B1	B1	B1	B1	B1
불충분	B2	C	D	D	D
자료없음	B2	C	D	D	E
증거없음	B2	C	D	D	E

A : Human Carcinogen (확인된 인체발암물질)

B1, B2 : Probable Human Carcinogen (유력한 인체발암물질)

C : Possible Human Carcinogen (가능한 인체발암물질)

D : Not classifiable as to Human Carcinogen (인체발암물질로 분류할 수 없는 물질)

E : Evidence of non-Carcinogen for Human (인체 비발암성물질)

- 국내 ‘토양오염물질 위해성평가 지침(환경부 고시 제 2015-64호)’ 에서 규정하고 있는 평가대상 오염물질과 위해성확인과 관련한 내용은 다음과 같음.

#### 5. 평가대상 토양오염물질

토양오염 위해성평가 대상 오염물질은 토양환경보전법 시행규칙 제19조의3 제1항의 규정에 따른 다음 각 호의 오염물질에 한한다.

- (1) 유류 : 벤젠, 에틸벤젠, 톨루엔, 크실렌
- (2) 중금속류 : 카드뮴, 구리, 비소, 수은, 납, 6가크롬, 아연, 니켈
- (3) 기타 : 불소
- (4) 그 밖에 환경부장관이 인체와 환경에 위해를 줄 우려가 있다고 인정하여 고시하는 물질

#### 1. 오염범위 및 노출농도 결정

위해성평가 대상 지역의 토양오염범위, 노출농도를 결정하기 위하여 다음의 사항을 조사하여야 한다.

(1) 자료 조사 : 부지내 토양오염물질의 존재를 확인할 수 있는 토지이용도 이력, 과거 토양조사 자료, 오염물질 사용 자료 등을 조사한다.

#### (2) 토양시료채취

① 법 제2조제6호 및 시행규칙 제1조의4에 따른 토양정밀조사에 따라 토양시료를 채취하여 토양오염범위를 산정하여야 한다.

② [별지 제1호 서식]의 “(1) 변동계수 산정”, “(2) 토양시료채취 개수 결정” 을 통하여 토양오염 위해성평가에 사용될 수 있는 시료채취 개수의 타당성을 확인하여야 하며, 토양정밀조사 시료채취 개수가 토양오염 위해성평가에서 요구되는 수량에 미치지 못할 경우에는 해당하는 수량만큼의 토양시료채취지점에 대한 토양조사를 추가로 실시한다.

#### (3) 평가단위 결정

대상부지는 토지의 현재와 미래의 이용계획에 따른 수용체와 그 노출특성에 따라 여러 개의 평가단위로 구별할 수 있다. 평가단위를 구별 했을 때는 토지



이력, 소유 및 이용 현황, 향후 이용 계획, 부지 주변의 활용도, 부지의 크기 등을 포함한 평가단위 구분의 근거를 위해성평가서에 명시하여야 한다. 특히 주변 지역에 비해 농도가 확연히 높은 지역인 핫스팟(hot spot)이 존재할 경우 이 지역은 반드시 개별 평가단위로 선정하여 위해성을 평가하도록 한다.

#### (4) 노출농도 결정

토양노출농도는 토양정밀조사결과로부터 [별지 제1호서식]의 “(3)토양 노출농도 결정” 과정에 의해 상위 95%신뢰구간에 해당하는 토양노출농도를 결정한다. 그 밖의 노출농도는 현장 실측을 우선시하며, 현장 측정이 어려운 타당한 근거가 있다면, [별지 제1호서식]의 노출농도 산정식을 통해 예측한다.

## 2.2. 노출평가 (Exposure Assessment)

- 환경중에 존재하는 원인물질에 대한 인간 또는 동물 노출의 강도, 빈도 및 기간을 측정 또는 평가하는 과정이며 또는 환경 중으로 방출되고 있는 새로운 화학물질들로부터 발생할 수 있는 가설적 노출을 평가하는 단계
- 환경노출평가(Environmental Exposure Assessment)와 인체노출평가(Human Exposure Assessment)로 분류
  - 화학물질의 환경노출평가는 직접적 측정과 물리학적 및 수학적물질의 확산모델(Dispersion Model) 모델링에 의해 예측되며, 주로오염원 주위(50km이내)의 오염물질 농도를 예측
  - 환경노출평가는 화학물질의 이동 및 대사의 주요형태 뿐만 아니라 물질의 잠재적 오염원을 나타내는데 이용



