2026년 한국토양비료학회 제58차 총회 및 정기학술대회

# 토양오염물질 인체 위해성평가 방법 개요

***Overview of human health risk assessment methods for soil contaminants***

2026. 8. 26

서울대학교 농생명공학부 이군택

# ❖ 위해성(Risk)이란?

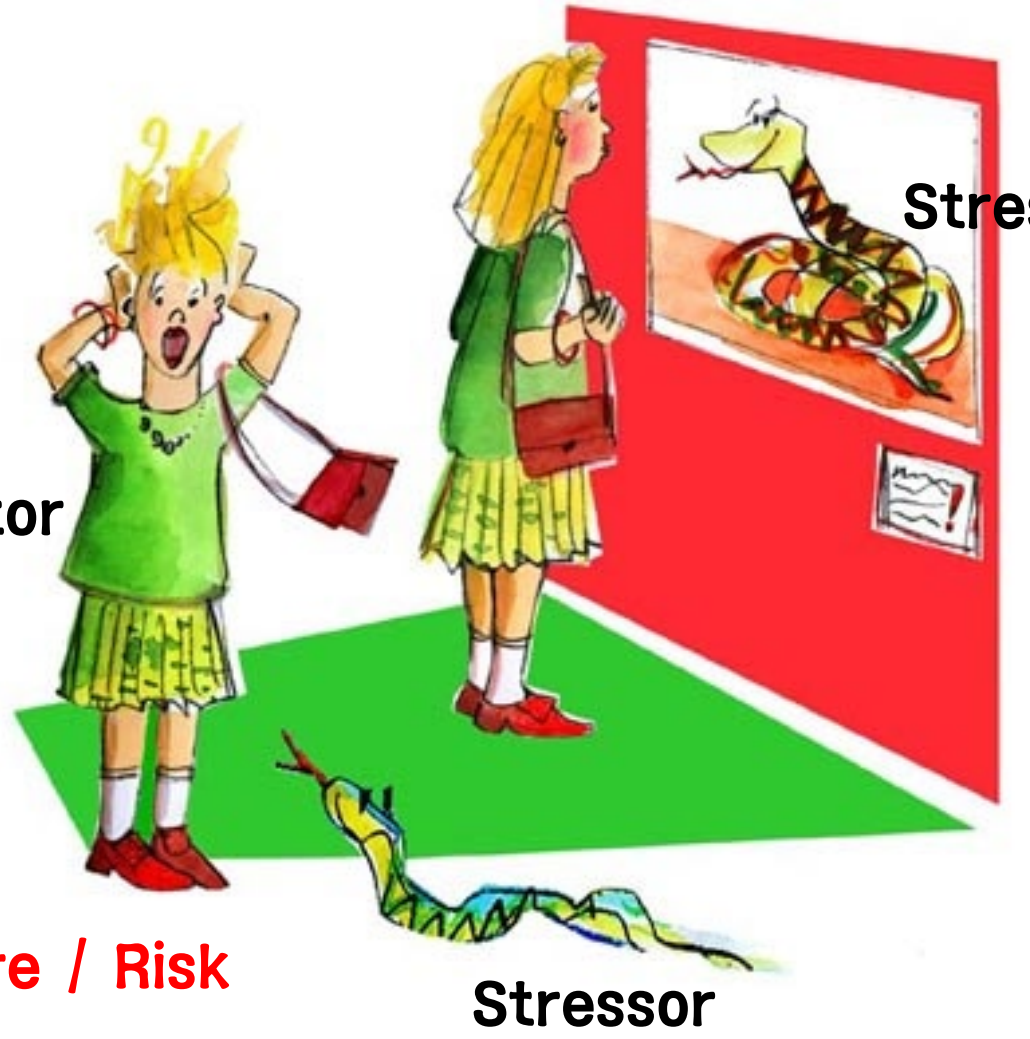
*EPA considers risk to be the chance of harmful effects to human health or to ecological systems resulting from exposure to an environmental stressor.*

U.S. EPA. *About Risk Assessment*. https://www.epa.gov/risk/about-risk-assessment (accessed 2024)

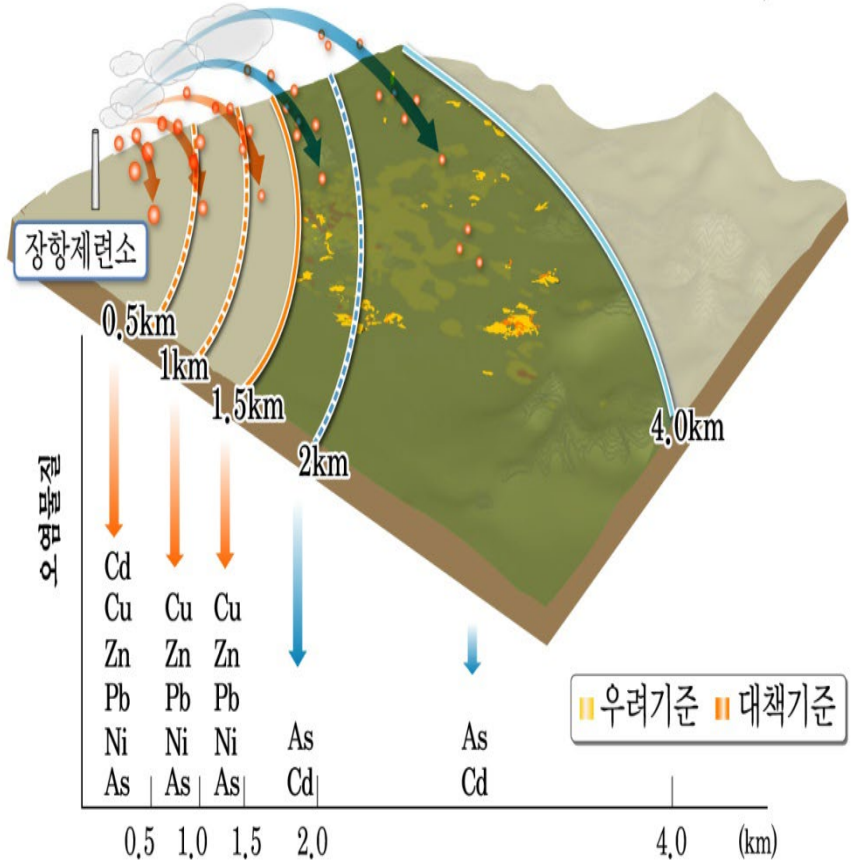
**환경 오염물질에 수용체(인체나 생태)가 노출(Exposure)되었을 때 해를 입을 수 있는 가능성**

[참고] 유해성(Hazard) : 화학물질의 독성 등 사람의 건강이나 환경에 좋지 않은 영향을 미치는 화학물질 고유의 성질

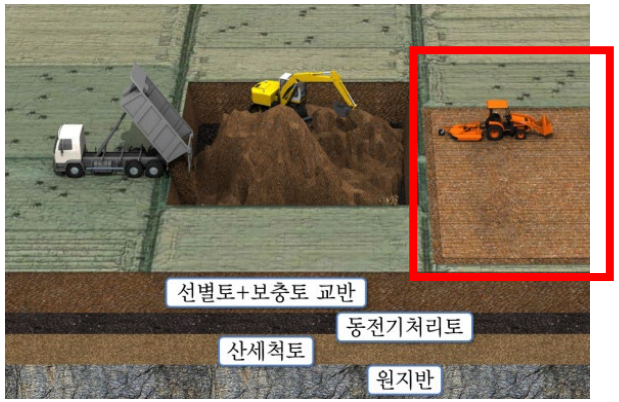
No exposure / No risk



# ❖ 토양오염과 위해성평가




되메우기 후
시비 및 경운



# ❖ 위해성평가의 기본 개념

*Risk = f(노출평가, 독성평가)*

## 노출평가

*Exposure Assessment*

- 노출경로별 오염물질 농도 (C)
- 노출경로별 섭취·접촉·흡입률
- 노출빈도(EF) · 노출기간(ED)
- 체중(BW) · 평균노출시간(AT)
- → ***결과물: 노출량 (ADD / ADE)***

