한국지하수토양환경학회지 Vol. 12, No. 1, pp. 64~72, 2007 ≪原著≫

토양오염 위해성평가를 위한 국가별 노출인자 비교분석 및 국내 노출인자 연구

안윤주* · 이우미
건국대학교 환경과학과

Comparative Study on Exposure Factors for Risk Assessment in Contaminated Lands and Proposed Exposure Factors in Korea

Youn-Joo An* · Woo-Mi Lee
Department of Environmental Science, Konkuk University

ABSTRACT

Humans are exposed by a range of pollutants in soil via exposure routes such as ingestion, inhalation, and dermal contact. Risk assessment is a process of evaluating the adverse health effects of chemicals as a result of exposure to stressors, and it is a very useful tool to establish the cleanup goals in contaminated lands. In the exposure assessment that is one of main process in risk assessment, exposure factor plays a significant role to quantify the intake of soil pollutants. However there is a very limited study about the exposure factor applicable to Korea. In this study, we compared the exposure factors applied by the developed countries including the United States and representative European countries, and suggested the exposure factor that might be suitable in our situation. The exposure factors considered in this study include average lifetime, body weight, (exposed) skin surface area, life time, skin absorption, soil-skin adherence factor, and soil ingestion rate. This information is needed to quantitatively estimate the intake of soil pollutants in contaminated lands.

Key words : Soil pollution, Risk assessment, Exposure assessment, Exposure factor

요 약 문

토양매체중의 오염물질들은 다양한 경로를 통해 인체나 생태계에 노출되어 위해성 문제를 유발하고 있다. 토양위해성평가(Soil Risk Assessment)는 토양오염물질로 인한 악영향의 개연성을 정량적으로 평가하는 과정으로, 유해성 확인(Hazard Identification), 용량-반응평가(Dose-Response Assessment), 노출평가(Exposure Assessment), 그리고 위해도 결정(Risk Characterization)의 4가지 단계적 과정으로 이루어진다. 이중 노출평가과정에서 매우 중요하게 작용하는 노출인자(Exposure Factor)는 토양오염물질의 인체노출량을 산정하는데 필수적인 요소로, 미국, 유럽국가 등 선진국에서는 나라별 상황에 적절한 노출인자를 사용하고 있으나, 우리나라는 아직 국내에 적용하기 적합한 노출 인자에 대한 연구가 매우 부족한 실정이다. 본 연구에서는 토양오염 위해성평가를 위한 국가별 노출인자를 비교분석하고, 이를 토대로 국내상황에 적용가능한 노출인자를 제시하였다. 국가별 노출인자 연구는 미국 Environmental Protection Agency, 영국 Environmental Agency, 네덜란드 RIVM, 호주, 그리고 독일에서 적용되고 있는 노출인자값에 대해 노출인자별로 총괄적인 비교분석을 수행하였다. 또한 국가별 비교분석연구와 국내에서 제시된 노출인자 자료를 종합하여, 국내자료가 없는 경우 외국에서 보편적으로 적용하고 있는 인자값을 국내 적용 타당성을 고려하여 제시하였다. 본 연구에서 고려된 노출인자 조사항목은 평균수명, 노출기간, 노출빈도, 체중, 체표면적(또는 노출체표면적), 피부흡수계수(Skin Absorption Factor), 토양-피부간 흡착계수(Soil-Skin Adherence Factor), 음용수 섭취량, 호흡률, 토양 섭

*Corresponding author : anyjoo@konkuk.ac.kr
원고접수일 : 2006. 9. 1 게재승인일 : 2007. 2. 15
질의 및 토의 : 2007. 4. 30 까지

취량 그리고 농작물 섭취량 등이다. 본 연구는 오염토양의 위해성평가를 수행할 때 국내 상황을 고려한 노출평가에 필요한 기반연구가 될 것이다.

주제어 : 토양오염, 위해성평가, 노출평가, 노출인자

1. 서 론

토양매체의 특성상 토양 내 오염물질은 토양 내에 장기간 잔류하며, 지하수나 음식물 섭취 등 여러 경로를 통해 인체로 유입된다. 오염된 토양의 정화는 환경적으로 시급한 문제이나, 토양매체는 다른 환경매체와 달리 정화하는데 기술적으로 어려움이 있고, 경제적으로 막대한 예산이 요구된다. 따라서 오염조사를 포함한 위해성 평가를 통하여 합리적인 정화목표를 설정할 필요가 있다. 미국, 유럽 등 선진국에서는 정화목표를 설정하기 위해 지침을 마련하거나 토양위해성 평가모델을 개발하여 활용하고 있다. 그 예로는 미국 환경보호청의 토양선별지침(SSG, Soil Screening Guidance)(US EPA, 2002b), 영국의 오염부지 노출평가 모델(CLEA, Contaminated Land Exposure Assessment)(EA, 2002), 네덜란드의 CSOIL(RIVM, 2001), 그리고 덴마크의 CETOX(Kulhánek et al., 2005) 등이 있다.

