

선진국의 토양위해성평가 모델 비교분석 연구

안윤주^{1*} · 백용욱¹ · 이우미¹ · 정승우² · 김태승³

¹건국대학교 환경과학과, ²군산대학교 토목환경공학부, ³국립환경과학원 토양지하수연구과

Comparative Study of Soil Risk Assessment Models used in Developed Countries

Youn-Joo An^{1*} · Yong-Wook Baek¹ · Woo-Mi Lee¹ · Seung-Woo Jeong² · Tae-Seung Kim³

¹Department of Environmental Science, Konkuk University

²School of Civil and Environmental Engineering, Kunsan National University

³Soil and Groundwater Divison, National Institute of Environmental Research

ABSTRACT

Soil risk assessment models were used to determine the goals of soil remediation and to establish the soil quality standards in developed countries. Recently, Korean Ministry of Environment prepared the guideline for soil risk assessment. Soil risk assessment model applicable to Korean situation will be needed in the near future. In this study, three models for soil risk assessment were extensively compared to suggest the fundamental components that required for the soil risk assessment in Korea. The models considered in this study were CalTOX in the United States, CLEA (Contaminated Land Exposure Assessment) in the United Kingdom, and CSOIL in the Netherlands. The major exposure routes and the intake estimation equations suitable for Korean situation were suggested. The exposure routes suggested were intake of the crops, underground water, indoor/outdoor soil ingestion, dust inhalation and a volatile matter inhalation. The equations for intake estimation used in CalTOX and CSOIL seem to be applicable for the calculation of the human intake in Korea.

Key words : Soil pollution, Risk assessment model, CalTOX, CLEA, CSOIL

요 약 문

우리나라는 최근에 토양위해성평가 지침을 마련하였으며, 앞으로 토양위해성모델 개발에 대한 필요성이 대두되고 있다. 선진국에서는 자국 내 부지특성과 노출경로를 고려한 토양위해성평가 모델을 토양정책 전반에 활용하고 있다. 본 연구에서는 선진국에서 위해성평가에 이용되는 대표적인 오염토양 위해성평가 모델을 비교분석하였다. 연구대상이 된 모델은 미국, 영국, 네덜란드에서 사용하고 있는 CalTOX, CLEA, CSOIL로서, 노출경로, 토지이용도 그리고 노출량 산정식을 중심으로 비교분석하였다. 모델 검토시 우선적으로 비교 분석된 항목은 노출시나리오, 노출경로, 입력변수의 공통사항이며, 이러한 분석결과를 토대로 선진국의 토양위해성 모델들이 공통적으로 포함하고 있는 노출경로를 추출하여, 국내에 적용 가능한 토양 위해성평가 모델개발의 기초자료로 제안하였다. 인체노출량 산정식에서는 일반적으로 미국식 방법이 국내 상황에서 사용이 용이한 것으로 판단되며, 비산먼지나 휘발물질 흡입의 경우는 네덜란드 식이 기본값이 제공되어 있으므로 사용하기가 편리할 것으로 판단된다.

주제어 : 토양오염, 위해성평가모델, CalTOX, CLEA, CSOIL

*Corresponding author : anyjoo@konkuk.ac.kr

원고접수일 : 2007. 1. 14 게재승인일 : 2007. 1. 22

질의 및 토의 : 2007. 4. 30 까지

1. 서 론

토양오염의 특성상 유기오염물질이나 중금속에 의한 토양오염물질은 최초로 노출이 일어난 토양에 장기간 잔류하거나 지하수, 지표수, 대기 등 2차 매체를 통해 직·간접적으로 인체나 생태계에 노출됨으로써 지속적인 위해성(Risk) 문제를 유발시킬 수 있다. 토양 매체는 다른 환경매체와 달리 이질적인 환경을 가지고 있으므로 정확화하는데 기술적으로 어려움이 있고, 경제적으로 막대한 예산이 요구되기 때문에 위해성에 기반을 둔 합리적인 정확화목표 설정이 요구된다. 미국, 유럽 등 선진국에서는 부지특성을 고려한 정확화목표를 설정하기 위해 오염특성 조사를 포함한 위해성평가 절차가 마련되어 있으며, 평가결과에 기초한 정확화계획이 수립되고 있다. 구체적으로는 자국 내 부지특성과 노출경로를 고려한 토양위해성평가(Soil risk assessment) 모델을 개발하여 오염토양의 효과적인 정확화를 위해 활용하고 있다.

최근 환경부는 토양환경보전법 개정(2004. 12. 31)과 함께 토양환경보전법 제15조의 5항, 위해성 평가제도의 도입에 따라 오염토양의 위해성평가를 실시하기 위한 「토양오염 위해성평가 지침」을 마련하여 평가의 절차, 내용 및 방법에 관한 구체적인 사항을 제시하였다. 이 지침은 토양오염지역에서 대상물질을 선정하고 오염도 및 분포를 확인하여 위해도를 결정할 수 있도록 각 절차에 필요한 구체적 구성인자 등을 포함하고 있으며 지자체가 토양정화사업 및 오염토양개선사업을 추진할 때 적용할 수 있도록 활용될 예정이다. 장기적으로 우리나라는 이러한 지침을 출발점으로 하여, 선진국처럼 오염토양 위해성평가 모델을 개발해야 할 필요성이 있으며, 이런 모델은 국내 오염토양의 정확화와 위해성기반 환경기준 설정에 활용될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 선진국의 토양위해성평가 현황을 조사하고, 토양정착수립에 활용되고 있는 토양위해성 평가모델에 대해서 심층적인 비교분석 연구를 수행하였다. 대상모델로는 토양 내 오염물질의 농도와 오염물질로 인한 인체 위해성 산정을 위해 개발된 미국의 CalTOX모델, 영국의 토양위해성평가 모델로 DERFA(The Department for Environment, Food and Rural Affairs)와 EA(Environment Agency)에 의해 개발된 CLEA(Contaminated Land Exposure Assessment)모델, 그리고 오염물질의 인체 및 생태계의 잠재위해성에 근거한 개입기준을 설정하는 네덜란드 CSOIL모델을 선정하였다. 본 연구에서는 선정된 모델에서 사용된 노출시나리오(Exposure scenario), 노출경로(Exposure routes), 입력변수들을 심층적으로 고찰하여, 이