## 독성평가

*Toxicity Assessment*

- 동물실험 · 역학연구 기반 용량-반응평가
- 발암성 물질 → 발암력 (**SF**)
- 비발암성 물질 → 참고용량/농도 (**RfD/RfC**)
- → ***결과물: 독성기준값***

## 위해도 산출 (Risk Characterization)

**발암위해도:** *Risk = 노출량 × SF*

**비발암위해도:** *HQ = 노출량 ÷ RfD*

# ❖ 위해성평가 절차

## 1 토양오염조사

*Soil Contamination Survey*

- 예비조사·개황조사·상세조사
- 오염범위·오염농도 분포 파악

→

## 2 노출경로 분석

*Exposure Pathway Analysis*

- 오염원 → 이동경로 → 수용체
- 경구섭취·피부접촉·흡입 등 식별

→

## 3 노출량 산정

*Exposure Assessment*

- 경로별 노출농도(EPC) 결정
- 노출시간·노출빈도·체중 등

→

## 4 독성 확인

*Toxicity Assessment*

- 발암성: 발암력(SF) 확인
- 비발암성: 참고용량(RfD) 확인

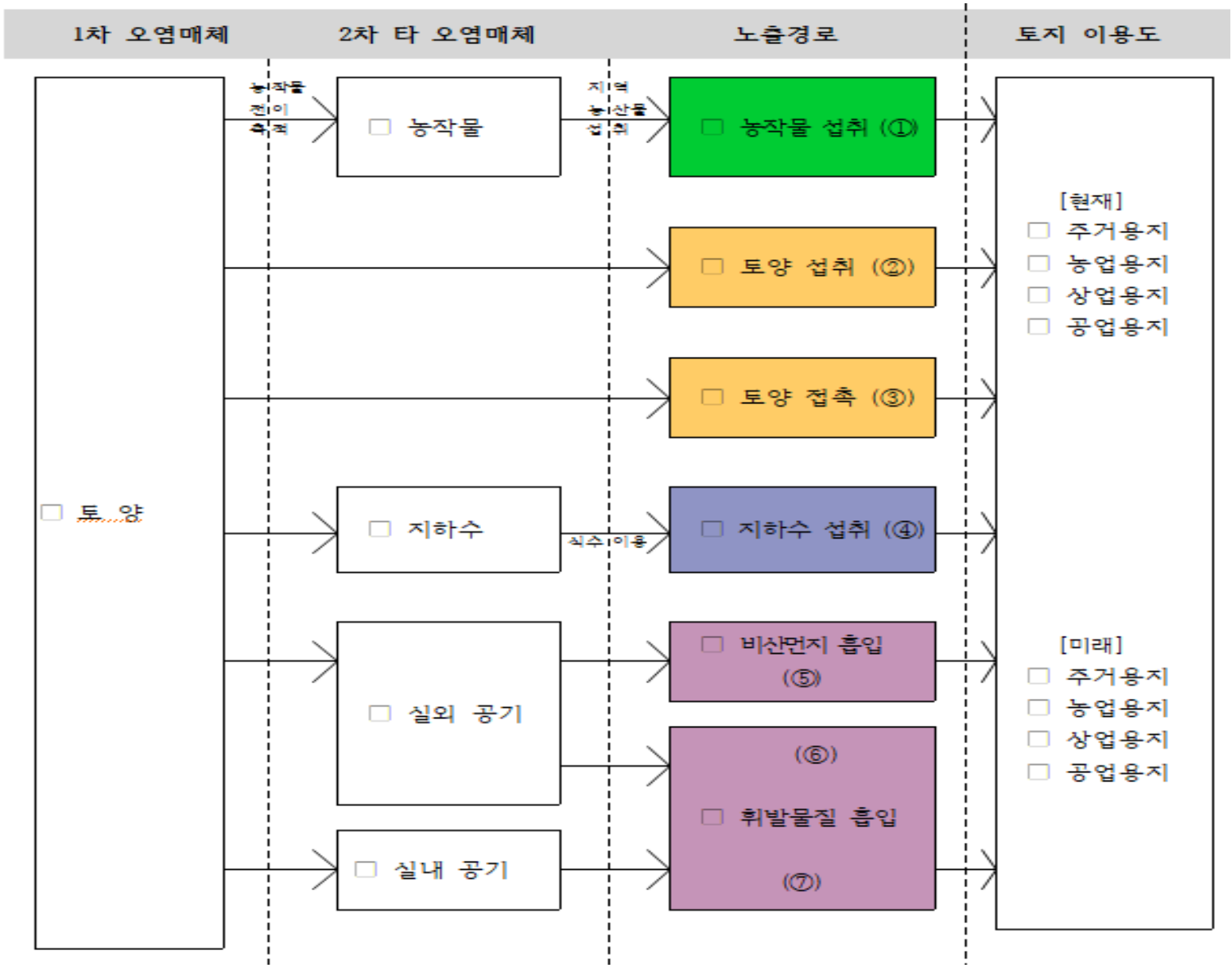
→

## 5 위해도 산정

*Risk Characterization*

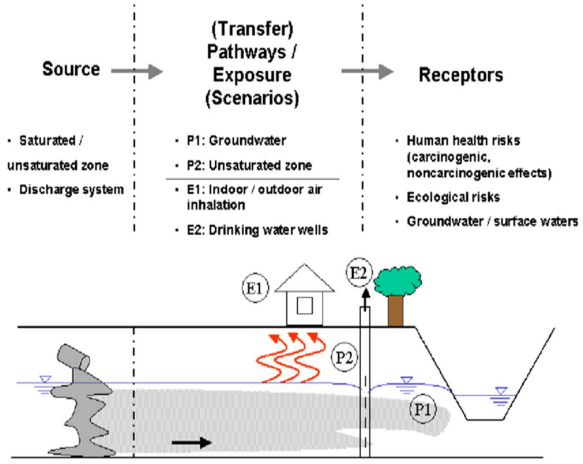
- 발암성: Risk = ADD × SF
- 비발암성: HQ = ADD ÷ RfD

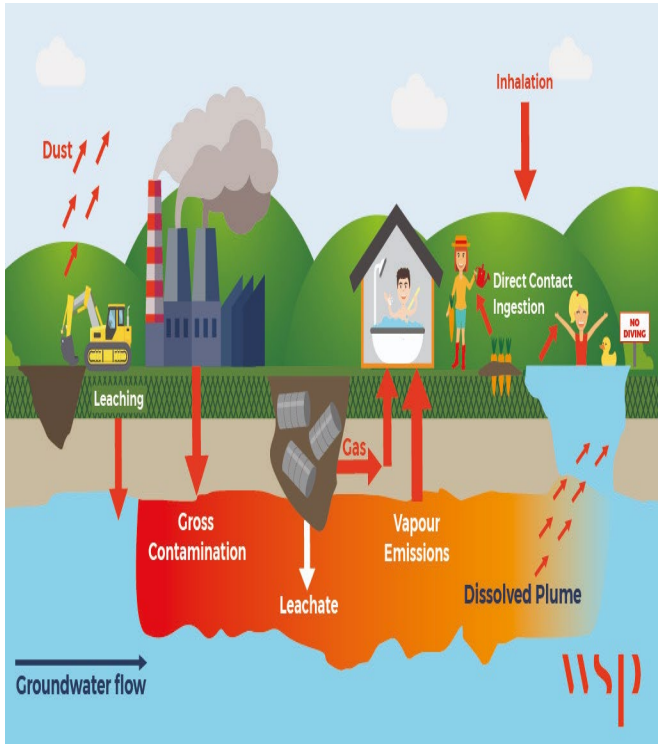
# 2 노출경로 분석




(1) 해당사항에 체크표시
(2) 노출경로 : ①②③④⑤⑥ 중에서 위해성평가 결과에 따라 노출경로 선택
(3) 기타 오염된 육류나 식육, 어류, 건설 노동자의 경우 굴착 시 지하수 접촉, 휘발성물질 흡입,생활용수 사용에 의한 지하수 접촉, 지하수 유래 휘발성 물질 흡입 등을 추가할 수 있음