우리나라의 토양오염관리는 토양오염항목별 오염기준에 의존하고 있고 노출평가 등에 대한 인식이 부족한 실정이다. 따라서 국내 실정에 적합한 위해성 평가 기법을 개발하고 이를 토대로 위해성 평가 체계를 구축할 필요성이 있다. 또한 토양오염기준 설정시 위해성평가기법을 적용할 경우 토양오염기준의 합리성과 활용성을 증대시킬 수 있다. 위해성평가는 일반적으로 4단계로 구분되는데 유해성 확인(Hazard Identification), 용량-반응평가(Dose-Response Assessment) 또는 독성평가(Toxicity Assessment), 노출평가(Exposure Assessment), 위해도 결정(Risk Characterization)의 단계이다. 이중 노출평가는 토양오염물질의 인체노출량을 산정하는 과정으로 노출경로에 따른 노출인자가 관여하며, 노출평가시 사용되는 노출인자값은 평가대상에 따라 상이하다. 특히 체중, 노출면적 등 인체와 관련된 수치는 국가별, 성별, 연령별로 차이를 나타나기 때문에 평가대상을 대표할 수 있는 대표값이 적용되어야 한다. 미국이나 유럽 등 선진국에서는 인체위해성평가 지침을 마련하고 있으며, 자국 상황에 적합한 인체 노출량 산정을 위한 노출인자 수치를 제시하고 있다.

우리나라의 경우 평가대상을 대표할 수 있는 노출인자에 대한 연구가 현재 매우 부족하다. 따라서 미국이나 유럽국가 등에서 제시된 노출인자를 적용하여 평가하고 있다. 그러나 외국인과 한국인의 인체노출인자수치는 상당한 차이가 있기 때문에 국내 노출인자가 궁극적으로 필요하나, 인체노출인자에 대한 실측연구는 상당한 인력과 시간 그리고 노력이 필요하므로 장기간의 연구가 소요된다. 지금까지 한국인의 인체인자를 연구한 자료는 통계청의 '생명표'(통계청, 2005), 산업자원부의 '한국인 인체치수조사사업'(산업자원부, 2004), 그리고 학위논문인 '한국인 성인 남녀의 노출체표면적에 관한 연구'(이주영, 2005) 등으로 인체치수를 조사한 자료는 존재하나 호흡률이나 음용수 섭취량, 토양섭취량 등에 관한 인자는 한국인을 대표할 수 있는 연구 자료가 전무하다. 현재 국내 여러 기관에서 인체 위해성평가를 실시하고 있으나 한국인에 맞는 표준화된 노출인자 값이 없고 적용하고 있는 인자값이 상이하므로 부적합한 결과를 유도할 수 있다(이효민 외, 2003).

본 연구에서는 토양오염 위해성평가를 위한 국가별 노출인자를 비교분석하고, 이를 토대로 국내상황에 적용가능한 노출인자를 제시하였다. 국가별 노출인자 연구는 미국 환경보호청(US EPA, 1997; 2002a; 2002b; 2004), 영국 Environmental Agency(EA, 2002), 네덜란드 RIVM (RIVM, 2001), 호주(NEPC, 1999), 그리고 독일(Stubenrauch et al., 1997)에서 적용되고 있는 노출인자값에 대해 노출인자별로 총괄적인 비교분석을 수행하였다. 국가별 비교분석연구와 국내에서 제시된 노출인자 자료를 종합하여, 현재 국내인프라를 토대로 국내에서 적용가능한 토양위해성평가 노출인자를 제시하였다. 본 연구에서 고려된 노출인자 자료는 토양오염물질로 인한 인체노출량 산정에 필요한 항목으로 한정하였고, 포함된 노출인자 조사항목은 평균수명, 노출기간, 노출빈도, 체중, 체표면적(또는 노출체표면적), 피부흡수계수(Skin Absorption Factor), 토양-피부간 흡착계수(Soil-Skin Adherence Factor), 음용수 섭취량, 호흡률, 토양 섭취량, 그리고 농작물 섭취량 등이다.

2. 연구방법

본 연구는 국내의 인체인자자료와 미국과 영국, 네덜란드, 호주, 독일과 같은 유럽국가에서 토양오염 위해성평가를 수행할 때 적용되는 노출인자수치를 총괄적으로 종합하여, 비교분석을 수행하였다. 한국인을 대상으로 연구된

노출인자 자료는 인체치수에 관한 체중, 노출면적, 그리고 수명 등과 농작물섭취량이다. 체중은 산업자원부에서는 '한국인 인체치수조사사업' 보고서를 참고로 하였고, 한국인의 평균수명은 통계청의 생명표를 이용하였다. 또한 '한국인 성인 남녀의 노출체표면적에 관한 연구' 내에 제시된 노출체표면적 산출 공식을 이용하여 노출체표면적을 산정하였다. 국내 1인당 일평균 농작물 섭취량은 보건복지부의 '국민건강영양조사' 제 3기-영양조사(I)-'를 이용하였다.

