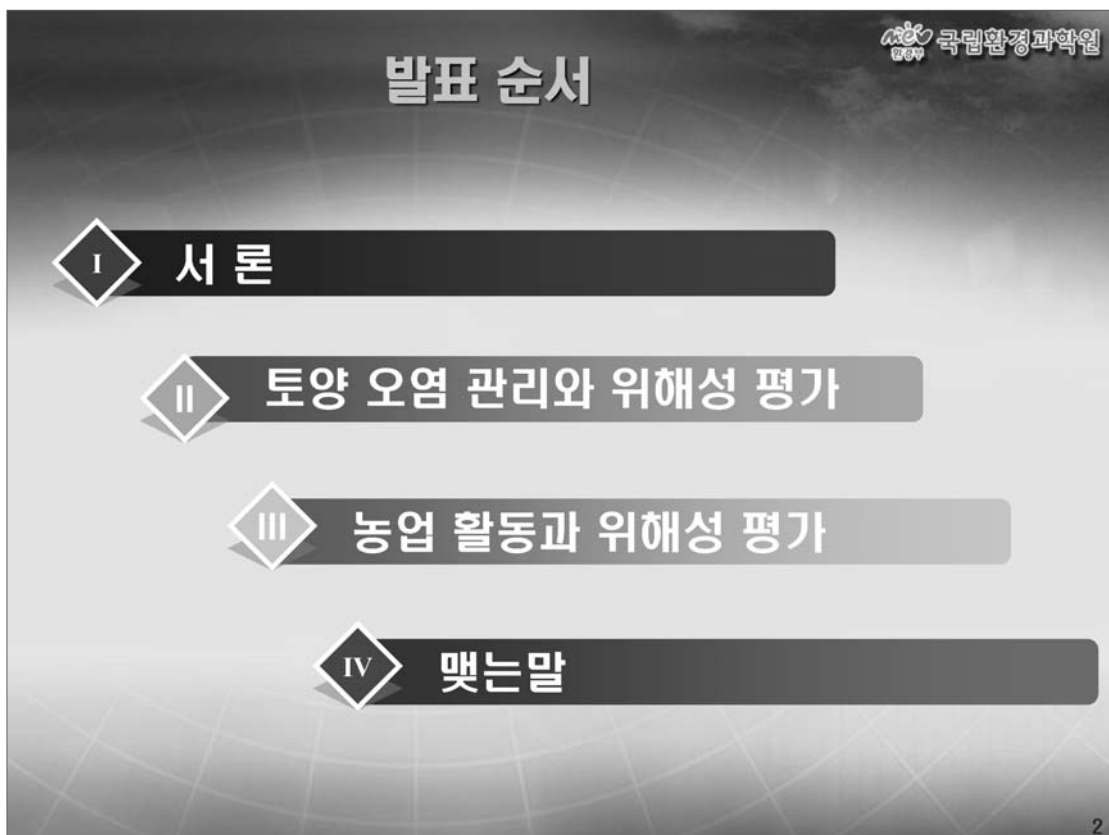


## 농산물 재배환경 중 환경 및 생태 위해성 평가 동향

김태승

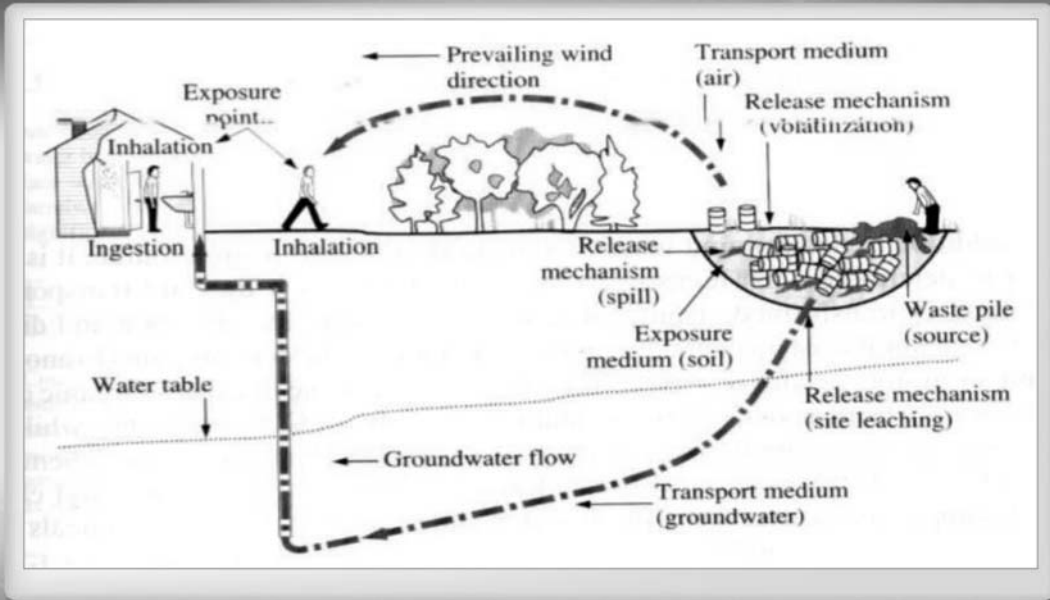
국립환경과학원

오염시키지 않고 건강하게 토양 생태계를 유지시키는 일은 쾌적하고 건강한 생활 환경을 조성함과 동시에 농업 생산성을 확보하는 데에도 매우 중요하다. 환경 분야에서 토양오염 관리는 오염물질이 자연적 상태보다 증가되지 않거나 비가역적 악영향을 미치지 않게 하는 것과 직·간접적으로 인체나 동·식물 또는 재산에 피해를 미치지 않게 하는 행위를 포함하고 있다. 이를 위해 일차적으로는 인체 및 생태 위해성을 고려하여 다양한 오염물질에 대한 오염기준과 정화 목표를 설정하고 있다. 대체적으로 이들 기준이나 목표를 정하기 위해 인체 및 생태 위해성 평가기법을 활용한다. 수용체가 사람인 경우 노출 경로는 오염토양의 직접 섭취, 비산 먼지의 흡입, 접촉에 의한 피부 흡수와 같은 직접적인 노출과 오염토양에 의한 지하수, 농산물, 오염지역 축산물 등 먹이사슬에 의한 간접적인 노출이 있다. 그간 이들 노출 경로에 대한 섭취 또는 전이율을 평가를 위해 많은 연구가 이루어져 왔으나 오염물질에 따라 관련 자료가 아직 제한적이다. 인체 위해성 평가의 경우, '80년대부터 시작된 미국 Superfund법에서 인체위해성 평가지침(RAGS)이 가장 완성도 있게 마련되면서 각국의 연구기관에서 Caltox, CLEA, C-soil 등 매우 다양한 위해성 평가 모델이 개발되었다. 우리나라의 경우 환경부에서는 '06년부터 토양오염위해성 평가 지침을 마련하였다. 