# 〈참고〉부지개념모델(CSM : conceptual site model)




–부지의 오염원과 수용체, 그리고 이들을 연결하는 경로를 설명할 수 있는 부지 환경에 대한 사용 가능한 정보의 통합적인 요약 (NJDEP, 2019), 그림/표/서술/다이어그램 형식으로 표현 가능

–부지 내 오염물질의 이동 및 노출경로, 수용체 등에 대한 현장 자료 및 평가 결과의 종합 모식도

–오염부지 조사를 기반으로 한 오염원, 오염경로, 수용체에 대한 해석의 결과

–오염부지 관리를 위한 의사결정 지원 도구로서 개발됨

–단계(*기초, 개황, 상세*)적으로 진행되는 부지오염조사과정에서 획득된 최신 조사 결과를 통해 개선되며 생생한 부지 정보를 이해하기 쉽도록 작성

–오염부지 관리를 위한 핵심요소

–위해성평가 과정에서 평가대상지역, 평가단위에 대한 오염특성 파악의 도구이며 최종 CSM의 적절성은 위해성평가 또는 부지오염평가의 질에 연동되어 있음

NJDEP, 2019, Technical Guidance for Preparation and Submission of a Conceptual Site Model, New Jersey Department of Environmental Protection (https://www.nj.gov/dep/srp/guidance/srra/csm_tech_guidance.pdf)

# 2 노출경로 분석 예시: 농경지 중금속 오염 부지

| 구분 | 노출경로 | 관련 매체 | 적용여부 | 비고 |
|---|---|---|---|---|
| ① | 농작물 섭취<br>Crop Ingestion | 농작물 | ✓ 적용 | 토양 → 농작물 전이·흡착 (Uptake) |
| ② | 토양 섭취<br>Soil Ingestion | 토양 (직접) | ✓ 적용 | 손-입 접촉 등 직접 섭취(경구) |
| ③ | 토양 접촉<br>Dermal Contact | 토양 (직접) | ✓ 적용 | 피부 흡수 (Dermal Absorption) |
| ④ | 지하수 섭취<br>Groundwater Ingestion | 지하수 | ✓ 적용 | 지하수를 음용·생활용수로 이용 시에 한함 |
| ⑤ | 비산먼지 흡입<br>Fugitive Dust Inhalation | 실외 공기 | ✓ 적용 | 중금속 흡착 토양입자의 비산·흡입 |
| ⑥⑦ | 휘발물질 흡입<br>Volatile Inhalation | 실외·실내 공기 | ✗ 배제 | 중금속은 비휘발성 → 증기상 이동경로 불성립 |

*→ 중금속 오염 농경지에서는 ①~⑤ 경로만 "완전 노출경로"로 성립*

# 3 노출량(Intake) 산정 개념도

*노출경로에 따라 오염물질 농도·노출기간·노출빈도·평균노출기간 등을 고려하여 노출량을 산정*

## 노출경로 (Exposure Pathway)

① 농작물섭취 · ② 토양섭취 · ③ 토양접촉 · ④ 지하수섭취 · ⑤ 비산먼지흡입 ⑥ 휘발물질 흡입

*경로별로 아래 요소가 다르게 결정됨*

### 오염물질 노출농도

**C (mg/kg)**

*경로마다 값이 달라짐*

### 노출빈도

**EF (일/년)**

*주거 · 농업(350일/년)/상업 · 산업지역(100일/년)에 따라 달라짐*

### 노출기간

**ED (년)**

*성인(25년)/어린이(6년)로 구분*

### 평균노출기간

**AT (일)**

*발암물질: 25,550일*
*비발암물질: A-9,125일 /C-2,190일*

## 노출량 산정 (ADD / ADE)

경로별 산정식에 위 인자들을 대입하여 계산

# 노출 관련 인자

토양오염물질 위해성평가 지침
[시행 2025. 11. 5.] [환경부고시 제2025-165호, 2025. 11. 5., 일부개정]

## ➢ 노출빈도(EF: exposure frequency)

1년 중 수용체가 오염부지에 상주하여 오염물질에 노출되는 기간(일/년)

-주거 · 농업지역 : **350일/년** (연중 휴가 2주 제외)

-상업 · 산업지역 : 근무일 기준 **100일/년**(48주×5일/주×10시간/일)

## ➢ 노출기간(ED: exposure duration)

수용체가 생애 중 오염부지에 거주, 상주하여 오염물질에 대한 노출이 발생하는 기간

-성인 : 25년 (성인 상위 $90^{th}$ percentile은 25년)

-어린이 : 6년

## ➢ 평균노출기간(AT: averaging time)

독성발현기간, 오염물질 노출에 따라 영향을 받는 기간(일)

-발암물질 : 25,550일(평균수명 70년)-발암물질은 평생 평균 일일 노출량 기준으로 계산

-비발암물질 : 성인 9,125일(25년), 어린이 2,190일(6년)-노출되는 기간 동안의 평균 일일 노출량 기준으로 계산

# 노출농도 결정

- 노출농도(exposure concentration)는 토양, 지하수, 대기 또는 농작물 등의 매체를 통해 오염물질이 인체에 노출되는 농도이며 노출량 산정에 필요함
- 노출량은 노출경로별로 매체 중 실측 농도를 이용하는 것이 원칙이나 그렇지 못한 경우 토양노출농도를 활용하여 산출함
- 토양노출농도 결정: 평균의 95% UCL(Upper Confidence Limit), 부지 전체의 실제 평균 오염농도가 이 값보다 낮을 가능성이 95%라는 의미

## 토양오염물질 위해성평가 지침 [별지 제1호서식]

### (3)토양노출농도 결정

$$C_s = \text{상위95\%신뢰값} = \bar{x} + t_{95\%,df} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N_s}}$$

$C_s$ = 토양노출농도(mg/kg)

$\bar{x}$ = 현장조사 토양오염 평균농도

$t_{95\%,df}$ = t-분포표 데이터로부터 95%한계값($\alpha = 0.05$)과 자유도에 해당하는 통계치 기입

$\sigma$ = 현장조사 오염농도 표준편차

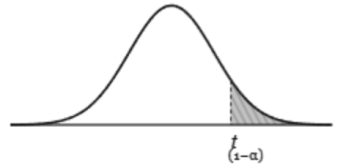
$N_s$ = 현장조사 총시료개수

자유도 = $N_s - 1$

**별지 6호의 1**

(1) 95% t-통계값 산정에 필요한 통계표

| 자유도 (Degree of Freedom) | 1−α .95 |
|---|---|
| 1 | 6.314 |
| 2 | 2.920 |
| 3 | 2.353 |
| 4 | 2.132 |
| 5 | 2.015 |
| 6 | 1.943 |
| 7 | 1.895 |
| 8 | 1.860 |
| 9 | 1.833 |
| 10 | 1.812 |
| 11 | 1.796 |
| 12 | 1.782 |
| 13 | 1.771 |
| 14 | 1.761 |
| 15 | 1.753 |
| 16 | 1.746 |
| 17 | 1.740 |
| 18 | 1.734 |
| 19 | 1.729 |
| 20 | 1.725 |
| 21 | 1.721 |
| 22 | 1.717 |
| 23 | 1.714 |
| 24 | 1.711 |
| 25 | 1.708 |
| 26 | 1.706 |
| 27 | 1.703 |
| 28 | 1.701 |
| 29 | 1.699 |
| 30 | 1.697 |
| 40 | 1.684 |
| 60 | 1.671 |
| 120 | 1.658 |
| ∞ | 1.645 |