외국의 경우 미국 EPA에서는 노출평가시 적용되는 노출인자 항목에 관하여 상세히 연구된 Exposure Factor Handbook(1997)과 어린이를 대상으로 한 노출인자 핸드북(Child-Specific Exposure Factor Handbook)(2002a)을 발간하고 있다. 또한 토양오염선별지침인 Soil Screening Guidance(US EPA, 2002b) 와 슈퍼펀드 위해성 평가 지침서(Risk Assessment Guidance for Superfund, RAGS) Volume 1, Part E(Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment)(US EPA, 2004)에서도 토양위해성 평가를 위한 노출인자 값을 제시하고 있다. 영국은 토양위해성 평가 모델인 CLEA(Contaminated Land Exposure Assessment)을 개발하고 영국인의 노출인자 수치를 적용하고 있다. CLEA model대한 보고서에서는 영국인의 인체 노출인자와 호흡률, 토양섭취량 등 여러 인자들을 산출한 수식 등이 제시되어 있다(EA, 2002). 네덜란드에서는 토양위해성평가 모델인 CSOIL model에 사용된 인자값과 CLEA, UMS, CalTox등 여러 나라의 인자값을 비교 분석한 보고서(RIVM, 2001)가 있다. 그 외의 호주의 Site Contamination에 대한 평가보고서(NEPC, 1999)와 독일의 UMS에 관한 논문이 활용되었다. 궁극적으로 노출인자조사 항목에 대해서 국가별 수치를 비교분석하고 제안된 수치에 대해서는 적용 가능한 근거를 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 평균수명(Average Time, AT)

평균수명은 사람의 평생 동안의 노출을 고려하는 발암위해도 평가에서 중요한 인자이다. 따라서 수명이 짧으면 잠재적 발암위해도가 커지며, 반대로 수명이 길어지면 잠재적 발암위해도는 작아지게 된다(US EPA, 1997). 미국환경청(US EPA, 1997), 호주(NEPC, 1999), 영국(EA, 2005)등에서는 위해성 평가시 실제 평균수명보다 적은 70년을 권장하고 있다. 또한 국립환경과학원(2006)에서 수행한 연구 자료에서도 70년을 적용하고 있다. 한편 한국인의 평균수명은 통계청의 생명표(2005)에 의하면 2003년 기준으로 남자는 73.87년, 여자는 80.82년으로 남녀 평균 77.46년으로 조사되었다. 실제 한국인의 평균수명은 70년 이상이나 미국이나 영국, 네덜란드 등 외국에서도 평균수명보다 적은 70년을 평균수명으로 적용하고 있어 위해성 평가시 70년을 적용하는 것은 큰 무리가 없을 것으로 판단되며 따라서 본 연구에서는 위해성평가시 평균수명을 70년으로 제안한다.

3.2. 노출기간(Exposure Duration, ED)

노출기간은 일생을 통해 오염물질에 노출되는 총 연수(years)를 의미하며, 통계적 자료가 있을 경우 95% 상한치를 사용한다. 위해성평가의 노출기간은 발암물질의 경우 평생을 두고 노출된다고 가정하여 평균수명으로 보고, 우리나라의 경우 70년으로 제안되고 있다. 비발암물질의 경우 개인이 한 곳에서 거주하는 기간의 95% 상한치를 30년(RME, Reasonable Maximum Exposure)으로 보고 있다. 미국, 영국, 네덜란드 그리고 호주와는 달리 독일의 경우 연령별로 1세 이하, 1-3세, 4-8세, 9-16세, 그리고 16세 이상의 5개 그룹으로 분류하여 노출기간과 노출인자 값을 제시하고 있으며, 각 그룹별 노출기간은 다음과 같다; 1세 이하는 1년, 1-3세는 3년, 4-8세는 5년, 9-16세는 8년, 그리고 16세 이상은 30년으로 제시하고 있다. 비발암물질의 노출기간은 토지이용도와 상관이 있으며, 미국의 경우 주거용지에서는 30년, 상업 · 공업용지에서는 25년을 기본값으로 제시하고 있다(US EPA, 1997; ASTM, 2002). 한편 호주의 경우 토지이용도를 구분하지 않고, 30년을 기본값으로 제시하고 있다(NEPC, 1999). 우리나라의 대표값이 제시되기 전까지 외국기관에서 위해성 평가시 적용하고 있는 보편적인 수치인 주거지역 30년 그리고 상업·공업용지의 경우 25년을 적용할 것을 권고한다.

3.3. 노출빈도(Exposure Frequency, EF)

노출빈도는 수용체가 연간 오염물질에 노출되는 총 일수(days)를 의미하며, 토지이용도와 연관이 있다. US EPA(1997)의 노출인자핸드북과 호주(NEPC, 1999)에서는 노출빈도를 연간 365일로 권장하고 있으며, SSG(US EPA, 2002b)나 RBCA(ASTM, 2002)에서는 주거용지의 경우 연간 350일, 상업·공업용지는 250일로 제시하고 있다. 국내에서 위해성 평가시 표준화된 노출빈도값은 없으나 인체는 지속적으로 환경매체에 노출되므로 주거 · 농업지역에서 365일, 상업 · 공업용지에서는 250일로 적용할 것을 제안한다.