고려해야 함. 총 부유분진 측정시 기상학적 및 지질학적 조건, 교통양상, 흡입성 입자상물질(입자직경이  $20\mu\text{m}$ 이하)의 분율 그리고 실내 및 실외농도를 고려해야 함. 특히 폐흡수계수는 비호기성 입자상 물질의 섭취량에 현저히 영향을 받음

- 피부접촉을 통한 섭취(Dermal Uptake)에서 고려해야 할 척도는 토양 및 분진에 있어 오염물질의 농도, 공기 및 직접 토양접촉으로부터의 분진토양 침착율, 노출된 피부의 면적, 피부흡수계수, 노출기간 등임

※ 일반적으로 증기상 물질의 피부섭취는 흡입에 의해 섭취되는 양의 1% 미만으로 매우 적음. 따라서 피부를 통한 침투경로는 거의 무시할만 한 수준임. 토양 중 화학물질의 생체흡수도(Bioavailability)는 오염 물질의 물리, 화학적 성질, 오염물질이 토양과 접촉 했던 기간, 오염된 토양과 피부의 접촉시간에 의존

- 소화기를 통한 섭취(Uptake due to ingestion)에서는 1일 섭취되는 오염매체(토양, 음식 및 물)의 양, 각 매체에 있어 화학물질의 오염농도, 위장계의 흡수계수 등이 고려되어야 할 척도임

※ 외부물질(Xenobiotics)의 구강섭취시 주요오염원은 오염된 토양으로부터의 직접적 섭취에 기인하고 토양섭취는 2-6살의 어린이에게서 가장 많고 나이에 따라 감소. 또한 화학적 오염물질을 포함하는 매체 (예, 먼지, 고기, 비산재 등)는 생체흡수도(흡수계수)에 영향을 미치고, 토양에 있어 생체흡수도는 다양한 토양중에 따라 0.55-95% 범위에 존재하고, 물에 있어서는 일반적으로 75-100% 범위에 존재.

※ 어떤 가정을 이용하여 인간에 노출된 오염물질량을 평가할 때 과소 또는 과대평가되어질 수 있으며, 실제적으로 흡수된 용량을 평가하는 유용한 접근방법은 인체감시(Human Monitoring)법으로서 뇨, 혈 액, 변, 머리카락 또는 지방조직에서 모체물질 또는 대사물질을 측정함. 따라서 시간과 비용이 많이 소모됨. 30일 이상의 긴 생물학적 반감기를 가진 화학물질에 있어 지방조직 수준으로부터 1일 섭취량을 평가하는 것도 가능하고, 생물학적 반감기가 수개월 이상되는 많은 종의 농약류에 대한 1일 섭취량을 평가하는데 유용함

※ 만성노출을 포함하는 대부분의 위해성 평가에 있어서 노출량(mg/kg·day)은

다음과 같이 나타냄

$$\begin{aligned} \text{일생동안의 1일 평균 노출량} &= \frac{\text{총투여량(mg)}}{\text{체중(kg)} \times \text{수명 (day)}} \\ \text{Average daily lifetime exposure} &= \frac{\text{총투여(total does)(mg)}}{\text{체중(kg)} \times \text{수명 (day)}} \\ \text{총투여(total does)(mg)} &= \text{오염물질의 농도} \times \text{접촉율} \times \text{노출기간} \times \text{흡수분률} \end{aligned}$$

- 오염물질의 농도: 신체와 접촉하고 있는 환경매체(공기, 물, 음식, 토양 등)에서의 오염물질의 농도
- 접촉율(contact rate) : 흡입, 소화 또는 피부접촉을 통해 환경매체와 신체가 접촉하는 비율 (ex. 일일호흡율, 음용수 섭취율)
- 노출기간(exposure duration) : 오염물질과의 접촉기간
- 흡수분율(adsorption fraction) : 신체 내로 유입되는 총 오염물질의 유효분율

○ 국내 ‘토양오염물질 위해성평가 지침(환경부 고시 제 2015-64호)’ 에서 규정하고 있는 노출평가 단계와 관련한 내용은 다음과 같음.

## 2. 노출평가

다양한 노출경로에 의한 토양오염물질의 노출평가를 하고자 할 경우 다음의 사항을 고려하여야 한다.

### (1) 노출경로 결정

오염부지의 현재와 미래 이용도를 검토하여 [별지 제2호서식]에 따라 노출경로를 결정한다. 단, 현장 상황에 따라 필요한 기타 경로를 추가할 수 있다.

### (2) 토지이용도 구분

토지이용도는 주거용지, 농업용지, 상업용지, 공업용지로 구분한다.

### (3) 수용체 구분

인체 수용체는 성인과 어린이(만 1-6세)로 구분한다.