- 자유도구간사이 통계값은 비례관계에 의해 구함
  (예, 자유도 47의 경우,
  1.679 = 1.684 +(1.671−1.684)/(60−40)×(47−40))

- 자유도 120 이상의 조건에서는 1.645 사용

# 노출경로별 인체 노출량 및 위해도 산정식

## 농작물+토양 섭취 경로(①②)

- 인체 노출량

$$ADD(\text{일일평균노출량, mg/kg-day}) = \frac{C_s \times (BCF \times CR_p + CR_s \times CF_1) \times ABS_{GI} \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

$C_s$: 토양노출농도, $BCF$: 토양-식물간 생물농축계수, $CR_p$ : 농작물일일섭취량, $CR_s$: 토양섭취량(A-100, C-200)
$CF_1$: 단위환산 인자, $ABS_{GI}$: 체내흡수계수, $EF$: 노출빈도, $ED$: 노출기간, $BW$: 체중(A:64.5, C: 16.7), $AT$: 평균시간
(발암25,550 일 / 비발암 성인9,125 일, 어린이2,190 일)

- 초과발암위해도

$$ECR = SF_o \times ADD$$

$SF_0$: 경구발암계수

- 위험비율 (비발암위해도)

$$HQ = \frac{ADD}{RfD_o}$$

$RfD_o$: 경구비발암참고치

## **노출량 산정(예시: As)

**비소의 경우 발암성 물질이면서, 간 독성, 신경 독성 등 암 이외의 비발암 독성도 있음

예시

토양 섭취 경로의 노출량 산정

○ 비소로 오염된 부지의 토양노출농도는 350.3 mg/kg, 토지이용도는 공업용지, 수용체는 성인이라고 가정하고, 토양섭취량은 50 mg/day, $ABS_{GI}$는 1, 노출빈도 100 days/year, 노출기간은 25 years, 체중은 62.8 kg으로 가정할때, 「토양오염물질 위해성평가 지침」[별지 제3호 서식]에 따라 토양 섭취 경로를 통한 노출량을 다음과 같이 산정할 수 있다.

- $$ADD = \frac{C_s \times CR_s \times CF_1 \times ABS_{GI} \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

ADD(일일평균노출량, mg/kg-day)

$C_s$(토양노출농도, mg/kg) = 350.3

$CR_s$(토양섭취량, mg/day) = 50

EF(노출빈도, days/year) = 100

ED(노출기간, years) = 25

BW(체중, kg) = 62.8

AT(평균시간, days) = 비발암 9,125, 발암 28,689

$CF_1$(단위환산인자, kg/mg) = 1.0E-06

- $$ADD\ (비발암) = \frac{350.3 \times 50 \times 1 \times 100 \times 25 \times 10^{-6}}{62.8 \times 9{,}125} = 7.6 \times 10^{-5}\ mg/kg\text{-}day$$

- $$ADD\ (발암) = \frac{350.3 \times 50 \times 1 \times 100 \times 25 \times 10^{-6}}{62.8 \times 28{,}689} = 2.4 \times 10^{-5}\ mg/kg\text{-}day$$

## **위해도 산정(예시: As)

예시

위해도 결정

○ 비소로 오염된 부지에서 토양 섭취 경로를 통한 비소의 일일평균노출량이 $7.6\times10^{-5}$(비발암성), $2.4\times10^{-5}$(발암성) mg/kg-day로 산정되었다. 비소의 섭취독성참고치($RfD_o$)는 3.0E-4 mg/kg-day, 섭취발암계수($SF_o$)는 1.5 $(mg/kg\text{-}day)^{-1}$이다. 이때, 「토양오염물질 위해성평가 지침」[별지 제3호 서식]에 따라 비소의 위험비율(비발암위해도)과 초과발암위해도는 다음과 같이 산정할 수 있다. 위험비율(비발암위해도)는 0.25, 발암위해도는 $3.6\times10^{-5}$로 결정되었다.

- $위험비율(비발암위해도) = \frac{ADD(비발암)}{RfD_o} = \frac{7.6 \times 10^{-5}}{3.0 \times 10^{-4}} = 0.25$
- $초과발암위해도 = ADD(발암) \times SF_o = 2.4 \times 10^{-5} \times 1.5 = 3.6 \times 10^{-5}$

$RfD_o$(섭취독성참고치, mg/kg-day) = 3.0E-4

$SF_o$(섭취발암계수, $(mg/kg\text{-}day)^{-1}$) = 1.5

# 토양접촉 경로(③) 위해도 산정식

## ○ 인체 노출량

$$ADD(mg/kg\text{-}day) = \frac{C_s \times (AF \times ABS_D \times CF_1) \times SA_e \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

*AF: 토양-피부간 흡착계수, $ABS_D$: 피부흡수계수, $SA_e$: 토양접촉체표면적(A-4,338 $cm^2$/day, C-1,926$cm^2$/day)*

## ○ 초과발암위해도

$$ECR = SF_{abs} \times ADD$$

*$SF_{abs}$: 피부흡수발암계수*

## ○ 위험비율 (비발암위해도)

$$HQ = \frac{ADD}{RfD_{abs}}$$

*$RfD_{abs}$: 피부흡수비발암참고치*

# 지하수 섭취 경로(④) 위해도 산정식

- **인체 노출량**

$$ADD(mg/kg-day) = \frac{C_w \times CR_w \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

$C_w$: 지하수노출농도, $CR_w$: 일일지하수섭취량

또는

$$ADD(mg/kg-day) = \frac{C_s \times CR_w \times EF \times ED}{BW \times AT} \times \frac{1}{DAF \times \left(K_d + \frac{\theta_w + \theta_a H}{\rho_b}\right)}$$