또한 생태 위해성 평가의 경우, 유럽은 다양한 생물에 대한 PNEC값이 연구되어 왔으며, 미국의 경우 다양한 육상 및 수생동식물에 대한 생태독성자료인 ECOTOX DB를 확보하고 있다. 그러나 국내의 경우 아직 초보적인 수준이라 할 것이다. 또한 농산물 재배 환경과 관련된 위해성 평가는 농경지 오염에 따른 간접적인 노출로서 농·축산물 섭취나 농업활동에 따른 일부 직접 노출도 고려해 볼 수 있다. 위해성의 수준을 판단하는 방법은 평가 모델을 이용하여 예측하거나 이들 모델과 함께 오염지역의 실측 자료를 이용·보완하여 부지특이적 위해성 평가를 할 수 있다. 이와 관련하여 오염지역의 위해성 평가를 위해 다양한 조사와 연구들이 있어 왔다. 농경지 오염과 관련한 위해성 평가는 주로 중금속에 연구가 집중되어 있다. 국내의 경우 폐광산 지역 오염에 대한 농산물 오염과 주민 건강 피해에 대해 이슈가 된 바 있다. 일본의 경우 농경지에 대한 토양오염관리를 위해 별도의 규정을 운영하고 있다. 토양오염에 의한 농작물 영향에 대해서는 다양한 연구도 축적되어 왔다. 최근 자연 배경농도에 의한 농경지 토양오염 관리를 위해서도 관심이 높아지고 있다. 반면에 토양오염에 따른 생태위해성 평가에 대한 연구는 일부 연구가 진행되고 있으나 국가적으로 토양오염관리를 위해서는 아직 자료가 부족한 실정이다. 건강한 토양을 보전·관리하기 위해서는 토양오염에 따른 정확한 위해성의 평가기법의 개발이 필요하다. 또한 이를 위해서는 국가적으로 인체 및 생태 독성 근거와 노출량 산출 기법 등 위해성 평가를 위한 다양한 연구가 보다 확대되어야 할 것이다.