### (4) 노출경로별 인체 노출량 산정

결정된 노출경로로부터 [별지 제3호서식]에 의해 노출경로별 인체 노출량을 산정한다.

### (5) 농작물 내 오염물질농도

[별표 4]에 따라 오염부지에서 채취한 토양 시료를 이용하여 측정한 토

양-식물간 생물축적계수 또는 [별지 제6호서식]의 “(4)토양-식물간 생물축적계수”를 이용할 수 있으며, 그 외의 값을 사용할 때에는 과학적으로 타당한 근거를 제시해야 한다.

(6) 노출인자

노출인자는 [별지 제3호서식] 과 [별지 제6호서식]을 참고하여 해당 토지이용도 및 수용체에 해당하는 기본값을 선택한다. 다만, 위해성평가기관이 이와 다른 노출인자를 사용할 경우, 명확한 근거를 제시하여야 한다.

## 2.3. 독성평가 (Toxicity Assessment)

- 이 평가의 목적은 실험동물 또는 in vitro 계통을 이용하여 인간에 대한 어떤 화학물질의 잠재적 유해 효과를 규정하는데 있고 궁극적으로 인간에게 손상을 주는 물질을 규명하여 손상을 예방하는데 취지를 두고 있음
  - 어떤 화학물질에 대해 위해성이 확인되었다면 그 물질이 과연 얼마만한 위해도를 나타내는 가를 수량적으로 표현하는 단계로 투여량(용량)과 반응관계(dose-response assessment)를 정의함
  - 독성학적 검사는 크게 포유동물, 수생생물 및 조류 독성검사로 분류
  - 화학물질을 인간에 대한 위해성을 나타낼 때에는 발암성과 비발암성으로 표시하는데, 이들의 접근법은 다르며, 이에 대한 독성자료는 IRIS 또는 HEAST에서 얻을 수 있음

### 가. 발암성물질

- 발암성물질에 대한 투여량-반응관계는 투여량에 대해 일생동안 암에 걸릴 확률을 뜻함
  - 발암성물질의 경우 경사도인자(slope factor)를 사용하여 독성정도를 평가하는 데, 이때의 경사도(기울기)는 화학물질의 발암력을 나타내며, 투여량의 역수[(mg/kg-day)<sup>-1</sup>]로 나타냄. 즉 주어진 노출에 대한 발암확률은 투여량에 경사도인자를 곱하여 계산함

- 화학물질에 대한 발암성 여부는 동물실험에 의한 결과치를 사람에게 적용하며, 이러한 결과치를 적용하기 위해 두가지 과정[i, 고용량에서 저용량으로의 외삽과정, ii, 사람에게 있어서 용량에 따른 반응을 추정하기 위하여 동물실험에서 사용된 용량을 사람에게 해당하는 용량(human equivalent dose)으로 전환하는 과정(dose-scaling)이 필요함
  - 외삽과정에서는 일반적으로 동물의 종양연구에서 사용된 최대내성용량(MTD, maximum tolerance dose)을 추정코자 하는 환경 중 낮은 농도로의 외삽이 필요하며, 이것을 근거로 다양한 수학적 모델을 이용함
  - 용량전환과정은 체표면적에 입각하여 노출경로, 노출용량, 단위, 노출빈도, 기간, 기대수명 등을 고려하여 용량을 전환하는 것이 일반적이며, 용량에 따른 반응은 사람이나 동물 모두 동일 용량에 대해서는 동일한 영향을 나타내는 것으로 가정함
- 발암성물질의 용량-반응평가단계에서 얻어지는 결과물은 단위 위해 추정치(unit risk estimate)와 실제적인 안전용량임
  - 단위 위해 추정치란 미국의 환경보호청(EPA)이나 WHO의 경우 평균수명과 체중을 고려하여 70kg의 건강한 성인이 70년 동안 어떤 화학물질이 단위농도(1 $\mu$ g/l 또는 1 $\mu$ g/m<sup>3</sup>)로 오염된 환경매체에 노출되었을 때 이로 인해 발생하는 초고발암확률, 즉 암이 발생할 수 있는 초과위해도를 의미함.
  - ※ 실제로 안전용량(VSD, Virtually Safety Dose)은 허용위해도를 10<sup>-6</sup>(백만명당 1명의 초고발암확률)으로 간주할 때, 이에 해당하는 대상물질의 농도를 의미함

## 나. 비발암성물질

- 어떠한 물질이 비발암성물질임이 확인되었다면 그 물질에 대한 투여량-반응평가가 이루어짐
  - 특정 농도 투여량의 이하에서 매일 섭취했을 때, 사람의 건강에 해로운 영향을 미치지 않는 추정농도로 표준 투여량(RfD, References dose)으로 나타냄
  - 표준 투여량(RfD)은 특정 요인에 노출되는 인구집단의 1일 '안전(safety)' 용량을

## 평가하는 수치임

※ 표준 투여량이란 가장 민감한 인구집단을 화학물질의 가장 민감한

독서영향으로부터 예방할 수 있는 평생 또는 만성 용량 혹은 노출수준으로 정의할 수 있음. 대부분의 경우, RfD와 동일하거나 이하의 수준에 노출된 인구집단에서 노출기간과는 상관없이 유해영향이 발생하지 않을 것으로 기대되며, 역으로 RfD 이상의 노출에서 반드시 유해영향이 발생하는 것을 의미하지는 않음. 표준투여량의 단위는 일반적으로 mg/kg/day, drinking water exposure: µg/L, ambient air exposure : µg/m<sup>3</sup>으로 제시.

- 화학물질별로 표준 투여량(RfD)이 다르며, RfD를 결정하는 데에는 흡입참고치(Reference concentration, inhalation RfC) 또는 섭취참고치(ingestion RfD) 방법이 일반적으로 사용
- 가장 낮은 농도에서 건강에 대한 특정한 영향이 관찰될 때 이를 최저영향관찰수준(LOAEL, lowest observed adverse effects level)이라 나타내며, 특정 영향이 일어나지 않을 가장 높은 농도를 무영향관찰수준(NOAEL, no observed adverse effects level)로 표시
  - 비발암성 유해물질의 위해성을 결정하는 단계에서 LOAEL의 선택은 RfD 또는 RfC의 평가에 가장 중요한 첫째 단계임
- 인체에 대한 적절한 자료가 없을 경우, 인체에 상응하는 농도(HEC, Human Equivalent Concentration)가 평가되어야 함
  - 동물연구로부터 NOAEL은 노출기준간과 사람과 동물의 차이에 따라 교정되는 NOAEL(HEC)로 변환되어야 하며, RfC 또는 RfD는 여기에 불확실성 상수 (UF, uncertainty factor)와 변형상수(MF, modifying factor)를 고려해야 함

$$\begin{matrix} \text{RfC 또는 RfD} \\ (\text{mg/kg-day, } \mu\text{g/m}^3) \end{matrix} = \frac{\text{NOAEL 또는 LOAEL}(\text{mg/kg-day, } \mu\text{g/m}^3)}{\text{UF} \times \text{MF}}$$

- 여기에서 UF는 RfD 또는 RfC를 설정하는 데 사용된 자료를 외삽(estrpolation)할 때 발생하는 불확실성을 교정하기 위해 사용하는 것이고, MF는 특정 화학물질을 이용할 수 있는 자료의 과학적 불확실성에 대한 전문가의 판단을 반영한 것임
- 불확실성을 반영하는 것은 생물의 종간 및 종내의 변이성(interspecies and intraspecies variation), 자료가 불완전하거나 제한적일 때, 아만성 연구일 때, 그리고 건강 장애가 심각한 경우 등의 이유임

〈표 3〉 불확실성 상수의 적용 지표

적용내용	적용상수
인체대상 연구로써 적절한 기간 노출에 의한 타당성 있는 결과로 인정될 경우	10
사람에 대한 자료가 유용하지 않아 동물실험으로써 장기간 노출에 의한 타당성 있는 결과를 인체에 적용한 경우	100
사람에 대한 자료가 유용하지 않고 만성 노출연구의 실험결과를 이용한 경우	1,000
NOAEL 대신 LOAEL을 사용한 경우	10
과학적인 판단에 의한 기타 불확실성 상수	2~5

적용상수는 불확실성상수에 곱해짐. 예를 들면, 사람에게 대한 자료가 유용하지 않고 만성 노출연구의 실험결과를 이용하며 NOAEL 대신 LOAEL을 이용하는 경우 불확실성 상수는 1,000X10=10,000이 됨

- 국내 ‘토양오염물질 위해성평가 지침(환경부 고시 제 2015-64호)’ 에서 규정하고 있는 독성평가 단계와 관련한 내용은 다음과 같음.



### 3. 독성평가

독성평가는 다음의 사항을 고려하여야 한다.

(1) 평가대상물질을 인체 발암물질과 비발암물질로 구분한다. 이 지침의 발암위해성평가 대상물질은 발암물질과 발암의심물질 미국 환경청 (USEPA) 발암등급상 A와 B, 또는 국제암연구센터 발암등급상 1과 2 등을 고려할 수 있다)을 모두 포함한다.

(2) 물질에 따른 인체 발암계수, 비발암참고치 및 흡수계수는 본 고시에서 제공된 [별지 제3호서식]과 [별지 제6호서식]에서 제시된 값을 노출경로별로 선택한다.

## 2.4. 위해도 결정 (Risk Characterization)

- 위해성을 예측하는 단계로 모든 노출 시나리오에 있어서 수용자들의 발암성과 비발암성 위해성을 정량적으로 예측함
  - 피폭량 평가 및 용량-반응 평가에서 산출된 정보를 통합하여 특정 오염물질의 특정농도에 노출되었을 경우 개인이나 인구 집단에서 유해한 영향이 발생할 확률을 결정하는 단계로 발암 물질의 경우는 발암 위해성, 비발암 물질은 비발암 위해성을 결정

### 가. 발암성 물질

- 일반적으로 개인위해도 (individual risk)와 인구집단위해도(population risk)로 표현
  - 인구집단의 위해도는 노출농도에 추계된 단위위해도를 곱해서 구할 수 있음
  - 어떤 오염물질에 대해서 용량-반응평가를 통해 산출된 경사도 인자(slope factor)와 노출평가를 통해 얻어진 노출량(mg/kg·day)을 곱하면 개인위해도를 구할 수 있으며, 개인위해도에 노출집단의 인구수를 곱하면 인구집단위해도를 구할 수 있음
  - 위해성평가는 많은 불확실성을 동반하기 때문에 반드시 결과해석에는 유의해야 하고, 위해도 결정단계에서는 반드시 불확실성에 대한 서술과 분석이 동시에 이루어져야 함

## 나. 비발암성 물질

- 용량·반응 평가를 통해 산출된 참고치(RfD)를 통해 실행 가능함
  - 현재의 오염수준을 평생동안의 1일 허용량(참고치, RfD 또는 RfC)과 비교함으로써 현오염수준이 1을 초과하는 경우에는 유해한 영향(독성)이 발생할 가능성이 있는 것을 의미하고, 1 이하는 안전하다는 것을 의미함

$$\text{위해도지수(HI)} = \frac{\text{현오염도 수준에서의 인체노출량 (mg/kg·day)}}{\text{참고치(RfD 또는 RfC, mg/kg·day)}}$$

- 국내 ‘토양오염물질 위해성평가 지침(환경부 고시 제 2015-64호)’ 에서 규정하고 있는 위해도결정 단계와 관련한 내용은 다음과 같음.

### 4. 위해도 결정

토양오염물질이 인체에 미치는 위해도를 결정하고자 할 경우 다음의 사항을 고려하여야 한다.

(1) [별지 제3호서식]을 통해 위해성평가 대상물질의 초과발암위해도와 위험비율(비발암위해도)를 각각 계산한다.

(2) 오염부지의 총 초과발암위해도는 [별지 제6호서식]에 제시된 발암계수와 [별지 제3호서식]의 노출경로별 위해도 결정식을 이용해 산정된 평가대상물질별 초과발암위해도를 [별지 제4호서식]에 따라 총합하여 결정한다.

(3) 오염부지의 위험지수는 [별지 제6호서식]에 제시된 비발암참고치와 [별지 제3호서식]의 노출경로별 위해도 결정식을 이용해 산정된 평가대상물질별 위험비율을 [별지 제4호서식]에 따라 총합하여 결정한다.

(4) 허용가능한 총 초과발암위해도는  $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 이며, 산정된 총 초과발암위해도가 허용가능한 총 초과발암위해도보다 크면 발암 위해성이 있는 것으로 판단한다.

(5) 허용가능한 위험지수는 1이며, 산정된 위험지수가 1보다 크면 비발암 위해성이 있는 것으로 판단한다.

## [참고문헌]

- 박용하, 양재의, 옥용식. 2005. 토양오염지역의 위해성 평가에 관한 외국 정책의 비교 분석 및 우리나라 정책개선에 관한 고찰. 한국지하수토양학회지 10(5):1-10.
- 한국지하수토양환경학회. 2001. 토양환경공학. 향문사.
- 환경부. 2003. 토양오염 위해성 평가방안 마련을 위한 연구용역: 위해성에 근거한 토양복원전략 모색.
- Atlantic PIRI, 1999, Atlantic RBCA Reference Documentation for Petroleum Impacted Sites Ver. 1.0, Atlantic Partnership In RBCA Implementation.
- 환경부. 2015.5.1. 토양오염물질 위해성평가 지침