**DAF**: 희석-저감계수(1또는20), $K_d$:토양-물 분배계수, $\theta_w$: 액상, $\theta_a$: 기상, $H$: 무차원헨리상수, $\rho_b$: 용적밀도

여기서,

$$DAF(\text{희석-저감계수}) = 1 + \frac{K \times i_w \times d}{I \times L}$$

$K$: 수리전도도, $i_w$: 지하수수리구배, $d$:혼합대 깊이, $I$: 침투율, $L$:오염원의 길이

- **초과발암위해도**

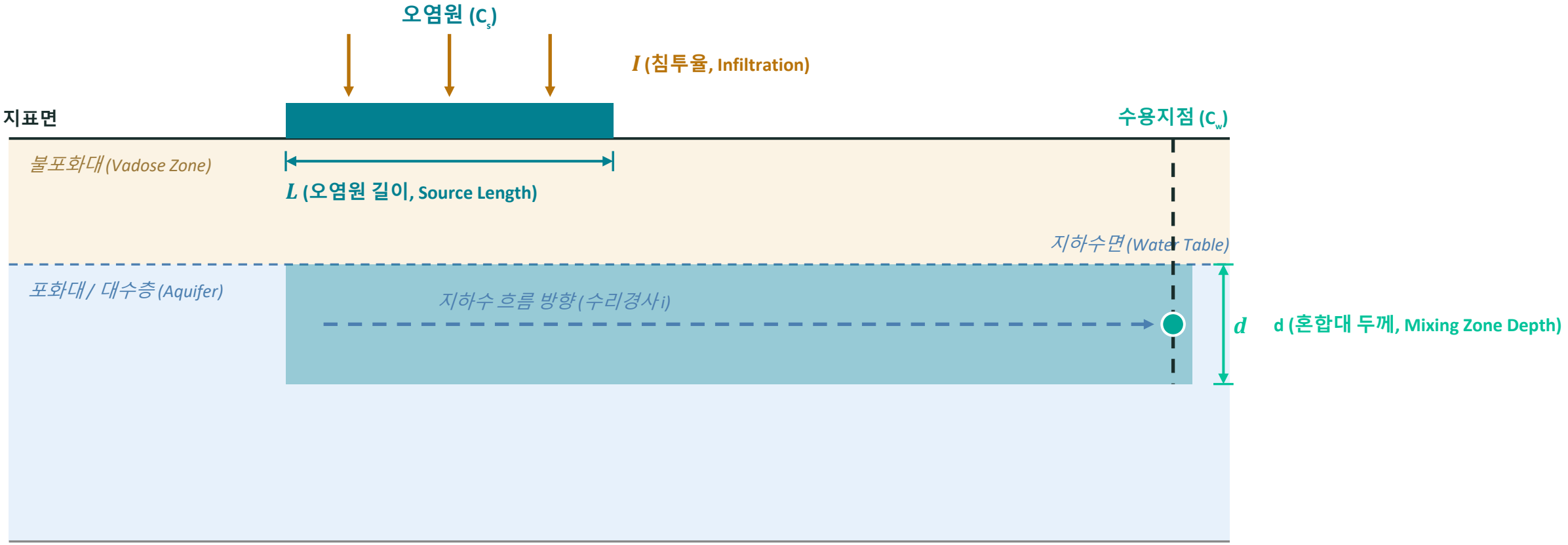
$$ECR = SF_o \times ADD$$

- **위험비율 (비발암위해도)**

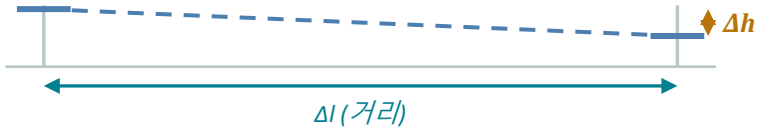
$$HQ = \frac{ADD}{RfD_o}$$

# DAF 산정식 변수 개념도: L · I · d

*오염원(토양) → 지하수 희석 과정에서 오염원 길이(L)·침투율(I)·혼합대 두께(d)의 위치*




*참고: 수리경사 개념 (본 단면도에선 실제 축척보다 과장해 표현)*




$i_w = \Delta h / \Delta l$ *(수두차 ÷ 거리, 실제로는 약 0.001~0.05 수준)*

$DAF = 1 + (K \times i_w \times d) / (I \times L)$ → *L↑ 또는 d↓ 일수록 희석이 작아져 지하수 농도가 높아짐*

# 실외 비산먼지 흡입 경로(⑤) 위해도 산정식

- 인체 노출량

$$ADE(mg/m^3) = \frac{C_s \times (PM_{10} \times frs) \times EF \times ED \times CF_1}{AT}$$

$PM_{10}$: 실외공기 내 $PM_{10}$ 량, $frs$: 실외비산먼지(PM10) 내 토양비율(0.4)

- 초과발암위해도

$$ECR = URF_{inh} \times ADE \times CF_2$$

$URF_{inh}$: 흡입단위 위해도, $CF_2$: 단위환산인자

- 위험비율 (비발암위해도)

$$HQ = \frac{ADE}{RfC}$$

$RfC$: 흡입노출 참고농도

# 최종 위해도 산정: 경로별 위해도의 합산

*수용체가 여러 노출경로에 동시에 노출되는 경우, 경로별 위해도를 합산해 최종 판정합니다*

## 총초과발암위해도 (TCR, Total Cancer Risk)

$$TCR = ECR① + ECR② + ECR③ + ECR④ + ECR⑤$$

- 동시에 노출되는 모든 경로의 ECR 합산
- 경로 하나가 낮아도 여러 경로가 겹치면 총위해도는 커질 수 있음

**판정기준: TCR < $1\times10^{-4}$ ~$1\times10^{-6}$ (허용 가능)**

## 총위험지수 (HI, Hazard Index)

$$HI = HQ① + HQ② + HQ③ + HQ④ + HQ⑤$$

- 개별 경로 값은 HQ, 합산값은 "HI"로 용어가 달라짐
- *US EPA 권고: 표적장기·독성기전이 같은 물질·경로끼리 묶어 합산*
  ***국내 의 경우 물질별 합산은 하지 않음*

**판정기준: HI < 1 (허용 가능)**

*핵심: 경로별 개별 위해도(ECR, HQ)가 각각 기준 이하여도, 여러 경로에 동시 노출되면 합산값(TCR, HI)이 기준을 초과할 수 있습니다. 최종 위해 판정은 반드시 합산값(TCR, HI) 기준으로 이루어집니다.*

# 참고 자료

## 별지 6호의 3
## (독성계수와 발암계수)

| 구분 | 등급 | 내용 |
|---|---|---|
| USEPA | A | 인체발암물질(Known human Carcinogen) |
| | B1 | 인체발암의심물질(Probable human carcinogen):<br>based on limited evidence of carcinogenicity in humans |
| | B2 | 인체발암가능물질(Probable human carcinogen):<br>based on sufficient evidence of carcinogenicity in animals |
| | C | 인체발암가능물질(Possible Human Carcinogen):<br>based on sufficient evidence of carcinogenicity in animals |
| | D | 발암미확인물질(Not classified) |
| | E | 비발암물질(Non-carcinogen) |
| IARC | 1 | 인체발암물질(Carcinogenic to humans) |
| | 2A | 인체발암의심물질(Probably carcinogenic to humans) |
| | 2B | 인체발암가능물질(Possibly carcinogenic to humans) |
| | 3 | 발암미확인물질<br>(Not classifiable as to their carcinogenicity in humans) |
| | 4 | 비발암물질(Probably not carcinogenic to humans) |

| 물질 | | 비발암 특성 | | | | 발암 특성 | | | 발암 등급 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | RfDo | RfDabs[4] | RfC | | SFo | SFabs[5] | $URF_{inh}$ | | |
| | | (mg/kg-day) | (mg/kg-day) | $mg/m^3$ | | $(mg/kg-day)^{-1}$ | $(mg/kg-day)^{-1}$ | $(\mu g/m^3)^{-1}$ | IRIS | IARC |
| 카드뮴 | | 5.0E-4<br>1.0E-3(food) | 1.3E-5 | 7.0E-4[6] | | - | - | 1.8E-3 | -(섭취)<br>B1(흡입) | 1 |
| 구리 | | 1.4E-1[6] | 8.0E-2 | 1E-3[6] | | - | - | - | D | - |
| 비소 | | 3.0E-4 | 2.9E-4 | 3.0E-4 | | 1.5E+0 | 1.6E+0 | 4.3E-3 | A | 1 |
| 수은 | | 3.0E-4[2] | 2.9E-4 | 3.0E-4 | | - | - | - | D | 3 |
| 납 | | 5.0E-4[1] | 5.0E-4 | - | | 8.5E-3[3] | 8.5E-3 | 1.2E-5[3] | B2 | 2B |
| 6가크롬 | | 3.0E-3 | 7.5E-5 | 1.0E-4<br>(입자상) | | - | - | 1.2E-2 | D(섭취)<br>A(흡입) | 1 |
| 아연 | | 3.0E-1 | 3.0E-1 | - | | - | - | - | D | - |
| 니켈 | | 2.0E-2(용존상)<br>5.0E-2[6] | 8.0E-4 | - | | - | - | 2.4E-4<br>(입자상) | -(섭취)<br>A(흡입) | 2B |
| 불소 | | 4.0E-2[3] | 4.0E-2 | 1.3E-2[3] | | - | - | - | - | 3 |
| 벤젠 | | 4.0E-3 | 4.0E-3 | 3.0E-2 | | 5.5E-2 | 5.5E-2 | 7.8E-6 | A | 1 |
| 에틸벤젠 | | 1.0E-1 | 1.0E-1 | 1.0E+0 | | - | - | - | D | 2B |
| 톨루엔 | | 8.0E-2 | 8.0E-2 | 5.0E+0 | | - | - | - | - | 3 |
| 크실렌 | | 2.0E-1 | 2.0E-1 | 1.0E-1 | | - | - | - | - | 3 |
| TPH | VPH[7] | 지방족 $C_5$~$C_8$ | 4.0E-2 | 4.0E-2 | 2.0E-1 | - | - | - | - | - |
| | | 지방족 $C_9$~$C_{12}$ | 1.0E-1 | 1.0E-1 | 2.0E-1 | - | - | - | - | - |
| | | 방향족 $C_9$~$C_{10}$ | 3.0E-2 | 3.0E-2 | 5.0E-2 | - | - | - | - | - |
| | EPH[7] | 지방족 $C_9$~$C_{18}$ | 1.0E-1 | 1.0E-1 | 2.0E-1 | - | - | - | - | - |
| | | 지방족 $C_{19}$~$C_{36}$ | 2.0E+0 | 2.0E+0 | - | - | - | - | - | - |
| | | 지방족 >$C_{36}$~$C_{40}$ | 2.0E+1 | - | - | - | - | - | - | - |
| | | 방향족 $C_{11}$~$C_{22}$ | 3.0E-2 | 1.1E-2 | 5.0E-2 | - | - | - | - | - |