## I. 서론

### 토양오염과 인체위해성



3

### 위해성 평가와 관리



4



## II. 토양오염관리와 위해성 평가

### 각국의 토양오염 정의

국 가	오염토양 또는 토양오염의 정의
덴마크	지하수를 오염시킬 수 있거나 또는 사람의 건강을 위협할 수 있는 오염물질이 있는 토양
독일	유해한 토양 변질로 개인 또는 공중에 위험이나 현저한 불이익을 야기하는 토양 기능의 변화
네덜란드	토양에 존재하는 물질의 농도가 일반적인 농도보다 높으며 한가지 이상의 토양 기능에 비가역적인 영향을 주는 토양
영국	[이전 사용으로 향후 재개발 등 이용에 위해성이 있는 물질을 포함하고 있어 개발제한 또는 복원을 위한 위해성평가가 요구되는 토양]
일본	특정유해물질이 토양에 포함되어 사람의 건강과 관계된 피해를 일으킬 우려가 있는 상태
우리나라	사업활동, 기타 사람의 활동에 의해 토양이 오염되어 사람의 건강, 재산이나 환경에 피해를 주는 상태

7

### 각국의 토양오염기준 설정

국 가	관련법령	주요 구분 내용
미국연방정부	CERCLA section 105(8)B	<ul style="list-style-type: none"> <li>연방정부 차원의 토양질 기준 없음</li> <li>토양선별지침에 따른 토양선별기준(SSL)</li> <li>SSL 노출경로별로 구분하고 1차 정화목표치로 활용</li> </ul>
영 국	Environment Act Part II	<ul style="list-style-type: none"> <li>토양질 가이드라인값: 인체에 대한 만성적인 위해성 판단기준</li> </ul>
독 일	FSPA 제8조	<ul style="list-style-type: none"> <li>유인기준: 위해성에 대한 가능성 판단, 추가 정밀조사 여부 결정</li> <li>대책기준: 오염토양에 대한 직접적인 조치 필요</li> <li>우려기준: 토양의 위해성 변화가 우려되는 부지에 적용</li> </ul>
네덜란드	Soil Protection Act 제36 & 37조	<ul style="list-style-type: none"> <li>목표기준: 생태위해성을 고려한 배경농도 수준</li> <li>개입기준: 인체 및 생태위해성 기준으로 잠재적 위해성을 판단하기 위한 기준</li> </ul>
우리나라	토양환경보전법	<ul style="list-style-type: none"> <li>토양오염우려기준과 토양오염대책 기준</li> <li>1, 2, 3 지역 구분</li> </ul>

8

## 각국의 오염기준별 토지이용도

이용	대상국가/자치주	구분내용
구분 없음	네덜란드, 덴마크, 스웨덴	토지 이용 용도의 구분 없음(부지특성별 평가 별도 구분)
2구분	우리나라 (세분화 예정)	1지역 : 주거지, 농경지, 놀이터 등 2지역 : 임야, 유원지 등 3지역 : 공장, 도로, 잡종지 등
3구분	미국연방정부	I주거지역, II비주거지역(상업/산업), III공사현장
	미국 뉴저지주	I주거지역, II비주거지역, III지하수보호지역
	영국	I정원이 있는 주거지, 없는 주거지, II경작지, III상업 및 산업지역
4구분	독일 (토양-인체 접촉)	I놀이터, II주거지, III공원/휴양시설부지, IV산업/상업부지(지하수 및 농작물 이동경로 기준 별도 운영)
	캐나다	I경작지, II주거지/공원, III상업부지, V산업부지
5구분	호주	I작물재배 주거지 3분류, II공원/휴양시설지역 및 놀이터, III산업/산업부지
9구분	미국 매사추세츠주	II1.5. 토양이용 용도 3구분 x 지하수 이용용도 3 구분

9

## 우리나라 토양오염 기준

오염물질	토양오염우려기준			토양오염대책기준		
	1지역	2지역	3지역	1지역	2지역	3지역
Cd	4	10	60	12	30	180
Cu	150	500	2000	450	1500	6000
As	25	50	200	75	150	600
Hg	4	10	20	12	30	60
Pb	200	400	700	600	1200	2100
Cr(VI)	5	15	40	15	45	120
Zn	300	600	2000	900	1800	5000
Ni	100	200	500	300	600	1500
F	400	400	800	800	800	2,000
유기인	10	10	30	-	-	-
PCBs	1	4	12	3	12	36
CN-	2	2	120	5	5	300
Phenols	4	4	20	10	10	50
Benzene	1	1	3	3	3	9
Toluene	20	20	60	60	60	180
Ethylbenzene	50	50	340	150	150	1020
Xylene	15	15	45	45	45	135
TPH	500	800	2,000	2000	2400	6000
TCE	8	8	40	24	24	120
PCE	4	4	25	12	12	75
B(a)P	0.7	2	7	2	6	21

· 2009년 토지이용도 확대 및 전함량 기준 설정(환경부)

10

## 토양오염관리와 위해성 평가 활용

- 토양오염기준 등 설정에 활용 : Generic risk assessment
  - 미국 : NPL 설정을 위한 토양스크린수준(SSL) 평가
  - 영국 : 토양오염 권고치를 제시를 위한 인체 위해성 CLEA 모델 사용
  - 네덜란드 : 기준 설정을 위한 인체 및 생태 위해성 평가 모델 적용
  - 일본 : 토양섭취 위해성 평가 등에 사용
- 오염부지 위해성 평가 : Site-specific risk assessment
  - 오염부지 평가를 위한 다양한 모델 제시
    - ASTM-RBCA, Caltox, 지역별 모델 다양
  - 기준과 별도로 노출경로 선택에 따른 정화 목표 설정
  - 한국 : 위해성 평가 지침 마련(2006)

11

## 우리나라 토양오염물질 위해성평가 지침 운영

- 토양환경보전법 제15조의5(오염물질의 위해성평가) 신설(2004)
 

오염원인자 정화가 곤란, 시·도지사 또는 시장·군수·구청장 정화시  
위해성의 정도를 평가하여 정화의 범위 및 시기 조정
- 토양오염 위해성평가지침 제정(2006)
 

토양오염 위해성평가의 절차, 내용 및 방법에 관한 구체적인 사항을 정함
- 토양환경보전법 및 위해성평가지침 개정(2011)
  - 토양오염 위해성평가 주체(환경부장관) 및 국유지 등 대상 오염부지 확대  
위해성평가결과를 정화범위, 시기 및 수준까지 반영
  - [지침개정]
    - ✓ 평가항목, 수용체 및 노출경로 등을 검토하기 위한 위해성평가 계획서 작성
    - ✓ 위해성평가서 공람 등 주민의견수렴 절차 마련
    - ✓ 발암위해도 범위( $10^{-5}$ ~ $10^{-6}$ )의 명확화
    - ✓ 위해성평가서의 기술적 검토, 검증위원회의 구성·운영 등에 대한 사항 추가
    - ✓ 위해성평가로 오염토양 정화시기 등 조정시 사후모니터링으로 주기적인 관리

12

## 주요 토양오염 노출경로

노출경로	내 용
토양섭취	어린이들이 비의도적 또는 의도적으로 섭취
먼지섭취	토양을 포함하고 있는 집안 먼지 비의도적인 섭취
오염된 음식물의 섭취	집에서 재배한 채소(작물)의 섭취
오염된 식수의 음용	오염된 지하수의 음용
토양입자의 흡입	오염지역의 복원시 발생하는 오염된 먼지의 흡입
토양기체의 흡입	토양에서 발생하는 기화기체의 흡입
토양의 피부접촉	오염지역의 복원시 오염된 토양과의 접촉
먼지의 피부접촉	먼지를 포함하고 있는 토양과의 접촉
오염된 물의 피부접촉	오염된 물을 이용한 세수, 세면, 목욕시 오염물질과의 접촉
Ref : Kibble and Saunders(2001)	

13

## 토양 섭취량 비교

모델명	토양섭취량 [mg/day]	폭로기간 [day/year]	연평균 토양 섭취량[mg/day]
CLEA	60	365	60
CalTOX	10	365	10
	50	365	50
UMS	30	190	16
CSOIL	50	365	50

14



## 위해성 평가모델별 노출경로 비교 (직접노출)

Exposure route	EUSES	CSOIL	CLEA <sub>1)</sub>	UMS <sub>2)</sub>	CalTOX <sub>3)</sub>
<i>Indirect exposure</i>					
Consumption of (home-grown) crops	+	+	+	+	+
Consumption of soil attached to crops	-	-	+	-	-
Consumption of contaminants via drinking water	+	+	+	+	+
Ingestion of contaminants via bathing water	-	-	-	+	+
Inhalation of vapours from drinking water from shower	-	+	+	-	+
Dermal contact with drinking water from shower/bath	-	+	+	-	+
Dermal contact with contaminants via bathing water	-	-	-	-	+
Consumption of contaminants via consumption of fish	+	-	-	+	+
Consumption of contaminants via consumption of milk	+	-	-	-	+
Consumption of contaminants via consumption of meat	+	-	-	-	+
Consumption of contaminants via mothers' milk	-	-	-	-	+

· RIVM, 2001

15

## 위해성 평가모델별 노출경로 비교 (간접노출)

Exposure route	EUSES	CSOIL	CLEA <sub>1)</sub>	UMS <sub>2)</sub>	CalTOX <sub>3)</sub>
Ingestion of contaminated soil particles (outdoor)	-	+	+	+	+
Ingestion of contaminated soil particles / dust (indoor)	-	+	+	+	-
Dermal contact with soil contaminants (outdoor)	-	+	+	+	+
Dermal contact with soil contaminants / dust (indoor)	-	+	+	-	-
Inhalation of contaminated soil particles / dust (outdoor)	-	+	+	+	+
Inhalation of contaminated soil particles / dust (indoor)	-	+	+	+	+
Inhalation of vapours from contaminants (outdoor)	+	+	+	-	+
Inhalation of vapours from contaminants (indoor)	-	+	+	+	+

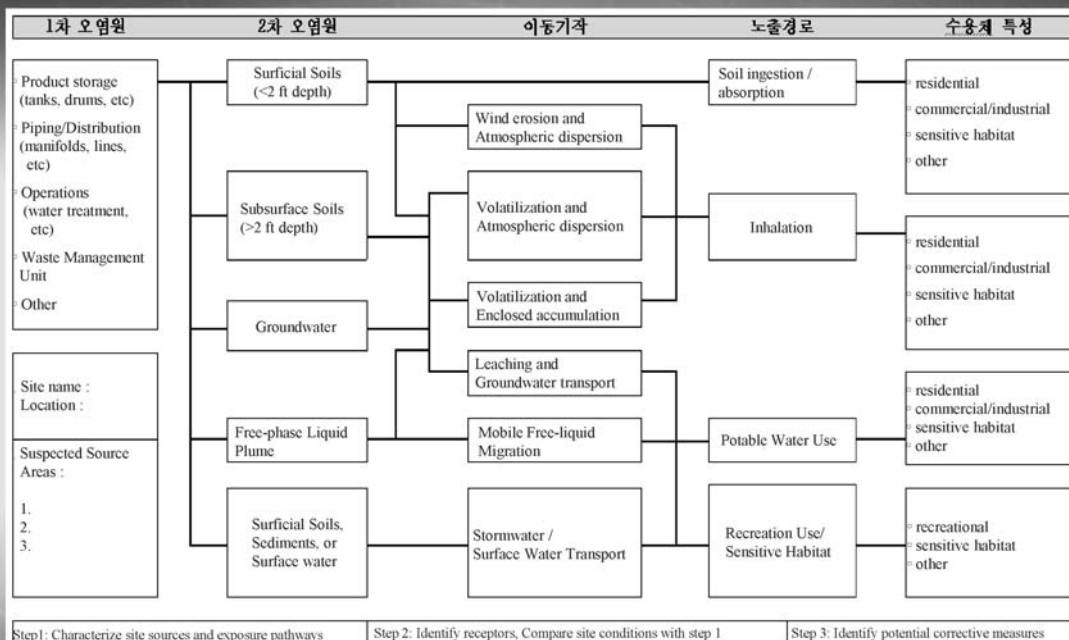
16

## 미국 Soil Screening Level(SSL) 노출 경로

- ◆ 주거지 : 토양섭취, 실외비산먼지 흡입, 실외휘발물질 흡입, 오염지하수섭취, 피부흡수, 실내휘발물질 흡입
- ◆ 상업/산업부지
  - 표토경로 : 토양섭취, 피부흡수, 비산먼지흡입
  - 심토경로 : 실내 휘발물질흡입, 실외 휘발물질흡입, 오염지하수섭취
- ◆ 공사현장 : 공사현장 근로자 및 주변 주거민
  - 토양섭취, 피부흡수, 실외 휘발물질흡입, 비산먼지흡입
  - 공사장 주변 거주민: 비산먼지흡입

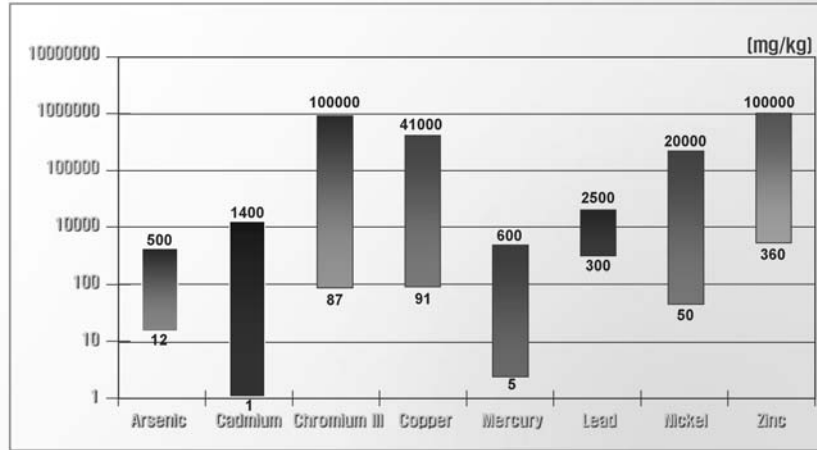
17

## 미국 ASTM-RBCA



18

## 각국의 토양 중금속 오염기준 비교



- 일차적으로 오염토양 스크린에 활용
- 일부 오염토양 정화 여부 판단 및 정화 목표로 활용
- 토양오염평가 가이드라인으로 활용 등

19

## III. 농업활동과 위해성 평가

### 농업활동 관련 위해성 평가 노출경로

Exposure route	EUSES	CSOIL	CLEA 1)	UMS 2)	CalTOX 3)
<i>Indirect exposure</i>					
Consumption of (home-grown) crops	+	+	+	+	+
Consumption of soil attached to crops	-	-	+	-	-
Consumption of contaminants via consumption of milk	+	-	-	-	+
Consumption of contaminants via consumption of meat	+	-	-	-	+
Consumption of contaminants via mothers' milk	-	-	-	-	+

20

## 각국의 농업활동 관련 노출경로 적용

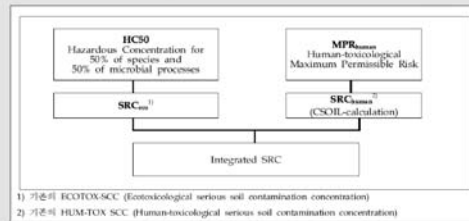
영국 : Soil Guidance Value(SGV), UK EA 2009



- 섭취(토양, 실내먼지), 소비(주거경작물 등), 접촉(토양, 실내먼지), 흡입(실내외 먼지 및 휘발물질)

네덜란드 : CSOIL 모델(인체), RIVM 2001

섭취 : 토양 및 분진, 오염농작물, 음용수 섭취  
접촉 : 피부 접촉, 목욕 접촉  
흡입 : 토양 흡입, 실내외 공기 흡입, 목욕 흡입,



1) 기존의 ECOTOX SCC (Ecotoxicological serious soil contamination concentration)  
2) 기존의 HUM-TOX SCC (Human-toxicological serious soil contamination concentration)

<생태 위해성 통합 적용>

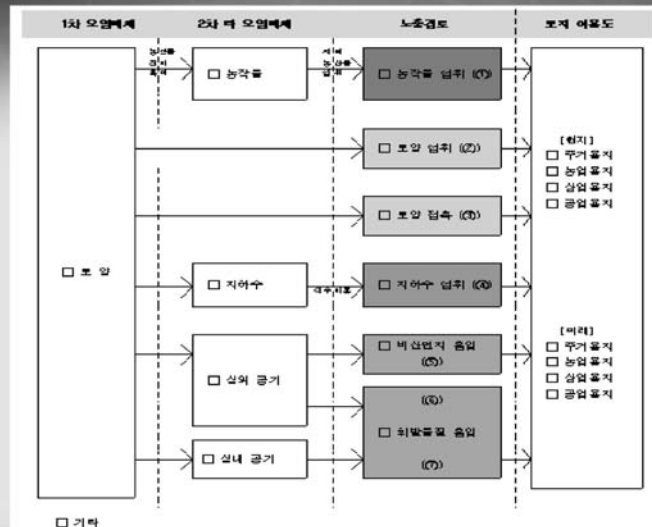
일본 : 용출 음용가능성, 및 토양섭취, 환경성

토양오염기준에 농산물 관점 섭취 경로 미반영

- 농경지의 토양오염방지에 관한 법률 별도 운영 : 작물피해 및 건강피해 방지(Cd, Cu, As)

21

## 우리나라 토양위해성 평가 지침 중 노출경로



<기 계 요 평>

(1) □ 해당항목을 체크

(2) 노출경로 : ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥ 중에서 용지의 노출평가 결과에 따라 선택

(3) 기타: 2차 오염원 육류나 토양의 섭취, 건설 노동자의 굴삭 시 지하수 접촉, 휘발성 물질 흡입, 생활용수 사용에 의한 지하수 접촉, 지하수 유래 휘발성 물질 흡입 등을 추가할 수 있다.

22

## 토양중 중금속 노출기여도(예시)

항 목	노출 기여도		
	토양섭취	호 흡	농작물
As	71%	< 1%	28%
Cd	7%	< 1%	93%
Cr(VI)	67%	< 1%	32%
Cu	10%	< 1%	90%
Pb	57%	< 1%	42%
Hg	13%	< 1%	87%
Ni	45%	< 1%	55%
Zn	11%	< 1%	89%

· RIVM, 2001

23

## 토양중 유기물 노출기여도(예시)

항 목	노출 기여도		
	토양섭취	호 흡	농작물
Benzene	<1%	97%	1%
Ethylbenzene	<1%[0.1%]	96%[25.6%]	1%[74.3%]
Toluene	<1%[0.1%]	97%[84.3%]	1%[15.6%]
Xylene	<1%	94-95%	2-3%
TCE	<1%	98%	1%
PCE	<1%	99%	1%
PCBs	2 ~ 23%	5 ~ <1%	74 ~ 98%

· RIVM, 2001

24

## 정화목표치 산정 [예시]

주거/농업용지 발암위해도 산정시, 어린이가 어른이 될 때까지 거주한다는 가정 적용

□ 농작물+토양 섭취 경로(①②)

○ 인체 노출량

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

○ 초과발암위해도

$$ECR = SF_0 \times ADD$$

○ 위험비율(비발암위해도)

$$HQ = \frac{ADD}{RfD_0}$$

성인 vs. 어린이 중 최소값 적용

□ 토양접촉 경로(③)

○ 인체 노출량

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

○ 초과발암위해도

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

○ 위험비율(비발암위해도)

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

○ 발암 정화목표치

$$C_0 = \left[ \frac{TR \times BW \times AT}{SF_0 \times (BCF \times CR_p \times ABS_{dt} + CR_s \times ABS_{dt} \times CF_1) \times EF \times ED} \right] + BGC$$

○ 비발암 정화목표치

$$C_0 = \left[ \frac{THQ \times RfD_0 \times BW \times AT}{(BCF \times CR_p \times ABS_{dt} + CR_s \times ABS_{dt} \times CF_1) \times EF \times ED} \right] + BGC$$

○ 발암 정화목표치

$$C_0 = \left[ \frac{TR \times BW \times AT}{SF_{ab} \times (AF \times ABS_p \times CF_1) \times Sae \times EF \times ED} \right] + BGC$$

○ 비발암 정화목표치

$$C_0 = \left[ \frac{THQ \times RfD_{ab} \times BW \times AT}{(AF \times ABS_p \times CF_1) \times Sae \times EF \times ED} \right] + BGC$$

국내 토양 중 자연배경농도 고려

25

## 각국의 토양 생태위해성 평가 운영 현황

영국(EA)

- 생태위해성평가로 정책용 환경위해수준(ERL)을 산출, 환경기준으로 설정
- 인체 및 생태위해성 평가치를 비교, 더 민감한 값을 목표기준 및 개입기준으로 적용

캐나다(CCME)

- 토양질가이드라인(SQG<sub>p</sub>)으로 인체 및 생태 위해성평가 수용체에 대한 가이드라인 수치를 비교하여 낮은 값을 최종 토양질 가이드라인 설정
- 토지이용도(농업, 주거/공원지역, 상업, 공업지역)에 따라 노출경로가 상이함을 반영하여 평가대상 수용체를 달리하고 있음

미국(US EPA)

- Eco-SSL: 토양에 거주하나 토양을 섭취하는 생태 수용체 보호를 위한 위해성기반의 guidance
- screening level의 위해성을 산출하기 위해 superfund ERA과정의 2단계에서 사용

네덜란드(RIVM)

- 오염물질과 생태계 수용체간 연관성과 생태계 유해성을 고려 3단계로 위해성평가를 수행
- 1단계: 스크리닝
- 2단계: 생태조사 및 bioassay
- 3단계: 오염물질의 유해성 결정

호주(NEPC)

- 생태와 인체 위해성평가를 포함한 가이드라인 마련
- 자국의 서식 생물종을 보호, 토지이용도를 기반으로 보호수준을 설정, 배경오염물질 농도 고려, 토양특성 및 오염물질의 생물이용성 변화, 생물대상 확대를 고려

유럽화학물질국(ECB)

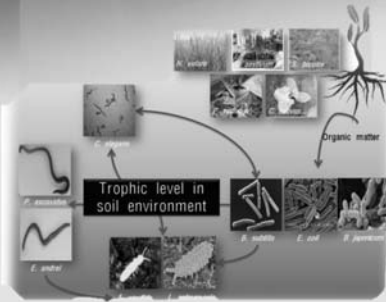
- 위해성평가를 위한 지침으로 'TGD'를 발간
- 생태위해성평가 단계 및 평가를 위한 자료요건, 방법 등 제시

&lt;안윤주, 2012&gt;

26

## 국내 토양 생태위해성 평가 도입방안

국내 영양단계별 대표종 선정



국내 토양특성 대표인자 도출



독성평가 표준화



- 국내 토양생태위해성 평가기법 마련

· 농업활동과 토양위해성 평가 연계 가능성

<안윤주, 2012>

27

## IV. 맺는말

- 토양환경보전을 위한 위해성 평가기법 적용 확대
- 토양오염물질의 다매체 거동 및 노출평가 기초자료 확보
- 국내 농업 활동과 연계한 위해성 평가 인자 자료 확보
- 향후 생태계 보호 등 토양기능과 연계한 토양 위해성 관리 제도 고도화 필요

28