Table 1. Average body weight of Korean (MOCIE, 2004 (Unit, kg))

Age (years)	Male	Female
< 5	14.5	13.8
6-11	30.7	28.9
12-17	57.3	50.8
18-24	68.5	54
25-39	71.3	55.7
40-59	69.9	58.8
> 60	63.7	56.9
19-65	69.6	56.4

3.4. 체중(Body Weight, BW)

위해성평가에서 사용되는 체중값은 노출기간 동안의 수용체의 평균 체중값이다. 평균체중이 사용되는 이유는 노출량 계산식의 다른 입력변수와 결합했을 때 RME에 대한 최적 예측치를 산정한다고 여겨지기 때문이다. 미국(US EPA, 1997; US EPA, 2002b), 네덜란드(RIVM, 2001), 그리고 호주(NEPC, 1999)에서는 성인체중의 평균값으로 70 kg을 권장하고 있다. 한편 영국의 경우 각 연령별로 세분화하여 남자와 여자의 체중을 구체적으로 제시하고 있다(EA, 2005). 독일은 연령별로 5 kg(1세 이하), 10 kg(1-3세), 20 kg(4-8세), 40 kg(9-16세), 그리고 70 kg(16세 이상)으로 제시하고 있다. 국내의 경우 산업자원부(2004)에서 실시한 한국인 인체치수조사사업 보고서에 의하면 성인남자와 성인여자의 평균체중은 각각 69.6 kg, 56.4 kg으로 조사되어 있으며(Table 1), 국립환경과학원에서 최근 수행한 연구에서는 성인체중의 대표값으로 60 kg을 사용하였다. 어린이의 체중은 미국과 네덜란드에서 15 kg으로 권장되고 있다. 한국인의 체중은 미국이나 유럽보다 낮으며 이는 동일농도의 물질에 노출되었을 때 노출량이 더 커질 수 있음을 의미한다. 따라서 산업자원부의 자료를 바탕으로 평균 성인체중은 60 kg, 어린이(1-6세)의 체중은 15 kg으로 사용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

3.5. 체표면적(Skin Surface Area, SA)

피부노출은 물(수영, 목욕), 대기 중 비산먼지, 그리고 토양에 노출됨으로서 발생하는데 피부접촉에 의한 노출량을 산정할 때 피부면적이 필요하다. Table 2는 위해성 평가시 사용되는 총 체표면적을 나타낸 것인데 나라별로 상이하다. 미국은 성인의 평균 체표면적을 18,150 cm^2으로 제시하고 있고, 네덜란드는 성인의 체표면적을 18,000 cm^2, 그리고 영국의 경우 남자는 19,200 cm^2, 여자는 17,600 cm^2으로 제시하고 있다. 특히 영국은 연령별로 총체표면적을 상세히 나타내고 있다(Table 3). 독일은 성인의 경우 19,000 cm^2, 4-8세 어린이는 10,000 cm^2으로 제시하고 있다. 체표면적은 주로 간접적인 방법에 의해 예측되는데 체중과 신장을 수학적인 공식에 적용하여 산출한다. 체표면적 산출 공식은 매우 다양하다. 본 연구에서는 우리나라의 성인과 어린이(1-6세)의 체표면적을 산출하기 위하여 한국인 인체치수조사사업 보고서(산업자원부, 2004)에서 조사된 평균 신장(H)과 체중(BW)을 이주영(이주영, 2005)이 제시한 체표면적 산출공식(Eq 1)에 적용하여 계산하였다. 그 결과 성인의 총체표면적은 17,000 cm^2, 어린이는 6,500 cm^2으로 산정되었다.

Table 2. Recommended skin surface area for risk assessment (Unit, cm^2)

	Adult	Children
US EPA[a]	18,150	6,560 (1-6years) 13,120 (7-18years)
RIVM[b]	18,000	9,500
EA[c]	(Refer to Table 3)	
UMS[d]	19,000	10,000 (4-8years)
Korean*	17,000	6,500 (1-6years)

[a] US EPA (2004), [b] RIVM (2001), [c] EA (2005), [d] Stubenrauch et al. (1997)
* Calculated by using body weight and height of Korean.

Table 3. Total skin and exposed skin area (mean values) used in UK (2002)

Age (years)	Male		Female	
	Total skin area (m^2)[a]	Exposure skin area (cm^2)[b]	Total skin area (m^2)[a]	Exposure skin area (cm^2)[b]
2-3	0.60	444	0.61	444
3-4	0.68	523	0.67	510
4-5	0.75	597	0.75	599
5-6	0.80	644	0.80	637
16-59	1.92	321	1.76	293
59-70	1.94	323	1.80	299

[a] Treated as a secondary probabilistic variable as function of body weight.
[b] Treated as a probabilistic variable using a beta-shaped probability density function.

$$SA(cm^2) = 73.31 \times H^{0.725} \times BW^{0.425}$$

Eq 1.체표면적 산출공식

한편, 토양접촉에 의한 노출경로에서는 착복상태이므로 의상을 착용한 부분을 제외한 노출체표면적(Exposure Skin Surface Area, SAe)이 필요하다. 노출체표면적수치는 각 나라별로 상이한데 그 이유는 노출된다고 가정하는

Table 4. Recommended exposure skin surface area for risk assessment (Unit, cm^2)

	Adult	Children
US EPA	5,000(50th)[a], 5,800(95th)[a] 5,700(residential)[b, c] 3,300(non-residential)[b]	2,800(1-6years)[b, c]
ASTM[d]	3,160	
RIVM[e]	900(indoor), 1,700(outdoor)	500(indoor), 2,800(outdoor)
EA	(Refer to Table 3)	

[a] US EPA (1997), [b] US EPA (2002b), [c] US EPA (2004), [d] ASTM (2002), [e] RIVM (2001), [f] EA (2005)

부분이 다르기 때문이다. 미국 환경보호청에서 최근 발간된 Dermal Risk Assessment Report(US EPA, 2004)에 의하면, 일반성인(주거용지)은 반팔, 반바지를 입고 신발을 착용하고 있다고 가정하여 노출되는 체표면은 머리, 손, 하박, 종아리부분으로 보고 오염토양에 노출되는 체표면적 기본값을 5700 cm^2으로 제시하고 있다. 한편 상업·공업용지의 경우는 반팔, 긴바지를 입고 신발을 착용한다고 가정하므로, 노출되는 체표면은 머리, 손, 하박이고 노출체표면적 기본값은 3300 cm^2이다. 한편, 성인여자의 하박면적은 성인남자의 45%라고 가정한다(US EPA, 2004). 어린이(1-6세)는 반팔, 반바지를 입고 신발을 착용하지 않았다고 가정하고 따라서 노출 체표면은 머리, 손, 하박, 종아리, 발 부분이 되며, 어린이 노출체표면적 기본값은 2800 cm^2이다. 네덜란드는 성인과 어린이에 대한 실외/실내 노출표면적을 제시하고 있다. 영국은 0-6세의 어린이의 경우 손, 하박, 그리고 종아리가 노출된다고 가정하고, 6-7세는 손과 종아리, 12세 이상은 오직 손만 노출된다고 가정하여 노출체표면적을 제시하고 있다(Table 3). Table 4는 위해성평가에서 사용되는 국가별 노출체표면적을 나타낸 것이다. 국내의 경우 이주영(2005)이 성인 남녀를 대상으로 실시한 연구에서 신체부위별 체표면적을 제시하고 있어 US EPA에서 주거용지에서 노출된다고 가정하는 체표면부위(머리, 손, 하박, 종아리)를 합산한 결과 5,610 cm^2으로 산출되었다. 또한 어린이의 경우 신체부위별 체표면적 측정결과가 전무하여 성인과 어린이의 총 체표면적의 비를 구하고 발을 포함한 성인의 노출체표면적과 곱하여 어린이 노출체표면적을 산출한 결과 2,535 cm^2로 산출되었다. 그러나 어린이의 경우 실측자료가 아닌 성인과 어린이의 체표면적의 비를 이용하여 산출된 값이며 성인의 경우 65명에 한하여 수행된 연구로 한국인의 대표성있는 수치에 대한 연구자료가 도출될 때까지 US EPA에서 제시하고 있는 성인 5,700 cm^2(주거지역), 3,300 cm^2(상업·공업용지), 그리고 어린이는 2,800 cm^2으로 적용하는 것은 무리가 없을 것으로 판단된다.

3.6. 피부흡수계수(Dermal Absorption Fraction from Soil, ABS_d)

피부흡수계수는 오염물질이 피부를 통과하여 혈류에 흡수되는 정도를 나타내며, 물질에 따라 다르다. 미국 환경보호청(US EPA, 2004)에서 제시하고 있는 반휘발성유기물질(SVOCs)에 대한 기본 피부흡수율은 0.1이고 비소는 0.03, 카드뮴은 0.001이다. 한편 휘발성물질이나 기타 무기물질에 대한 피부흡수율 기본값은 제시된 바가 없다. ASTM은 휘발성 물질과, PAHs로 분류하여 각각 0.5, 0.05로 제시하고 있으며 또한 영국에서는 US EPA와 같은 기본값을 제시하고 있다. 일반적으로 특정물질에 대해 제시된 수치가 없는 경우는 보수적인 가정을 이용하여 예측한다. 피부흡수계수는 보편적으로 국가별 차이가 없는 인자이므로 따라서 본 연구에서는 카드뮴: 0.001, 비소: 0.03, 반휘발성 유기물: 0.1, 휘발성물질: 0.5로 적용할 것을 제안한다.

3.7. 토양-피부간 흡착계수(Soil-to-Skin Adherence Factor, AF)

토양-피부간 흡착계수는 단위 체표면당 피부에 흡착되는 토양의 양을 의미한다. 흡착계수는 토양특성, 신체부위(Body Part), 그리고 활동(Activity)에 따라 영향을 받는 인자이다. 네덜란드에서는 성인과 어린이에 대하여 실내/실외로 구분하여 노출표면적과 피부흡착계수, 노출기간, 그리고 토양에 접촉하여 노출되는 기간을 권고하고 있다. 미국 환경보호청에서는 활동 및 체표면적을 고려한 토양-피부간 흡착계수를 연령별, 토지이용도별로 구분하여 상세하게 제시하고 있다(Table 5). 또한 ASTM과 영국도 토지이용도별 피부흡착계수를 제시하였다. Table 6는 국가별 위해성 평가에서 적용되고 있는 피부흡착계수 기본값을 나타낸 것이다. 토양-피부간 흡착계수는 국내에서 제시된 수치가 없으므로 US EPA에서 제시하고 있는 성인: 0.07, 어린이: 0.2로 제안한다.

3.8. 음용수 섭취량(Daily Water Intake Rate, CR_w)

음용수 섭취량은 토양으로부터 지하수로 확산된 오염물질에 노출된 정도를 평가하기 위해 사용된다. 미국과 네덜란드의 경우 위해성 평가시 일일 음용수 섭취량을 성인 2 L/day, 어린이는 1 L/day로 적용할 것을 권장하고 있다. ASTM의 경우 성인의 주거지역에서의 음용수섭취량을 2 L/day, 상업/산업지역에서는 1 L/day로 권장하고 있

Table 5. Recommended dermal exposure values of US EPA (2004)

Exposure parameter		Central Tendency		RME* scenario	
		Residential	Industrial	Residential	Industrial
Soil concentration (mg/kg)		Site-specific values			
Event frequency (event/day)		1	1	1	1
Exposure (days/year)		Site-specific	219	350	250
Exposure duration (years)		9	9	30	25
Skin surface area (cm^2)	Adult	5,700	3,300	5,700	3,300
	Children	2,800	NA	2,800	NA
Soil adherence (mg/cm^2)	Adult	0.01	0.02	0.07	0.2
	Children	0.04	NA	0.2	NA
Dermal absorption fraction		Chemical specific value(ABS_d)			

NA: not applicable
*RME: Reasonable maximum exposure

Table 6. Recommended soil adherence factor (Unit: mg/cm^2)

		Adult	Children
US EPA	Residential	0.07[a], 0.01[b]	0.2[a], 0.04[b]
	Commercial / Industrial	0.2 (Outdoor worker)[a], 0.02[b]	
	Construction	0.3[a], 0.1[b]	
ASTM[c]		0.5	
RIVM[d]		Indoor: 0.056, Outdoor: 3.75	Indoor: 0.05, Outdoor: 0.51
EA[e]		Residential (16-59y) Indoor: 0.06, Outdoor: 0.3	Residential (0-16y) Indoor: 0.06, Outdoor: 1

[a] US EPA (2002b), [b] US EPA (2004), [c] ASTM (2002), [d] RIVM (2001), [e] EA (2005)

다. 독일은 미국, 네덜란드에 비해 낮은 1.4 L/day(16세 이상), 1-8세 어린이는 0.7 L/day를 적용하고 있다. 국내의 경우 음용수섭취량에 대한 조사가 일부 집단에 한하여 수행된 제한적인 결과로 대표성이 없다고 판단되어 국내의 대표성 있는 연구 자료가 제시될 때까지 미국, 네덜란드, ASTM에서 제시하고 있는 성인 2 L/day, 어린이 1 L/day로 적용할 것을 제안한다.

3.9. 호흡률(Inhalation Rate, CR_i)

호흡에 대한 실측조사는 어렵기 때문에 심박동수와 호흡률간의 회귀방정식을 이용한 간접적인 평가를 적용한다(국립환경과학원, 2006). US EPA에서는 단기간노출과 장기간노출로 나누어 호흡률을 권고하고 있다(Table 7). 미국과 네덜란드는 위해성 평가시 일일 호흡률을 20 m^3/day으로 제시하고 있고, ASTM에서는 실내 15 m^3/day, 실외에선 20 m^3/day으로 권장하고 있다. 독일은 활동의 정도 별로 일반적인 활동, 적당한 활동, 높은 활동 등 3가지로 분류하여 제시하고 있다. 영국은 연령별, 성별, 활동에 따른 호흡률을 상세히 제시하고 있는데, 연령별 단

Table 7. Recommended values for inhalation of US EPA (Long-term exposure)

Population		Mean
Infants	< 1 year	4.5
Children	1-2 years	6.8
	3-5 years	8.3
	6-8 years	10
	9-11 years male/female	14/13
	12-14 years male/female	15/12
	15-18 years male/female	17/12
Adult	19-65 years male/female	15.2/11.3

숨의 비율과 체중의 곱으로 시간당 호흡률을 계산한다(Eq 2). 여기에서 RR(Respiration Rate)은 호흡률, α_{act}는 연령과 활동 상태에 따른 다양한 단숨의 비율, 그리고 BW는 체중이다. α_{act}는 0-16세까지 활동시에는 0.03, 비활동시에는 0.011을 적용하며, 16-70세의 성인의 경우 활동시와 비활동시 각각 0.018, 0.006을 사용한다. 반면 국내에서는 호흡률에 관한 일부 연구가 수행되었으나 이는 소수의 대

상자에 한하여 수행된 연구로 대표성이 결여되었다고 판단되어 본 연구에서는 위해성 평가시 보편적으로 사용되고 있는 수치를 적용하여 성인은 20 m^3/day, 어린이의 경우 네덜란드에서 제시한 7.6 m^3/day(6세 이하)을 적용할 것을 권장한다.

$$RR = \alpha_{act} \times BW$$ Eq 2. 영국의 호흡률 산정식

3.10. 토양섭취량(Soil ingestion, CR_s)

토양섭취는 잠재적으로 인체가 오염물질에 노출되는 경로 중 하나이다. 특히 어린이에게 있어 토양과 실내분진의 섭취는 오염물질이 인체로 유입되는 주요 경로이다(EA, 2002; Paustenbach, 2000). 성인의 경우 식품이나 담배 또는 손을 통한 토양섭취가 이루어진다(US EPA, 1997). 어린이 중 토양을 먹는 습관이 있는 이식증 환자(Pica child)는 위해성 평가시 10 g/day를 적용할 것을 권고하고 있다. 각 나라별 적용하고 있는 토양섭취량은 성인의 경우 가장 적은 양과 가장 많은 양은 4배 정도 차이가 나타났다. 호주의 경우 가장 적은 25 mg/kg을, 미국은 주거지역에서 100 mg/kg을 제시하고 있다. 국내에서는 아직까지 토양섭취량에 관한 연구자료가 전무한 실정이며 따라서 본 연구에서는 RME를 토대로 US EPA에서 제안한 주거, 상업/상업 · 공업용지의 경우 각각 100, 50 mg/day으로 제안하고 어린이의 경우 200 mg/day, 이식증어린이는 10 g/day를 적용할 것을 권장한다.

3.11. 농작물 섭취(Food Intake)

오염된 토양에서 재배된 농작물은 인체가 토양오염물질에 노출되는 중요한 노출경로중 하나이다. Table 8은 내국인을 대상으로 수행된 국내자료로써 전국의 일평균 1인당 평균 섭취량을 나타낸 것이다. 국내에서 가장 섭취량이 큰 식품은 주식인 백미였고 그 뒤를 이어 배추김치가 2위를 차지했다. 식품섭취량은 지역별로 약간의 차이를 나타냈는데 백미의 경우 읍 · 면지역, 중소도시, 그리고 대도시 순으로 섭취량이 감소하는 경향을 나타냈으며 읍 · 면지역의 경우 전국평균보다 약 3% 정도 높은 섭취량을 나타냈다.

Table 8. Average food intake rate in a day (g/day-person) (MOHW, 2005)

No.	Food	Intake (g/day-person)
1	Polished Rice	205.7
2	Kimchi (Chinese cabbage)	90.3
3	Soybean Curd	24.5
4	Onion	20.6
5	Radish	20.3
6	Bean sprouts	16.4
7	Potato	13.9
8	Apple	13.5
9	Tomato	13.0
10	Spring onion	12.9
11	Orange	15.0
12	Spinach	11.0
13	Cucumber	10.2
14	Young pumpkin	9.7

4. 국내에 적용가능한 노출인자

인체노출량 계산에 필요한 노출인자는 국내의 인자값이 있거나 국내자료를 이용하여 산출이 가능하면 국내값을 제시하였고, 그 외의 값들은 외국 인자값을 수용체 및 토지이용도에 적합하도록 구분하여 Table 9과 같이 나타내었다. 신체관련인자인 체중과 체표면적은 평균값, 그리고 접촉률, 노출빈도, 노출기간은 상한치를 이용하였으며, 피부흡수계수는 물질별로 제시된 수치를 이용하거나 없는 경우 대표적 수치를 제시하였다. 평균수명, 체중, 그리고 체표면적 등은 국내기관 및 연구자에 의해서 연구된 값으로 한국인을 대표할 수 있는 수치이다. 그 외의 인자들은 국내에 적용하기에 적합한 수치를 제시하였다. 평균수명은 통계청의 생명표를 참고로 하였으나 위해성 평가시 안전성을 고려하여 70년으로 제안하였다. 노출기간은 발암물질의 경우 평생을 노출된다고 가정하기 때문에 평균수명인 70년을, 그리고 비발암물질의 경우 평균거주기간의 95% 상한치인 30년을 제시하였다. 노출빈도는 환경매체에 계속적으로 노출된다고 가정하여 주거지역은 365일, 상업·공업지역은 250일로 적용할 것을 제안하였다. 체중은 한국인인체지수조사사업을 통해 제시된 남녀 평균체중을 권고하였으며 체표면적은 한국인의 평균 체중과 신장을 이용하여 수식에 의해 산출하고 노출체표면적은 US EPA에서 권고하고 있는 수치를 제안하였다. 피부흡수계수는 물질의 특성에 관련된 수치이므로 외국기관에서 제시되어있는 값을 이용하여도 무방하다. 토양-피부간 흡착계수는 토양특성, 신체부위, 그리고 활동정도에 따라 영향을 받는 인자이나 국내에서 연구된 자료가 없어 US EPA에서 제시하고 있는 수치를 이용하였다. 또한 음용수 섭취량, 토양섭취량, 그리고 호흡율 등에 관한 인자도 국내의 대표성있는 자료가 생산된바 없어 국제적으로 보편적으로 적용하고 있는 수치를 제안하였다.

Table 9. Proposed exposure factor of Korean

Parameter	Residential/Agricultural		Industrial/ Commercial	Reference
	Adult	Children		
AT (years)	70		70	KNSO, 2005
ED (years)	30[a]	6 (non-cancer) [b]	25 [a]	a. NIER, 2006 b. US EPA, 2002b
EF (days/year)	365 [a]		250 [b]	a. US EPA, 1997 b. US EPA, 2002b
Bw (Kg)	60 [a]	15 [b]	60 [a]	a. NIER, 2006 b. MOICE, 2004
SA (cm^2)	17,000*	6,500*		* Calculated
SAe (cm^2)	5,700 [a, b]	2,800 [a, b]	3,300 [b]	a. US EPA, 2004 b. US EPA, 2002b
ABS_d (Unitless)		Cadmium: 0.001[a] Arsenic: 0.03[a] SVOCs : 0.1[a] VOCs: 0.5[b]		a. US EPA, 2004 b. ASTM, 2002
AF (mg/cm^2)	0.07	0.2	0.07	US EPA, 2004
CR_w (L/day)	2[a, b, c, d]	1 [a]	2 [a, b, c, d]	a. US EPA, 1997 b. US EPA, 2002b c. ASTM, 2002 d. RIVM, 2001
CR_i (m^3/day) (m^3/h)	20 [a] 0.83	7.6 [b] 0.32	20 [a] 0.83	a. US EPA, 1997 b. RIVM, 2001
CR_s (mg/day)	100 [a]	200[a] Pica child [a]: 10g/day	50[b]	a. US EPA, 1997 b. US EPA, 2002

5. 결 론

위해성평가는 오염물질에 대한 정량적인 평가를 수행하여 인체에 미치는 악영향을 과학적으로 평가할 수 있는 체계이다. 미국이나 영국, 네덜란드 등 외국의 경우 토양 위해성평가를 위한 위해성평가 절차를 마련하고, 위해성평가의 인체노출량 산정시 적용되는 인체노출인자를 제시하고 있다. 특히 미국의 경우 Exposure factor handbook 내에 노출인자에 대한 세분화된 자료를 제시하고 있다. 또한 다양한 통계치와 평가를 위한 권고치가 제시되어 있다. 미국, 영국, 그리고 네덜란드 등은 토양위해성평가 모델을 구축하고 위해성 평가를 위한 노출인자를 제시하고 있는데 특히 미국이나 영국은 노출인자를 연령별, 성별로 구분하여 자세하게 나타내고 있는 편이다. 반면 우리나라의 경우 한국인에 대한 노출인자에 대한 연구가 매우 부족하고, 다양한 노출인자 중 일부인 평균수명, 체중, 그리고 체표면적의 연구가 거의 전부인 형편이다. 노출인자는 평가 대상을 대표할 수 있는 수치로서 한국인을 대표할 수 있는 노출인자에 관하여 체계적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단되며, 또한 위해성평가시 적용되는 노출인자 값을 정형화하여 올바른 평가를 유도해야 할 것이다. 본 연구는 위해성평가의 중요한 단계인 노출평가에서 인체노출량 산정에 사용되는 여러 인체노출 인자자료를 종합하고 각 자료를 비교분석하여 한국인에게 적합한 노출인자 수치를 제안한 기반연구로, 토양오염 위해성평가를 수행할 때 국내 상황에 적합한 인체노출량 산정에 기여할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

국립환경과학원(NIER), 2006, 위해우려물질 평가기법연구(III).

산업자원부(MOICE), 2004, 제 5차 한국인 인체치수조사사업 보고서(2차년도 최종 보고서).

보건복지부(MOHW), 2005, 국민건강영양조사 제 3기-영양조사(I).

이주영, 2005, 한국인 성인남녀의 체표면적에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문.

이진수, 전효택, 2005, 오염된 토양, 지하수 및 쌀의 인체노출에 따른 비소의 위해성 평가, 자원환경지질, **38**(5), 535-545.

이효민, 김현정, 윤은경, 이근영, 박경아, 박신희, 김윤희, 구정완,

양지선, 양기화, 2003, 위해성평가를 위한 한국인의 노출인자 연구, 식품의약품안전청연구 보고서, **7**, 236-239.

통계청(KNSO), 2005, 2003년 생명표.

ASTM, 2002, Standard Guide for Risk-Based Corrective Action applied to Petroleum Release Sites, E 1739-95 (Reapproved), American Society for Testing and Material, PA, USA.

EA, 2005, CLEA UK Handbook (Draft), Support document for the CLEA UK software Beta Version 1.0, Environmental Agency, Bristol, United Kingdom.

EA, 2002, The contaminated land exposure assessment model (CLEA): Technical basis and algorithms, Environmental Agency, Bristol, United Kingdom.

Kulhánek, A., Trapp, S., Sismilich, M., Janku, J., and Zimová, M, 2005, Crop-specific human exposure assessment for polycyclic aromatic hydrocarbons in Czech soils. *Science of the Total Environ.*, **339**, 71-80.

NEPC, 1999, Guideline on Exposure Scenarios and Exposure Setting, National Environment Protection Council, Adelaide, South Australia.

Paustenbach, D.J., 2002, Human and ecological risk assessment: Theory and Practice, A John Wiley and Sons, New York.

RIVM, 2001, Evaluation and revision of the CSOIL parameter set, 711701 021, Research for Man and Environment, Bilthoven, The Netherlands.

Stubenrauch S., Koschmieder HJ., Bauer D., Doetsch P., Grunhoff D., Hempfling R., and Mahr A., 1997, The UMS system for exposure assessment in soil, *International Journal of Toxicology*, **16**, 375-389.

US EPA, 1996, Soil screening guidance: Technical background document, EPA/504/R-95/128, US Environmental Protection Agency, Washington DC, USA.

US EPA, 1997, Exposure factor handbook, EPA/600/8-89/043, US Environmental Protection Agency, Washington DC, USA.

US EPA, 2002a, Child-Specific Exposure Factors Handbook, EPA/600/P-00/002B, US Environmental Protection Agency, Washington DC, USA.

US EPA, 2002b, Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund site, US Environmental Protection Agency, Washington DC, USA.

US EPA, 2004, Risk Assessment Guidance for Superfund Volume: Human Health Evaluation Manual (Part E. Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment), EPA/540/R-99/005, US Environmental Protection Agency, Washington DC, USA.