※ 통합위해도 정보 시스템 (IRIS, USEPA) 참고

1) Health Canada(2021), FEDERAL CONTAMINATED SITE RISK ASSESSMENT IN CANADA : Toxicological Reference Values (TRVs)

2) Edition of the drinking water standards and health advisories (2004, USEPA) 참고

3) California EPA Chemical DB 참고

4) Oral to dermal 외삽된 RfDabs = RfDo × ABSgi

5) Oral to dermal 외삽된 SFabs = SFo / ABSgi

6) Cd (RfC): IRIS (1999) Toxicologocal review; Cadmium and compounds  Cu, Ni (RfD, RfC): RIVM (2001) Re-evaluation of human-toxicological maxi permissible risk levels (여기서는 RfD대신 TDI (tolerable daily intake)사용)

7) MADEP(2003), Updated petroleum hydrocarbon fraction toxicity values for the VPH/EPH/APH methodology

## 평균 자연 배경농도(mg/kg)

별지 6호의 2

| 물질 | 평균 자연배경농도[1](mg/kg) |
|---|---|
| 카드뮴 | 0.3[2] |
| 구리 | 18.5 |
| 비소 | 8.51 |
| 납 | 25.7 |
| 아연 | 76.6 |
| 니켈 | 19.6 |
| 불소 | 258 |

1) 국립환경과학원(2024), 토양오염물질 기준설정 및 관리방안 연구(2024)

2) 국립환경과학원(2004), 토양오염기준 평가 및 확립에 관한 연구(Ⅰ)

※ 값이 없을 경우 "0" 적용

# 토양-식물간 생물축적 계수(BCF)

별지 6호의 4

(4) 토양-식물간 생물축적계수(BCF)

| 물질 | CAS No. | BCF | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 분류 | 곡류 | 과일 | 엽채류 | 근채류 |
| 카드뮴 | 7440-43-9 | USEPA[1] | 0.36 (pH 4.4-8.0) | 0.09 (pH 4.6-7.1) | 0.364 (pH 4.6-8.4) | 0.064 (pH 4.6-8.0) |
| | | U.A[2] | · | · | 4.06(pH 6.0)<br>0.793(pH 7.0)<br>0.155(pH 8.0) | 3.66(pH 6.0)<br>0.706(pH 7.0)<br>0.136(pH 8.0) |
| | | RIVM[3] | · | · | 0.7 (0.34-1.34) | 0.15 (0.01-0.75) |
| 구리 | 7440-50-8 | USEPA[1] | · | · | · | · |
| | | U.A[2] | · | · | · | · |
| | | RIVM[3] | · | · | 0.1 (0.08-0.22) | 0.1 (0.032-0.3) |
| 비소 | 7440-38-2 | USEPA[1] | 0.026 (pH 7.5) | 0.002 (pH NR[4]-7.5) | 0.036 (pH 5.5-7.5) | 0.008 (pH NR-7.5) |
| | | U.A[2] | · | · | 0.009 | 0.009 |
| | | RIVM[3] | · | · | 0.03 (0.001-0.10) | 0.015 |
| 수은 (무기) | 7439-97-6 | USEPA[1] | 0.0854 (pH 5.3-7.1) | 0.01 (pH 5.3-7.1) | 0.008 (pH 5.3-7.1) | 0.014 (pH 5.3-7.1) |
| | | U.A[2] | · | · | 0.171(2.5% SOM)<br>0.052(5.0% SOM)<br>0.0048(100% SOM) | 0.05 |
| | | RIVM[3] | · | · | 0.03 (0.001-0.04) | 0.015 |
| 납 | 7439-92-1 | USEPA[1] | · | · | · | · |
| | | U.A[2] | · | · | 0.012 | 0.008 |
| | | RIVM[3] | · | · | 0.03 (0.012-0.044) | 0.001 (0.001-0.006) |
| 크롬 | 7440-47-3 | USEPA[1] | · | · | · | · |
| | | U.A[2] | · | · | 0.06 | 0.02 |
| | | RIVM[3] | · | · | 0.02 | 0.002 (0.001-0.004) |
| 아연 | 7440-66-6 | USEPA[1] | 0.1 (pH 5.3-8.0) | 0.046 (pH 4.6-7.3) | 0.25 (pH 4.6-8.0) | 0.044 (pH 4.6-8.0) |
| | | U.A[2] | · | · | · | · |
| | | RIVM[3] | · | · | 0.4 (0.26-0.65) | 0.1 (0.02-0.61) |
| 니켈 | 7440-02-0 | USEPA[1] | 0.01 (pH 6.2-8.0) | 0.006 (pH 5.9-7.3) | 0.032 (pH 5.3-8.0) | 0.008 (pH 5.9-8.0) |
| | | U.A[2] | · | · | 0.047 | 0.018 |
| | | RIVM[3] | · | · | 0.1 | 0.07 (0.011-0.678) |
| 불소 | 16984-48-8 | ORNL[5] | 0.006 | 0.006 | 0.06 | 0.006 |

※ USEPA자료를 기본값으로 사용함

1) USEPA(1996), Soil Screening Guidance: Technical Background Document 참고
(단위: (mg_contaminant/kg_plant dw)/(mg_contaminant/kg_soil))

2) UK EA(2005), CLEA UK Handbook(draft) 참고: (단위: (μg_contaminant/g_plant dw)/(μg_contaminant/g_soil))

3) RIVM(2001), Evaluation and revision of the CSOIL parameter set p.23 참고
(단위: (mg_contaminant/kg_plant dw)/(mg_contaminant/kg_soil))

4) NR: Not reported

5) ORNL(1984), A Review and Analysis of Parameters for Assessing Transport of Environmentally Released Radionuclides through Agriculture 참고
(단위: (mg_contaminant/kg_plant dw)/(mg_contaminant/kg_soil))

# 성인 및 어린이의 재배농작물 일일섭취량($CR_p$, kg/day)

별지 6호의 5

## (5) 성인 및 어린이의 재배농작물 일일섭취량($CR_p$, kg/day)

| 구분 | | 곡류 | 과일류 | 채소류 | | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 엽채류*** | 근채류*** | |
| 전국 평균 | 성인 | 0.248* | 0.195* | 0.304 | 0.137 | 국립환경과학원, 2019b; c[1)] |
| | 어린이 | 0.141** | 0.174** | 0.071 | 0.043 | |
| 수분-건조 전환계수 | | 0.859 | 0.142 | 0.117 | 0.217 | 농촌진흥청, 2020[2)] |

※ 토지이용도별(주거지역, 농업지역, 상·공업지역, 실외 활동지역, 기타지역) 성인 및 어린이의 재배농작물 일일섭취량(건중량) 선정방법

① (계산식) 전국평균 농작물 일일섭취량(생중량) × 수분-건조 전환계수 × 섭취한 농작물 중 재배한 농작물 섭취비율(0.0~1.0)