들 모델이 공통적으로 포함하고 있는 노출경로를 추출하는 한편 각각의 모델에서 인체노출량을 산정하는 수식을 비교분석하였다.

2. 선진국의 토양위해성평가 기법

2.1. 미국 CalTOX Model

CalTOX모델은 California EPA에 의해 개발된 토양위해성 평가모델이다. CalTOX 모델은 (1) 매체별 물질분포를 계산하는 환경다매체 거동모델과 (2) 오염물질의 매체 내 농도와 노출인자를 이용하여 인체노출량과 위해도를 계산하는 다중경로 노출모델로 구성되어 있다. CalTOX모

Table 1. Exposure pathway of CalTOX Model

No.	Group	Exposure pathway
1		All inhalation exposures indoors active
2		All inhalation exposures indoors resting
3		Inhalation exposure in shower/bath
4	Inhalation	Inhalation exposures outdoors active
5		Inhalation of air particles indoors
6		Transfer of soil dust to indoor air
7		Transfer of soil vapors to indoor air
8		On-site inhalation by animals
9		Use of ground water as tap water
10	Tap Water	Use of surface water as tap water
11		Ingestion of tap water
12	Irrigation	Use of ground water for irrigation
13		Use of surface water for irrigation
14	Feeding animal	Use of ground water for feeding animals
15		Use of surface water for feeding animals
16	Transfer	Contaminant transfer, air to plants surfaces
17		Contaminant. transfer, grnd. soil to plant surfaces
18		Contaminant. transfer, root soil to plant tissues
19		On-site grazing of animals
20	Ingestion	Ingestion of home-grown exposed produce
21		Ingestion of home-grown unexposed produce
22		Ingestion of home-grown meat
23		Ingestion of home-grown milk
24		Ingestion of home-grown eggs
25		Ingestion of locally caught fish
26		Direct soil ingestion
27		Soil contact	Soil contact exposure at home or at work
28	Soil contact	Dermal exposure during shower/bath
29		Dermal & ingestion exposures while swimming
30	Breast milk	Breast-milk ingestion by infants

텔은 Monte-Carlo Simulation의 수행을 통한 확률위해성 평가(Probabilistic Risk Assessment; PRA)를 수행할 것이며, 이와 함께 민감도 분석과 불확실성 분석을 함께 수

행할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 즉 CalTOX는 노출에 대한 개념모델을 수립한 후, 환경매체내의 농도에 근거한 노출매체내의 농도분포 및 각각의 노출경로를 통한

Table 2. Health Criteria Values (HCV) of The United Kingdom.

Chem	HCV	ID _{oral} ¹	ID _{inh} ²	Ingestion				Inhalation				Remark
				TDI _{oral} ³	MDI ⁴	TDSI ⁵ for an adult	TDSI ⁵ for a six year-old child	TDI _{inh}	MDI	TDSI for an adult	TDSI for a six year-old child	
Cd	.		0.001	1	16	0.77	0.5	.	.	.	.	6, 7
Cu	NR
As	0.3		0.002	.	.	.	.	.	.	.	.	7
Hg	.		.	0.3	2.5	0.26	0.22	0.3	.	.	.	6
Pb	NR
Cr	.		0.001	3	13	2.8	2.6	.	.	.	.	6, 7
Zn	NR
Ni	.		.	5	160	2.7	1.0	.	.	.	.	6
Benzene	0.29		0.91	.	.	.	.	.	.	.	.	7
Toluene	.		.	200	10	200	200	74	124	72	71	6
Ethylbenzene	.		.	100	5	100	100	170	130	170	170	6
Xylene	.		.	179	20	179	178	63	112	61	60	6

1. ID_{oral}: Index Doses derived from oral ($\mu\text{g kg}^{-1} \text{ bw day}^{-1}$)
2. ID_{inh}: Index Doses derived from inhalation ($\mu\text{g kg}^{-1} \text{ bw day}^{-1}$)
3. TDI_{oral}: oral Tolerable Daily Intake ($\mu\text{g kg}^{-1} \text{ bw day}^{-1}$)
4. MDI: Mean Daily Intake ($\mu\text{g day}^{-1}$)
5. TDSI: Tolerable Daily Soil Intake ($\mu\text{g kg}^{-1} \text{ bw day}^{-1}$)e)
6. Threshold
7. Not threshold

Table 3. The Soil Guidance values estimated by The CLEA Model.

Chemical	Land Use	Residential (mg/kg)						Allotments (mg/kg)			Commercial/ industrial (mg/kg)		
		With plant uptake			Without plant uptake			pH6	pH7	pH8	pH6	pH7	pH8
	pH6	pH7	pH8										
Cadmium		1	2	8			30	1	2	8			1,400
Copper													
Arsenic			20				20		20				500
Inorganic Mercury			8				8		15				480
Lead			450				450		750				750
Chromium			130				200		130				5,000
Zinc													
Nicel			50				75		50				5,000
Toluene	1% SOM	2.5% SOM	5% SOM	1% SOM	2.5% SOM	5% SOM	1% SOM	2.5% SOM	5% SOM	1% SOM	2.5% SOM	5% SOM	
	3	7	13	3	8	15	31	73	140	150	350	680	
Ethylbenzene	1% SOM	2.5% SOM	5% SOM	1% SOM	2.5% SOM	5% SOM	1% SOM	2.5% SOM	5% SOM	1% SOM	2.5% SOM	5% SOM	
	9	21	41	16	41	80	18	43	85				45,000

노출인자 분포를 입력변수로 사용하여 노출분포 및 위해도분포를 계산할 수 있다.

CalTOX 모델은 총 3개의 구성성분으로 구축되어 있다. 첫째, 다매체 이동 및 변환 모델, 둘째, 노출 시나리오 모델, 그리고 결과의 가변성과 불확실성을 측정하는 구성성분이다. CalTOX의 다매체 이동 및 변환 모델은 시간에 따른 오염물질의 농도를 계산할 수 있는 동적모델로 위해도를 판별하며, 토양오염 발생의 최초 매체가 토양인 경우와 토양은 최초에 오염되지 않았으나 다른 매체로부터의 지속적인 배출로 인해 시간이 지남에 따라 토양이 오염되는 경우로 나누어진다. 이러한 CalTOX의 오염경로 세분화는 대기, 지하수, 식물잎, 식물잎 표면, Root-zone soil, Root-zone 아래의 불포화토양층, 지표수, 퇴적물, 총 8개로 구성되어 있다.

CalTOX의 노출모델은 오염원과 연결된 집단 내에서의 평균일일노출량(Average Daily Dose; ADD)을 산정하며, 노출경로를 8개의 그룹으로 나누고 있다. 여기에는 (1) 흡입, (2) 수돗물 섭취, (3) 관개용수, (4) 축산용수, (5) 매체간 전이, (6) 식품섭취, (7) 토양접촉, (8) 모유섭취가 있고, 다시 세밀하게 30개의 노출경로로 구분하여(Table 1), 사용자가 노출시나리오에 따라 노출경로를 개별적으로 선택할 수 있도록 구성되어 있다.

2.2. 영국 CLEA Model

영국은 산업 활동의 부산물로 약 30만 헥타르의 오염토양부지가 존재하는 것으로 추정되고 있다. 영국은 1980년대에 토양오염물질에 대한 유인농도(Trigger Concentration)를 제안한 선도적인 국가 중 하나로, 1992년 조직된 DEFRA에서 오염부지로 인한 인체 위해성을 평가하기 위한 과학적 기틀을 마련하기 위하여 연구를 시작하였다. 이 연구의 첫 결과물로서 DEFRA와 EA는 토양오염에 의한 인체위해성을 평가하는 과학적 기틀을 제공하는 4개의 주요 보고서(CLR 7, 8, 9 and 10)와 개별 토양오염물질에 대한 건강 준거치(Health Criteria Values; HCV) (TOX reports), 그리고 토양지침값(Soil Guideline Value; SGV)을 발간하였다. 이 보고서는 위해성평가를 위한 일관적인 접근방법을 제공함으로써, 인체위해성을 유발하는 오염부지를 신속하게 색출할 수 있도록 제시한다. 그러나 인체를 제외한 다른 수용체(동물, 식물, 빌딩, 지하수, 지표수 등)에 대한 위해성은 고려하지 않는다. 건강준거치는 인체건강을 보호하기 위해 제시된 값으로, CLR, TOX reports 'Contaminants in soil: Collation of toxicological data and intake values for humans'에 제시되어 있다.

Table 4. Exposure pathway of CLEA Model.

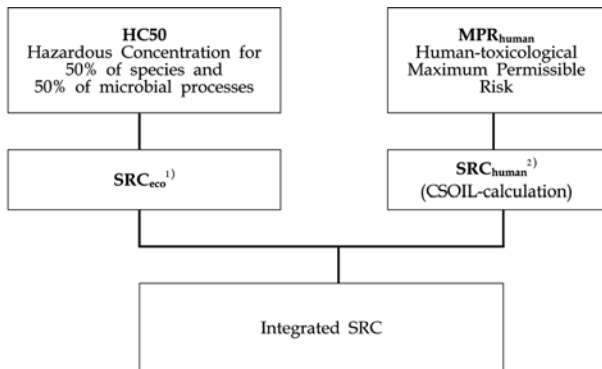
No.	Group	Exposure pathway
1	Ingestion	Direct soil ingestion
2		Direct soil derived indoor dust ingestion
3		Consumption of site-grown vegetables
4		Indigest soil ingestion site-grown vegetables
5	Contact	Skin contact with soil-derived indoor dust
6		Skin contact with soil
7	Inhalation	Inhalation of soil-derived indoor dust
8		Inhalation of soil-derived outdoor dust
9		Inhalation of soil vapours indoors
10		Inhalation of soil vapours outdoors

건강 준거치는 토양지침값을 산정하는데 사용되며, 토양오염물질별 건강준거치는 Table 2에서 정리하였다.

토양지침값은 개입기준(Intervention values)이며, 오염물질의 농도가 SGV에서 제시한 수치를 초과하면 대상 토양의 잠재적인 인체위해성이 존재함을 나타내며, 토양복원의 필요성을 시사한다. 토양지침값은 CLEA 모델을 이용하여 3가지 표준 토지이용도(주거지, 작업장, 상업/공장부지)에 따라 산출되었다. 한편 토양지침값은 장기노출만 고려하므로, 작업장 근로자의 인체위해도를 산정하는데는 사용할 수 없다. CLEA 모델에 의해 산출된 중금속과 유류의 토양지침값은 Table 3에 제시되어 있다. 한편 CLEA의 노출경로는 토지이용도에 의존하며, 일반적인 섭취, 피부접촉, 흡입을 통한 대부분류를 제시하였으며, 다시 세밀하게 10개의 노출경로로 구분되어 있다(Table 4).

2.3. 네덜란드 CSOIL Model

네덜란드 내 토양오염은 심각한 수준으로 알려져 있으며, 약 6만개소의 토양에서 토양복원이 필요한 것으로 추정하고 있다. 네덜란드 정부의 토양정책은 비오염 토양에 대한 오염방지와, 이미 심각하게 오염된 토양의 복원에 우선순위를 두고 있다. 네덜란드는 개입기준(Intervention value)과 목표기준(Target values)을 설정하고 있는데, 개입기준은 심각한 오염으로 토양기능이 저하된 경우로 인체 및 생태위해성이 우려되는 일반토양질기준이며, 목표기준은 위해성이 없는 토양 질을 유지하는 농도에 해당된다. 네덜란드에서는 1991년부터 CSOIL을 사용하여 오염물질의 인체 및 생태계의 잠재위해성을 근거로 하여 개입기준을 마련하였다. 네덜란드 토양보호법에서는 1994년 70개의 토양오염물질(First Series)에 대해, 1997년에는 두 번째와 세 번째 시리즈 오염물질에 대해서, 2000년에는 네 번째 시리즈 오염물질에 대한 개입기준이 설정되었는데,



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

Fig. 1. Integrated SRC induction process of The Netherlands.

Table 5. Exposure pathway of CSOIL Model in the Netherlands

No.	Group	Exposure pathway
1		Ingestion of soil/dust
2	Ingestion	Consumption of contaminated crops
3		Intake of drinking-water due to permeation through drinking water pipe
4	Contact	Uptake via dermal contact with soil
5		Dermal uptake during bathing
6	Inhalation	Inhalation of soil particles
7		Inhalation of indoor air
8		Inhalation of outdoor air
9		Inhalation of vapours during showering

이를 합산하면 전체적으로 약 85개 오염물질에 대한 개입 기준이 마련되어 있다. 토양, 퇴적물, 지하수에 대한 인체 위해농도(Serious risk concentrations; SRC_{human})는 위의

Table 6. MPR_{human} and SRC_{human} estimated by the CSOIL Model.

Compound	MPR _{human}		current SRC _{human} soil [µg · kg ⁻¹ dry weight]	New SRC _{human} soil [µg · kg ⁻¹ dry weight]	RS ¹ Soil
	TDI/CR _{oral} [µg · kg bw ⁻¹ · d ⁻¹]	TCA/CR _{inhal} [µg · m ⁻³]			
1. Metals					
Cadmium	0.5	N.A	4260	9340	Medium
Copper	140	1	15700	8600	Medium
Arsenic	1	1	678	576	High
Mercury				–	
Mercury (inorganic)	2	0.2	197	210	Medium
Mercury (organic)	0.1	N.A	–	–	
Lead	3.6	N.A	300 ²	622 ²	High
Chromium	–	–	–	–	
Chromium III	5	60	2250	2760	Medium
Chromium VI	5	0.0025	–	78	Low
Zinc	500	N.A	56500	46100	Medium
Nickel	50	0.05	6580	1470	Medium
2. Aromatic Compound					
Benzene	3.3	20	1.09	1.1	Medium
Ethylbenzene	100	770	50	111	Medium
Toluene	223	400	339	32	Medium
Xylene (sum)	150	870	25.6	156	
o-Xylene				109	Medium
m-Xylene				248	Medium
p-Xylene				140	Medium

- 1. Reliability scores (RS) have been determined as the product of separate sub-scores for the MPR_{human} and the calculated potential exposure (high implies less uncertainty); the RS only accounts for SRC for soil.
- 2. Based on exposure and Maximal Permissible Risk for intake for a child (all values) and on relative bioavailability for lead in soil in the human body of 0.6 (revised values).

CSOIL에 의해 결정되고 있다.

CSOIL에서 사용하는 토양의 통합위해한계값(즉 Integrated SRC) 산정절차는 Fig. 1 제시되어 있다. 생태를 고려한 SRC_{eco}와 인체를 고려하는 SRC_{human}은 각각 위험농도 50(Hazard concentration 50)과 MPR_{human} (Human-toxicological Maximum Permissible Risk)로부터 계산되며, 원칙적으로 더 낮은 수치가 통합위해한계값으로 선택된다. SRC_{human}은 CSOIL모델을 이용하여 인체노출량에 대한 MPR_{human} 값으로부터 산정되며, SRC_{eco}는 생물종과 프로세스에 대한 HC50로부터 산정된다.

CSOIL는 노출경로는 섭취, 접촉, 흡입을 기준으로 다시 세밀하게 9개의 노출경로로 구분하고 있다(Table 5). 이 중 CSOIL의 가장 주요한 경로는 토양(또는 먼지) 섭취, 실내공기흡입, 오염농작물섭취이다.

인체최대허용노출량 MPR_{human}(Human-toxicological Maximum Permissible Risk)은 평생 동안 노출되었을 때 심각한 건강위해를 유발하지 않는 용량으로, 섭취, 흡입, 그리고 피부흡수 경로를 모두 포함하고 있으며, 대상 물질의 발암·비발암에 따른 접근법이 다르게 진행된다. 발암물질의 경우, 독성평가는 비역치접근법이 사용되는데, 네덜란드는 단순선형외삽모형을 이용하여 정량적 발암위

해성평가를 수행한다. 개입기준의 Framework에서 허용 가능한 초과발암위해도는 10⁻⁴로 정해져 있다. 비발암물질의 경우, 독성평가는 역치접근법이 사용되며 MPR_{human}은 NOAEL과 불확실성계수(UF)로부터 산정된다. 인체노출량(SRC_{human})을 산정할 때, 네덜란드의 표준 노출시나리오는 정원이 있는 주거지이다. 네덜란드의 표준토양은 10% 유기물, 25% clay, 그리고 pH 6인 토양을 의미하며, 오염농작물 Fraction은 10%, VOC오염일 경우는 표토로부터 1.25 m 이하에 존재한다고 가정한다. CSOIL은 오염토양으로 인한 전체노출경로(섭취, 흡입, 피부접촉)에 대한 총 인체노출량을 계산한다. SRC값은 총 인체노출량이 TDI (ADI) 또는 10⁻⁴ 섭취초과발암위해도와 동등한 수준에서 결정된다. Table 6은 네덜란드의 표준토양을 대상으로 MPR_{human} 값과 CSOIL 모델로 산정한 SRC_{human} 값이다.

3. 선진국의 토양위해성평가 모델 비교

3.1. 노출경로별 비교

Table 7은 미국의 CalTOX, 영국의 CLEA, 네덜란드의 CSOIL 모델의 직접 그리고 간접 노출경로를 비교한 표이다. 비교대상 모델 중 CalTOX가 가장 세분화되고 복잡한

Table 7. Direct and indirect exposure routes in soil risk assessment models.

Exposure route	CalTOX	CLEA	CSOIL
Indirect exposure			
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 mother's milk	+	-	-
Direct exposure			
Ingestion of contaminated soil particles (outdoors)	+	+	+
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)	+	+	+

경로를 가지고 있다. 선진국의 토양위해성모델들이 공통적으로 포함하고 있는 노출경로는 우리나라의 오염토양 위해성평가에서도 반드시 고려해야 할 노출경로로 사료된다. 이러한 경로로는 간접노출의 경우, 농작물섭취, 오염 지하수섭취가 있고, 직접노출경로로는 실내/외 토양섭취, 실외토양접촉, 실내/외 분진흡입, 실내/외 휘발물질 흡입으로 나타났다.

3.2. 토지이용도별 비교

외국의 토양위해성평가모델 중 위해성평가를 실시할 때 토지이용도를 고려하는 모델은 네덜란드의 CSOIL이다. 모델이 고려하는 토지이용도를 종합해보면, 주거지, 상업·산업·공업지역, 민감서식지(sensitivity habitat), 여가활동, 공사현장, 경작지 등이 있다. 이런 사실에 근거하여 국내의 토지이용도구분은 먼저 주거용지, 공업/산업부지, 농업용지로 구분하고, 대부분의 농경지는 주거지와 지리적으로

매우 가깝다는 가정 하에, 최종적인 토지이용도는 주거·농업용지와 상업·산업용지로 구분할 수 있다.

3.3. 인체노출량 산정식별 비교

본 연구에서 고려한 노출경로는 지하수섭취, 실내·외 공기흡입, 실내·외 분진흡입, 토양섭취, 토양접촉, 농작물섭취이다. 따라서 6가지 노출경로별로 각 지침서 또는 나라별로 제시하고 있는 인체노출량 산정수식을 추출하여 제시하였다. 각 모델별 인자에 대한 설명은 Table 8, 9, 10에 각각 정리하였다.

3.3.1 지하수 섭취

$$\text{CalTOX, } I = \frac{C_w \times IR_w \times EF \times ED}{BW \times AT} \tag{1}$$

$$\text{CSOIL, } DI_w = \frac{Q_{dw} \times C_{dw} \times fa}{W} \tag{2}$$

Table 8. Exposure factor for CalTOX.

Factor	Definition (unit)	Remark
C _w	Chemical concentration in water (mg/L)	
IR _w	Ingestion rate (L/day)	
EF	Exposure frequency (days/year)	
ED	Exposure duration (years)	
BW	Body weight (kg)	
AT	Averaging time (days)	
Ca	Chemical concentration in air (mg/m ³)	
IR	Inhalation rate (m ³ /hour)	
ET	Exposure time (hours/day)	
CS	Chemical concentration in soil (mg/kg)	
IR	Ingestion rate (mg soil/day)	
CF	Conversion factor (10 ⁻⁶ kg/mg)	
FI	Fraction ingested from contaminated source	RAFo (RBCA)
DA _{event}	Absorbed dose (mg/cm ² -event)	-
C _{soil}	Chemical concentration in soil (mg/kg)	Site-specific
CF	Conversion factor (10 ⁻⁶ kg/mg)	10 ⁻⁶
AF	Soil to skin adherence factor (mg/cm ² -event) (Referred to as contact rate in RAGS, Part A)	
ABS	Absorption factor	
DAD	Dermal absorbed dose (mg/kg-day)	-
DA _{event}	Absorbed dose (mg/cm ² -event)	Chemical-specific
SA	Skin surface area available for contact (cm ²)	
EV	Event frequency (event/day)	
SA	Skin surface area available for contact (cm ² /event)	
C _{plant}	Chemical concentration in plant (mg/kg)	
CR	Ingestion (kg/meal)	
FI	Ingestion rate	

Table 9. Exposure factor for CSOIL.

Factor	Definition (unit)
DI _w	Intake of contaminated drinking water by drinking (mg/kg-day)
Qd _w	Daily drinking-water intake (m ³ /day)
Cd _w	Drinking-water concentration (mg/dm ³ = g/m ³)
fa	Absorption factor
IV	Uptake of contamination via vapours (mg/kg-day)
Cia	Concentration in the indoor air (g/m ³)
Coa	Concentration in the outdoor air (g/m ³)
ti or to	Daily duration of exposure indoor respectively outdoor (h)
tfi or tfo	Average time fractions for stay indoor respectively outdoor
IP	Uptake of inhaled soil particles (mg/kg-day)
ITSP ¹⁾	Amount of inhaled soil particle (kg/day)
fr	Retention factor particles in lung
TSP	Amount of air-suspended particles (mg/m ³)
fs	Soil fraction in particles in the air
AV	Breathing volume (m ³ /d)
t	Duration of exposure (h)
tf	Time fraction exposure
ID	Uptake via soil ingestion (mg/kg-day)
AID	Daily intake amount soil (kg dry/day)
W	Body weight (kg)
Cs	Initial soil content (total soil content in gas, water, and solid phase)(mol/kg dry soil) or (mg/kg)
DA	Uptake via dermal contact with soil (mg/kg-day)
A exp	Exposed surface area(m ²)
fm	Matrix factor
DAE	Degree of coverage (mg soil/cm ² = 0.01 kg/m ²)
DAR	Absorption velocity (h)
fs	Fraction soil in dust
VI	Uptake of contaminant via crops (mg/kg-day)
Qfvk	Daily consumption of root crops (kg d.w./day)
Qfvb	Daily consumption of leafy crops (kg d.w./day)
fv	Fraction contaminated food
Cpr	Content of the root crop (mg subst./kg d.w. crop)
Cps	Content of the leafy crop (mg subst./kg d.w. crop)

지하수 섭취 경로에 대한 인체노출량 고려는 미국의 CalTOX와 네덜란드의 CSOIL 두 가지 모델에서 고려하고 있다. 제시된 인자들 중 주요 인자인 섭취율을 성인과 어린이 두 분류로 나누어 해당 노출경로에 대한 인체노출량을 산정한다.

3.3.2 휘발물질 흡입 (실내외)

$$\text{CalTOX, } I = \frac{C_a \times IR_a \times ET \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (3)$$

$$\text{CSOIL(실내외), } IV = [AV \times Cia \times tfi \times ti + AV \times Coa \times tfo \times fa \times 10^3 \div W] \quad (4)$$

$$\text{CLEA, } IR_{\text{vapour inhalation}} = (C_{\text{outdoor air}} \times RV) + (C_{\text{indoor air}} \times RV) \quad (5)$$

일평균 실내노출시간 및 일평균 실외노출시간은 CSOIL에서 제시된 인자를 인용하였다. 네덜란드에서는 성인과 어린이에 대하여 주중과 주말로 분리하여 실내외 노출시간을 계산한 후, 주간 총 노출시간을 구하여 일일평균시간을 계산하였다. 예를 들면 성인의 실내노출시간은 주중 5일간 24시간, 그리고 주말 2일간 20시간으로 가정하여 주간 총 노출시간을 160시간으로 본 후 이를 일일평균노출시간으로 환산하였고, 따라서 자동적으로 실외노출시간은 하루 24시간에서 실내노출시간을 제외한 시간이 된다.

Table 10. Exposure factor for CLEA

Factor	Definition (unit)
IR _{vapour inhalation}	Chemical exposure rate of a contaminant by inhalation of vapour (mg · day ⁻¹)
RV	Adult and child respiration volume (m ³ · day ⁻¹)
C _{outdoor air}	The average outdoor air concentration of the contaminant in the breathing zone calculation from the concentration in soil (mg · m ⁻³)
C _{indoor air}	The average indoor air concentration of the contaminant in the breathing zone calculation from the concentration in soil (mg · m ⁻³)
IR _{dust inhalation}	Chemical exposure rate of a contaminant by dust inhalation (mg · day ⁻¹)
C _{soil}	Contaminant concentration in soil (mg · g ⁻¹)
EF	The contaminant concentration in soil (mg · g ⁻¹)
RV	The adult and child respiration volume (m ³ · day ⁻¹)
F _{dust}	The fraction of locally derived soil in indoor dust
IR _{direct soil ingestion}	Chemical exposure rate of a contaminant from direct ingestion of soil and indoor dust (mg · day ⁻¹)
C _{soil}	Concentration of a contaminant in soil (mg · g ⁻¹)
SDR	Average daily soil and indoor ingestion rate (g · day ⁻¹)
IR _{vegetable consumption}	Chemical exposure rate of a contaminant from consumption of garden vegetable (mg · day ⁻¹)
C _{soil}	Concentration of a contaminant in soil (mg · g ⁻¹ .DW)
CR _{vegetable}	Total daily consumption rate of each vegetable (g · FW · kg ⁻¹ · bw · day ⁻¹)
BW	Human body weight (kg)
HF _{vegetable}	Fraction of each vegetable consumed that is assumed to be homegrown
CF _{vegetable}	Calculated soil-to-plant concentration factor (ug · g ⁻¹ · W · plant over ug · g ⁻¹ · DW · soil)

3.3.3 비산먼지 흡입

$$CSOIL \text{ (실내외)} \quad IP = \frac{ITSP^1 \times Cs \times fr \times fa}{W} \quad (6)$$

$$ITSP^1 = TSP \times frs \times AV \times t \times fr \quad (7)$$

CLEA,

$$IR_{dust \text{ inhalation}} = (C_{soil} \times EF \times C_{PM10} \times RV)_{outdoor} + (C_{soil} \times EF \times C_{PM10} \times RV \times F_{dust})_{indoor} \quad (8)$$

비산먼지 흡입에 대한 네덜란드의 인체노출량 산정의 경우, 사용된 인자를 성인과 어린이, 실내와 실외로 구분하여 산정한다. 이 때 흡입먼지량(ITSP)을 우선 산정한 후, 제시된 폐 내부에 흡착되는 먼지량을 대입하여 산정한다.

3.3.4 토양섭취

$$CalTOX, \quad I = \frac{CS \times IR \times CF \times FI \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (9)$$

$$CSOIL, \quad ID = \frac{AID \times Cs \times fa}{W} \quad (10)$$

$$CLEA, \quad IR_{direct \text{ soil ingestion}} = C_{soil} \times SDR \quad (11)$$

토양섭취에 관한 인체노출량 산정식은 3가지 모델에서 공통적으로 다루고 있다. 각 모델에서 특이적으로 확인할 수 있는 인자에 대해 살펴보면, 미국 CalTOX는 토양 오염도를 고려하여 산정한다. 네덜란드 CSOIL에서는 토양 섭취를 통해 인체가 흡수하는 양의 기본 값을 제시하였으나, 영국 CLEA는 기본적인 토양섭취율과 토양오염도를 이용하여 산정하였다.

3.3.5 토양접촉

CalTOX, Dermal Absorbed Dose Per Event,

$$DA_{event} = C_{soil} \times CF \times AF \times ABS_d \quad (12)$$

Dermal Absorbed Dose-Soil Contact,

$$DAD = \frac{DA_{event} \times EF \times ED \times EV \times SA}{BW \times AT} \quad (13)$$

$$Absorbed \text{ Dose} = \frac{CS \times CF \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (14)$$

CSOIL,

$$DA = \frac{A_{exp} \times fm \times DAE \times DAR \times Cs \times t \times tf \times frs}{W} \quad (15)$$

CLEA,

$$DA_{event} = C_{soil} \times AF \times ABS_d \times 10^{-6} \left\{ \frac{kg}{mg} \right\} \quad (16)$$

CalTOX는 인체 토양접촉을 통한 인체노출량 산정시 두 개의 수식을 이용한다. 현장에서의 행동에 의한 인체 토양접촉율을 산정하여(12) 인자를 생성한 후 (13)의 식에 대입하여 토양접촉에 의한 인체노출량을 산정하였다. 또한 미국의 토양접촉 노출인자는 주거와 산업, 성인과 어린이로 나누어 세부적인 대표값을 제시하였다. 네덜란드의 산정식 역시 각각의 인자에 대하여 실내와 실외, 성인과 어린이로 세분화하여 대표값을 제시하였으며, 분진 중 토양비율을 추가적으로 고려하여(frs 인자) 산정식을 구성하였다.

3.3.6 농작물 섭취

$$\text{CalTOX, } I = \frac{C_{plant} \times CR \times FI \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (17)$$

$$\text{CSOIL, } VI = \frac{(Qfvk \times Cpr + Qfvb \times Cps) \times fv \times fa}{W} \quad (18)$$

CLEA,

$$\frac{IR_{vegetable\ consumption}}{HF_{vegetable}} \times CF_{vegetable} = C_{soil} \times \sum_{vegetable\ type} (CR_{vegetable} \times BW \times \dots) \quad (19)$$

농작물 섭취에 대한 인체노출량의 산정시 가장 우선적으로 고려될 사항으로, 적용지역 농작물의 일일 소비율이 확인되었다. 미국 CalTOX는 단순한 농작물 전체의 섭취량 및 섭취율을 적절하게 대입하도록 구성되어 있으며, CSOIL은 대상 농작물을 작물, 근채소, 잎채소로 나눈 후, 음식 내 함유율과 인체 흡수 관련 인자를 적용하여 인체노출량을 산정한다. CLEA는 오염토양 농작물에서 발생할 가능성이 있는 생물축적계수를 고려하여 산정을 실시하고 있다.

4. 결 론

오염토양의 정화목표를 결정하거나 합리적인 토양환경 기준을 설정하기 위해서는 위해성에 기반을 둔 정책결정이 수반되어야 한다. 우리나라는 최근에 토양위해성평가 지침을 마련하였으며, 현행 토양오염기준에 포함된 중금속류와 일부 유류성분(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌)에 대한 위해성평가 절차를 제시하였다. 선진국에서는 토양

위해성모델을 개발하여 토양정책 일반에 활용하고 있으며, 앞으로 우리나라도 국내실정에 적합한 토양위해성평가 모델개발과 관련된 연구가 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서는 선진국에서 토양오염 위해성평가에 이용되는 CalTOX(미국), CLEA(영국), CSOIL(네덜란드) 모델을 대상으로 노출경로, 토지이용도 그리고 노출량 산정식을 중심으로 비교분석하였다. 그 결과 선진국의 토양위해성모델들이 공통적으로 포함하고 있는 노출경로로서, 우리나라의 오염토양 위해성평가에서도 반드시 고려해야 할 노출경로로는 농작물섭취, 오염지하수섭취, 실내·외 토양섭취, 실외토양접촉, 실내·외 분진흡입, 실내·외 휘발물질 흡입으로 나타났다. 인체노출량 산정식에서는 일반적으로 미국식 또는 네덜란드식 방법이 국내상황에서 사용이 용이한 것으로 판단된다. 차후 고려해야 할 부분으로는 외국의 경우 인체 및 생태위해성을 동시에 고려한 토양환경기준이 설정되고 있는 현실을 감안할 때 인체위해성과 더불어 생태위해성을 평가할 수 있는 생태위해성 평가기법에 대한 연구를 추진해야 하며, 토양이라는 매체의 비균질적이며 이질적인 특성에 따라, 토양 및 지하수 환경 내 오염물질 거동을 예측하고 수용체에 영향을 미치는 영향에 대해 정확한 정보를 제공해 줄 수 있는 다양한 예측모델이 마련되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 환경부의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- DEFRA and EA, 2002, Contaminants in soil, Collation of toxicological data and intake values for humans. Arsenic (TOX-REPORT No. 01).
- DEFRA and EA, 2002, Contaminants in soil, Collation of toxicological data and intake values for humans. Cadmium (TOX-REPORT No. 03).
- DEFRA and EA, 2002, Contaminants in soil, Collation of toxicological data and intake values for humans. Chromium (TOX-REPORT No. 04).
- DEFRA and EA, 2002, Contaminants in soil, Collation of toxicological data and intake values for humans. Lead (TOX-REPORT No. 06).
- DEFRA and EA, 2002, Contaminants in soil, Collation of toxicological data and intake values for humans. Mercury, (TOX-REPORT No. 07).

- DEFRA and EA, 2002, Contaminants in soil, Collation of toxicological data and intake values for humans. Nickel, (TOX-REPORT No. 08).
- DEFRA and EA, 2003, Contaminants in soil, Collation of toxicological data and intake values for humans. Benzene (TOX-REPORT No. 11).
- DEFRA and EA, 2003, Contaminants in Soil, Collation of toxicological data and intake values for humans. Toluene (TOX-REPORT No. 14).
- DEFRA and EA, 2004, Contaminants in Soil, Collation of toxicological data and intake values for humans. Ethylbenzene (TOX-REPORT No. 17).
- DEFRA and EA, 2004, Contaminants in soil, Collation of toxicological data and intake values for humans. Xylene (TOX-REPORT No. 19).
- DEFRA and EA, 2002, Soil Guideline Values for Arsenic Contamination (SGV Report No. 01).
- DEFRA and EA, 2002, Soil Guideline Values for Cadmium Contamination (SGV Report No. 03).
- DEFRA and EA, 2002, Soil Guideline Values for Chromium Contamination (SGV Report No. 04).
- DEFRA and EA, 2002, Soil Guideline Values for Compounds of inorganic Mercury contamination (SGV Report No. 05).
- DEFRA and EA, 2002, Soil Guideline Values for Nickel Contamination (SGV Report No. 07).
- DEFRA and EA, 2002, Soil Guideline Values for Lead Contamination (SGV Report No. 10).
- DEFRA and EA, 2004, Soil Guideline Values for Toluene Contamination (SGV Report No. 15).
- DEFRA and EA, 2005, Soil Guideline Values for Ethylbenzene Contamination (SGV Report No. 16).
- DEFRA and EA, 2002, Assessment of risks to human health from land contamination: an overview of the development of guideline values and related research (R&D Publication CLR7).
- DEFRA and EA, 2002, Priority contaminants report (R&D Publication CLR8).
- DEFRA and EA, 2002, Contaminants in soil:collation of toxicological data and intake values for humans (R&D Publication CLR9).
- DEFRA and EA, 2002, The Contaminated Land Exposure Assessment Model (CLEA), Technical basis and algorithms (R&D Publication CLR10).
- EA, Contaminants in soil, Collation of toxicological data and intake values for humans. (Arsenic, Cadmium, Chromium, Lead, Mercury, Nickel, Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene).
- EC, 2003, Technical Guidance Document on Risk Assessment, EC No 1488/94.
- EC, 2003, Technical Guidance Document on Risk Assessment Part , 93/67/EEC.
- Environment Agency, 2005, CLEA UK Handbook(Draft).
- Environment Agency, 2000, Secondary Model Procedure for the Development of Appropriate Soil Sampling Strategies for Land Contamination, Bristol, UK.
- RIVM, 2005, A human exposure model to calculate harmonized risk limits (Report 601501022).
- RIVM ETX 2.0, 2004, A Program to Calculate Hazardous Concentrations and Fraction Affected, Based on Normally Distributed Toxicity Data (Report 601501028).
- RIVM, 2001, Evaluation and revision of the CSOIL parameter set.
- RIVM, 2001, Guidance Document on deriving Environmental Risk Limits (Report 601501 012).
- RIVM, 2004, Guidance for deriving Dutch Environmental Risk Limits from EU-Risk Assessment Reports of existing substance (Report 601501020).
- RIVM, 1994, Human exposure to soil contamination.
- RIVM, 1999, Protocol for derivation of Harmonized Maximum Permissible Concentrations (MPCs) (Report 601506 001).
- RIVM, 2001, Technical evaluation of the Intervention Values for Soil/sediment and Groundwater (Report 711701 023).
- RIVM, 2001, Evaluation of model concepts on human exposure; Proposals for updating the most relevant exposure routes of CSOIL (Report 711701 022).
- RIVM, 2004, Update of risk assessment models for the indirect human exposure (Report 601516011).