② 필요시 부지특이적 조사값(건중량) 사용가능하며, 이 경우 사용한 조사방법 등 명확한 근거를 제시하여야 함

1) 국립환경과학원(2019b), 한국인의 노출계수 핸드북
국립환경과학원(2019c), 한국 어린이의 노출계수 핸드북

* 성인의 곡류·과일류 섭취량(g/kg-day) 평균에 성인 체중(kg)을 반영하여 산정

** 어린이 연령군별(1~2세, 3~6세) 곡류·과일류 섭취량의 가중평균(g/kg-day)에 어린이 체중(kg)을 반영하여 산정

*** 성인·어린이의 채소류 섭취량을 엽채류와 근채류로 분류 합산(g/kg-day) 후 수용체별(성인, 어린이) 체중을 반영하여 산정

2) 농촌진흥청(2020), 국가표준식품성분 DB 9.2 참고

# 체내흡수계수($ABS_{GI}$)

별지 6호의 6

(6) 체내흡수계수($ABS_{GI}$)

| 물질 | | | GI 흡수 | | | | 제안된 $ABS_{GI}$ (unitless) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 참고문헌 | 종 | 섭취종류 | %장내흡수율 | |
| 카드뮴 | | | IRIS, 1999 | Human | diet | 2.5% | 0.025 |
| | | | | Human | water | 5% | |
| 비소 | | | Bettley, 1975 | Human | assume aqueous | 95% | 0.95 |
| 수은 | $HgCl_2$ | | IRIS, 1999 | Rats | water | 7% | 0.95 |
| | Hg | | ATSDR, 1994 | Human | 급성흡입 (수은증기) | 74-80% | |
| | $CH_3Hg$ | | Aberg, 1969 | Human | aqueous | 95% | |
| 6가크롬 | | | Donaldson and Barreras, 1996 | Rats | water | 2.5% | 0.025 |
| 아연 | | | ATSDR, 1994 | Human | diet | Highly variable | - |
| 구리 | | | - | - | - | 57% | 0.57 |
| 니켈 | | | Elakhovskaya, 1972 | Human | diet/water | 4% | 0.04 |
| 불소 | | | USEPA, 2015 | - | - | - | 1 |
| 유기물질 | | | USEPA, 2004 | - | - | generally >50% | 1 |
| TPH | VPH | 지방족 $C_5$~$C_8$ | MADEP, 2002 | - | soil | 100% | 1 |
| | | 지방족 $C_9$~$C_{12}$ | MADEP, 2002 | - | soil | 100% | 1 |
| | | 방향족 $C_9$~$C_{10}$ | MADEP, 2002 | - | soil | 100% | 1 |
| | EPH | 지방족 $C_9$~$C_{18}$ | MADEP, 2002 | - | soil | 100% | 1 |
| | | 지방족 $C_{19}$~$C_{36}$ | MADEP, 2002 | - | soil | 100% | 1 |
| | | 지방족 >$C_{36}$~$C_{40}$ | - | - | - | - | - |
| | | 방향족 $C_{11}$~$C_{22}$ | MADEP, 2002 | - | soil | 36% | 0.36 |

USEPA(2004), Risk Assessment Guidance for Superfund Volumn I : Human Health Evaluation Manual(Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment)에서 재인용

USEPA(2015), WWW.epa.gov/region9/superfund/prg/

MADEP(2002), Characterizing risks posed by petroleum contaminated sites: Implementation of the MADEP VPH/EPH approach

# 피부흡수계수(ABSD)

별지 6호의 7

| 물질 | | | 피부흡수계수(unitless) |
|---|---|---|---|
| 카드뮴[1] | | | 0.14 |
| 구리[1] | | | 0.1 |
| 비소[1] | | | 0.03 |
| 수은[1] | | | 0.05 |
| 납[1] | | | 0.006 |
| 6가크롬[1] | | | 0.09 |
| 아연[1] | | | 0.02 |
| 니켈[1] | | | 0.35 |
| 벤젠[1] | | | 0.08 |
| 에틸벤젠[1] | | | 0.2 |
| 톨루엔[1] | | | 0.12 |
| 크실렌[1] | | | 0.12 |
| TPH | VPH[2] | 지방족 $C_5$~$C_8$ | 1 |
| | | 지방족 $C_9$~$C_{12}$ | 0.5 |
| | | 방향족 $C_9$~$C_{10}$ | 0.5 |
| | EPH[2] | 지방족 $C_9$~$C_{18}$ | 0.5 |
| | | 지방족 $C_{19}$~$C_{36}$ | 0.1 |
| | | 지방족 >$C_{36}$~$C_{40}$ | - |
| | | 방향족 $C_{11}$~$C_{22}$ | 0.1 |

1) Health Canada(2007), Federal Contaminated Site Risk Assessment in Canada. Part I: Guidance on Human Health Preliminary Quantitative Risk Assessment

2) MADEP(2002), Characterizing risks posed by petroleum contaminated sites: Implementation of the MADEP VPH/EPH approach

# 수용체별 토양접촉체 표면적

별지 6호의 8

## (8) 수용체별 토양접촉체표면적($SA_e$, $cm^2$/day)

| 수용체 | 체표면적 | | | 토양접촉체표면적 |
|---|---|---|---|---|
| | 평균신장 (cm) | 평균 몸무게 (kg) | 체표면적 | 전체의 25%[3] |
| 성인 | - | - | 17,352[1] | 4,338 |
| 어린이[2] | 101.8* | 16.7 | 7,704 | 1,926 |

1) 국립환경과학원(2019b), 한국인의 노출계수 핸드북

2) 국립환경과학원(2019c), 한국 어린이의 노출계수 핸드북; 수식: 체표면적 = $391.5 \times 체중^{0.50} \times 신장^{0.34}$

* 어린이 연령별(1~6세) 평균신장의 가중평균임

3) USEPA(1992), Dermal Exposure Aseesment: Principes and Applications

# 무차원 헨리상수, 공기내 확산성, 수중 확산성

별지 6호의 9

(9) 무차원 헨리상수, 공기내 확산성, 수중확산성

| 물질 | | | 무차원 헨리상수 (H) | 공기내 확산성 ($D_i$, $cm^2/s$) | 수중확산성 ($D_w$, $cm^2/s$) |
|---|---|---|---|---|---|
| 벤젠[1] | | | 0.228 | 0.088 | 9.80E-6 |
| 톨루엔[1] | | | 0.272 | 0.087 | 8.60E-6 |
| 에틸벤젠[1] | | | 0.323 | 0.075 | 7.80E-6 |
| 크실렌[2] | | | 0.290 | 0.072 | 8.5E-6 |
| 수은[1] | | | 0.467 | 0.0307 | 6.30E-6 |
| TPH | VPH[3] | 지방족 $C_5$~$C_8$ | 54 | 0.08 | 1.0E-5 |
| | | 지방족 $C_9$~$C_{12}$ | 65 | 0.07 | 1.0E-5 |
| | | 방향족 $C_9$~$C_{10}$ | 0.33 | 0.07 | 1.0E-5 |
| | EPH[3] | 지방족 $C_9$~$C_{18}$ | 69 | 0.07 | 5.0E-6 |
| | | 지방족 $C_{19}$~$C_{36}$ | - | - | - |
| | | 지방족 >$C_{36}$~$C_{40}$ | - | - | - |
| | | 방향족 $C_{11}$~$C_{22}$ | 0.03 | 0.06 | 1.0E-5 |

1) USEPA(2002), Supplemental guidance for developing soil screening levels for Superfund sites: Appendix C

2) ASTM(2002), Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Site

3) MADEP(2002), Characterizing risks posed by petroleum contaminated sites: Implementation of the MADEP VPH/EPH approach

# 토양-물 분배계수($K_d$)

별지 6호의 10

| 물질 | | | $K_{oc}$ (L/kg) | $f_{oc}$ (%) | $K_d$ (L/kg or $cm^3/g$) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | pH 6.0 | pH 6.4 | pH 6.8 (기본값) | pH 7.2 | pH 7.6 |
| 카드뮴[1] | | | - | - | 3.7E+1 | 4.8E+1 | 7.5E+1 | 2.0E+2 | 8.7E+2 |
| 구리[3] | | | - | - | - | - | 2.2E+1 | - | - |
| 비소[1] | | | - | - | 2.7E+1 | 2.8E+1 | 2.9E+1 | 3.0E+1 | 3.1E+1 |
| 수은[1] | | | - | - | 3.5E+1 | 1.6E+1 | 5.2E+1 | 1.2E+2 | 1.7E+2 |
| 납[3] | | | - | - | - | - | 9.0E+2 | - | - |
| 6가크롬[1] | | | - | - | 2.3E+1 | 2.1E+1 | 1.9E+1 | 1.7E+1 | 1.5E+1 |
| 아연[1] | | | - | - | 3.6E+1 | 4.7E+1 | 6.2E+1 | 9.5E+1 | 1.9E+2 |
| 니켈[1] | | | - | - | 3.8E+1 | 4.7E+1 | 6.5E+1 | 1.4E+1 | 4.9E+2 |
| 불소[5] | | | - | - | 1.5E+2 (pH 6.7) | | | | |
| 벤젠[1] | | | 5.89E+1[1] | 0.016[4,7] 또는 부지특이적 측정값 사용 | 1.18E-1 | | | | |
| 에틸벤젠[1] | | | 3.63E+2[1] | | 7.26E-1 | | | | |
| 톨루엔[1] | | | 1.82E+2[1] | | 3.64E-1 | | | | |
| 크실렌[2] | | | 2.40E+2[2] | | 4.80E-1 | | | | |
| TPH | VPH | 지방족 $C_5$~$C_8$ | 2.27E+3[6] | | 4.54E+0 | | | | |
| | | 지방족 $C_9$~$C_{12}$ | 1.50E+5[6] | | 3.0E+2 | | | | |
| | | 방향족 $C_9$~$C_{10}$ | 1.78E+3[6] | | 3.56E+0 | | | | |
| | EPH | 지방족 $C_9$~$C_{18}$ | 6.80E+5[6] | | 1.36E+3 | | | | |
| | | 지방족 $C_{19}$~$C_{36}$ | - | | - | | | | |
| | | 지방족 $>C_{36}$~$C_{40}$ | - | | - | | | | |
| | | 방향족 $C_{11}$~$C_{22}$ | 5.00E+3[6] | | 1.00E+1 | | | | |

※ $f_{oc}$ 기본값 외에 평가대상부지의 부지특이적인 $f_{oc}$를 사용할 경우 사용한 분석방법 등 명확한 근거를 제시하여야 함


1) USEPA(2002), Supplemental guidance for developing soil screening levels for Superfund sites: Appendix C
2) Nebraska Department of Environmental Quality(2009), Risk-based corrective action (RBCA) at petroleum release sites
3) USEPA(2005), Partition Coefficients for Metals in Surface water, Soil, and Waste
4) 국립환경과학원(2010), 인체노출에 대한 토양분야 위해성평가
5) ORNL(1984), A Review and Analysis of Parameters for Assessing Transport of Environmentally Released Radionuclides through Agriculture


※ 유기물의 경우, $K_d = K_{oc} \times f_{oc}$

$K_{oc}$: soil organic carbon/water partition coefficient(L/kg)

$f_{oc}$: fraction organic carbon in soil(g/g)


6) MADEP(2002), Characterizing risks posed by petroleum contaminated sites: Implementation of the MADEP VPH/EPH approach
7) RIVM(2001), Technical evaluation of the Intervention Values for Soil/sediment and Groundwater

# 토지이용도별 노출 빈도(EF, days/year)

별지 6호의 11

| 노출 시나리오 | | | 토지이용도 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 주거/농업지역 | | 상·공업지역 | | 실외 활동지역 | | 기타지역 |
| 수용체 | | | 성인 | 어린이 | 실내근로자 | 실외근로자 | 성인 | 어린이 | 부지특이적 |
| 노출경로 | 섭취 | | 350[1] | 350[1] | 250[1] | 225[1] | 170[3] | 170[3] | 부지특이적 노출빈도 적용 |
| | 접촉 | | 350[1] | 350[1] | - | 225[1] | 170[3] | 170[3] | |
| | 흡입 | 실외[2] 비산먼지 | 2.18 hrs/day* 350 days/yr | 0.72 hrs/day** 350 days/yr | 8 hrs/day 225 days/yr | - | 1.34 hrs/day*** 170 days/yr | 2.13 hrs/day**** 170 days/yr | |
| | | 휘발물질 | 31.8 days/yr | 10.5 days/yr | - | 75.0 days/yr | 9.5 days/yr | 15.1 days/yr | |
| | 실내 휘발물질 | | 21.82 hrs/day 350 days/yr | 23.28 hrs/day 350 days/yr | 8 hrs/day 250 days/yr | - | - | - | |
| | | | 318.2 days/yr | 339.5 days/yr | 83.3 days/yr | - | - | - | |

※ 노출빈도 기본값 외에 평가대상부지의 부지특이적인 노출시나리오로 인해 다른 노출빈도를 사용할 경우 산정방법 등 명확한 근거를 제시하여야 함

1) USEPA RSLs(Regional Screening Levels, https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-users-guide)

2) 국립환경과학원(2019b), 한국인의 노출계수 핸드북

국립환경과학원(2019c), 한국 어린이의 노출계수 핸드북

* 성인의 실외환경 시간임

** 어린이 3~6세의 실외환경 시간임

*** 성인 주말·주중에 대한 교제 및 여가활동(종교 활동, 문화 및 관광 활동, 스포츠 및 레포츠, 기타 여가활동) 시간의 가중평균임

**** 어린이의 교제 및 여가활동(종교 활동, 관람 및 문화 행사 참여, 스포츠 및 레저 활동, 취미 및 그 외 여가관련 행동) 시간임

3) UK FA CLAIRR(2014), SP1010-Development of Category 4 Screening Levels for Assessment of Land Affected by Contamination

# 토지이용도별 노출 기간 (ED, years)

별지 6호의 12

| 노출 시나리오 | 토지이용도 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 주거/농업지역 | | 상·공업지역 | | 실외 활동지역 | | 기타지역 |
| | 발암 (어린이+성인) | 비발암 (어린이/성인) | 발암 (성인) | 비발암 (성인) | 발암 (어린이+성인) | 비발암 (어린이/성인) | 부지 특이적 |
| 노출기간 | 25[1] (6[2]+19[3]) | 어린이: 6[2] 성인: 25[1] | 25[4] | 25[4] | 25[1] (6[2]+19[3]) | 어린이: 6[2] 성인: 25[1] | 부지특이적 노출기간 적용 |

※ 노출기간 기본값 외에 평가대상부지의 부지특이적인 노출시나리오로 인해 다른 노출기간를 사용할 경우 산정방법 등 명확한 근거를 제시하여야 함

1) 국립환경과학원(2022), 토양오염물질 기준설정 및 관리방안 연구(2022);
2020 인구주택총조사 「거주기간별 가구(일반가구)-시군구」(KOSIS, 2020)를 가공하여 도출한 평균거주기간의 90백분위수임(참고: 환경부(2007), 한국노출계수핸드북)

2) USEPA(1991), Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual Supplemental Guidance "Standard Default Factors" Interim Final

3) 25년(한국 평균거주기간의 90백분위수) – 6년(어린이 ED)

4) USEPA(1991), Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual Supplemental Guidance "Standard Default Factors" Interim Final; US EPA(2002), Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites