

다양한 위해성평가 방법에 따라 도출한 오염토양 선별기준의 차이에 관한 연구 (I): 매체 간 이동현상 해석에 따른 차이

정재웅 · 류혜림 · 남경필*

서울대학교 건설환경공학부

Analysis on the Risk-Based Screening Levels Determined by Various Risk Assessment Tools (I): Variability from Different Analyses of Cross-Media Transfer Rates

Jae-Woong Jung · Hyerim Ryu · Kyoungphile Nam*

Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

Risk-based screening levels (RBSLs) of some pollutants for residential adults were derived with risk assessment tools developed by United States Environmental Protection Agency (USEPA), American Society for Testing and Materials (ASTM), and Korea Ministry of Environment (KMOE) and compared each other. To make the comparison simple, ingestion of soil, dermal contact with soil, outdoor inhalation of vapors, indoor inhalation of vapors, and inhalation of soil particulates were chosen as exposure pathways. The results showed that the derived RBSLs varied for every exposure pathway. For direct exposure pathways (i.e., ingestion of soil and dermal contact with soil), the derived RBSLs varied mainly due to the different default values for exposure factors and toxicity data. When identical default values for the parameters were used, the same RBSLs could be derived regardless of the assessment tools used. For inhalation of vapors and inhalation of soil particulates, however, different analysis methods for cross-media transfer rates were used and different assumptions were established for each tool, identical RBSLs could not be obtained even if the same default values for exposure factors were used. Especially for inhalation of soil particulates pathway, screening level derived using KMOE approach (most conservative) was approximately 5000~10000 times lower than the screening level derived using ASTM approach (least conservative). Our results suggest that, when deriving RBSL using a specific tool, it is a prerequisite to technically review the analysis methods for cross-media transfer rates as well as to understand how the assessment tool derives the default values for exposure factors.

Key words: Risk assessment, Risk-based screening level, Default values for exposure factors, Analysis of the cross-media transfer rates of contaminants

1. 서 론

오염토양 선별기준(Risk-Based Screening Level, RBSL)은 공공보건 및 환경을 보호할 수 있는 토양오염물질의 기준농도로써, 미 환경청(United States Environmental Protection Agency; USEPA)에서는 오염토양 선별기준을 토양오염에 대한 정밀조사 혹은 정화작업 등의 추가적인

관리가 필요하지 않은 수준의 오염농도로 정의하고 있다(USEPA, 1996a). USEPA에서는 1991년 오염토양 선별기준의 일종인 Preliminary Remediation Goal(PRG)을 도출하는 지침을 제작하였으며(USEPA, 1991), 이후 미국재료시험협회(American Society for Testing and Material; ASTM)에서도 위해성평가를 통해 오염토양 선별기준을 도출할 수 있는 지침을 발간하였다(ASTM, 1995). 우리나라

*Corresponding author : kpnam@snu.ac.kr

원고접수일 : 2010. 10. 26 심사일 : 2011. 3. 13 게재승인일 : 2011. 3. 16
질의 및 토의 : 2011. 6. 30 까지

환경부에서도 2006년 “토양오염 위해성평가지침”을 제작하여 위해성평가를 통해 오염토양 선별기준을 도출할 수 있도록 하고 있다(환경부, 2006).

오염토양 선별기준은 1) 목표위해도(예: 목표발암위해도(target risk), 목표비발암위해도(target hazard quotient)), 2) 오염물질의 독성치(예: oral slope factor(SF_o), inhalation slope factor(SF_i), dermal slope factor(SF_{abs}), inhalation unit risk(IUR), 1:10⁻⁴ lifetime excess cancer risk oral(CR_{oral}), 1:10⁻⁴ lifetime excess cancer risk inhalation(CR_{inhal}), oral reference dose(RfD_o), inhalation reference dose(RfD_i), dermal reference dose(RfD_{abs}), reference concentration(RfC), tolerable daily intake(TDI) 및 tolerable concentration in air(TCA)), 3) 수용체 노출인자(exposure factors) (예: 체중(body weight), 노출빈도(exposure frequency), 노출기간(exposure duration), 수명(lifetime), 노출시간(exposure time), 토양섭취율(soil ingestion rate), 체표면적(skin surface area), 토양접촉계수(soil adherence factor) 및 피부흡수계수(dermal absorption factor)), 그리고 4) 오염물질의 매체 간 이동인자(cross-media transfer factors) (예: 비산계수(particulate emission factor) 및 휘발계수(volatilization factor))로 이루어진 선별기준식(screening equations)에 각 인자별 기본값(default values)을 대입하여 도출할 수 있다. 비록 위해성평가의 개념 및 그 활용을 위한 기본적인 식(equations)은 동일하다고 하더라도, 각 지침마다 서로 다른 가정을 통해 구체적인 선별기준식을 결정하고 그 계산을 위해 필요한 보수적인 기본값을 제공하고 있다. 따라서 어떤 방법(지침)을 사용하였는지에 따라 동일한 수용체(receptor)와 노출경로(exposure pathway)에 대한 오염토양 선별기준이, 비록 정도의 차이는 있으나 서로 다르게 도출된다. 특히, 주어진 식에 필요한 파라미터 값들을 단순히 대입하여 계산을 하는 것은 지침을 오역할 소지가 많아 위해성평가의 신뢰성을 낮추고, 그 오차를 더 크게 만들 수 있다. 따라서 위해성평가를 통해 신뢰성 있는 오염토양 선별기준을 도출하기 위해서는, 각 지침에서 수립한 기본적인 가정을 충분히 이해하고, 오염 토양과 수용체의 특성을 잘 반영할 수 있는 방안을 찾아 적용하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 USEPA, ASTM 및 우리나라 환경부에서 발행한 위해성평가 지침을 이용하여 주거지역(residential area) 성인을 기준으로 한 오염토양 선별기준을 도출하였다. 또한, 각 지침 별로 수립한 가정의 차이점을 분석함으로써 이들을 이용하여 도출한 오염토양 선별기준에 차이가 나는 이유를 규명하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 USEPA, ASTM 및 우리나라 환경부(Korea Ministry of Environment; KMOE)에서 현재 사용하는 지침을 이용하여 주거지역의 노출경로별 오염토양 선별기준을 도출하였으며, 수용체로는 성인만을 고려하였다. 각 기관에서 발간 또는 사용하고 있는 가장 최근의 지침에는 미국의 Oak Ridge National Laboratory(ORNL)가 기존의 USEPA 지침들을 모아 2008년에 작성하고 2010년 11월에 최종 갱신한 Regional Screening Table: User's Guide(ORNL, 2010), ASTM의 Standard Guide for Risk-Based Corrective Action(Designation: E 2081-00(Reapproved 2004)(ASTM, 2004) 및 토양오염 위해성평가지침(환경부예규 제383호(2009.8.20))(환경부, 2009) 등이 있다. ASTM에서는 오염토양 선별기준을 제시하는 지침으로 Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites(Designation E 1739-95(Reapproved 2002))도 제공하고 있으나, 이 지침은 유류오염지역에 대해서만 적용되므로 본 연구에서는 이용하지 않았다. 각 지침을 이용한 선별기준을 도출하기 위해 각각의 지침에 명시된 선별기준식과 기본값을 사용하였으며, 목표발암위해도(Target Risk; TR)와 목표비발암위해도(Target Hazard Quotient; THQ)는 각각 10⁻⁶과 1로 설정하였다.

오염물질로는 현재 국내에서 규제되고 있는 토양오염물질 중 벤젠(benzene), 에틸벤젠(ethylbenzene; EB), 페놀(phenol), 벤조(a)피렌(benzo[a]pyrene; BaP), 비소(arsenic; As), 카드뮴(cadmium; Cd), 수은(mercury; Hg) 및 불소(fluorine; F)를 선정하였다. 벤젠과 에틸벤젠은 국내에서 규제하고 있는 휘발성유기화합물질(Volatile Organic Compound; VOC)의 대표물질로, 페놀과 벤조(a)피렌은 국내에서 규제되고 있는 준휘발성유기화합물질(Semi-Volatile Organic Compounds; SVOC)의 대표물질로 선택하였다. 중금속 중 비소와 카드뮴을 선택한 이유는 이 두 중금속이 국내에서 규제되고 있는 중금속 중 피부흡수계수가 알려져 있는 물질이기 때문이며, 수은은 중금속 중 유일하게 휘발성이 있는 물질이므로 선택하였다. 불소는 비금속 무기오염물질의 대표물질로서 선택되었다. 각 지침마다 이들 물질의 물리화학적 특성치(physicochemical properties)와 독성치(toxicological values)를 서로 다르게 사용하고 있으나, 본 연구에서는 이를 동일하게 설정하였으며 그 값을 Table 1에 나타내었다.

노출경로로는 세 지침에서 공통적으로 고려하는 주거지

Table 1. Physicochemical properties and toxicological values of soil contaminants investigated in this study

Pollutant	Physicochemical properties							
	Type	H ⁵⁾ (unitless)	D _a ⁶⁾ (cm ² /s)	D _w ⁷⁾ (cm ² /s)	K _d ⁸⁾ (L/kg)	K _{oc} ⁹⁾ (L/kg)	GIABS ¹⁰⁾ (unitless)	ABS _d ¹¹⁾ (unitless)
Benzene	VOC ¹⁾	2.3E-01	9.0E-02	1.0E-05	-	1.5E+02	1	0.5 ¹²⁾
EB	VOC	3.2E-01	6.8E-02	8.5E-06	-	4.5E+02	1	0.5 ¹²⁾
Phenol	SVOC ²⁾	1.9E-05	-	-	-	1.9E+02	1	0.1 ¹³⁾
B(a)P	SVOC	1.4E-05	-	-	-	5.9E+05	1	0.13 ¹³⁾
As	NVI ³⁾	-	-	-	2.9E+01	-	1	0.03 ¹³⁾
Hg	VI ⁴⁾	4.7E-01	3.1E-02	6.3E-06	5.2E+01	-	1	-
Cd	NVI	-	-	-	7.5E+01	-	0.025	0.001 ¹³⁾
F	NVI	-	-	-	-	-	1	-

Pollutant	Toxicological values									
	SF _o ¹⁴⁾ (mg/kg-day) ⁻¹	SF _{abs} ¹⁵⁾ (mg/kg-day) ⁻¹	IUR ¹⁶⁾ (μg/m ³) ⁻¹	SF _i ¹⁷⁾ (mg/kg-day) ⁻¹	CR _{inhal} ¹⁸⁾ (μg/m ³)	RfD _o ²¹⁾ (mg/kg-day)	RfD _{abs} ²²⁾ (mg/kg-day)	RfC _i ²³⁾ (mg/m ³)	RfD _i ²⁴⁾ (mg/kg-day)	TCA ²⁵⁾ (μg/m ³)
Benzene	5.5E-02	5.5E-02	7.8E-06	2.7E-02	20 ¹⁹⁾	4.0E-03	4.0E-03	3.0E-02	8.6E-03	-
EB	1.1E-02	1.1E-02	2.5E-06	8.8E-03	-	1.0E-01	1.0E-01	1.0E+00	2.9E-01	770 ¹⁹⁾
Phenol	-	-	-	-	-	3.0E-01	3.0E-01	2.0E-01	5.7E-02	20 ¹⁹⁾
B(a)P	7.3E+00	7.3E+00	1.1E-03	3.9E+00	2.33 ²⁰⁾	-	-	-	-	-
As	1.5E+00	1.5E+00	4.3E-03	1.5E+01	-	3.0E-04	3.0E-04	1.5E-05	4.3E-06	1 ¹⁹⁾
Hg	-	-	-	-	-	1.6E-04	1.6E-04	3.0E-04	8.6E-05	0.2 ¹⁹⁾
Cd	-	-	1.8E-03	6.3E+00	-	1.0E-03	2.5E-05	1.0E-05	2.9E-06	2.33 ²⁶⁾
F	-	-	-	-	-	6.0E-02	6.0E-02	1.3E-02	3.7E-03	-

1) Volatile organic compound

2) Semi-volatile organic compound

3) Non-volatile inorganic

4) Volatile inorganic

5) Dimensionless Henry's law constant

6) Diffusivity in air

7) Diffusivity in water

8) Soil-water partition coefficient

9) Organic carbon-water partition coefficient

10) Fraction of contaminant absorbed in gastrointestinal tract

11) Dermal absorption factor

12) These values are adapted from ASTM (2002).

13) These values are adapted from ORNL (2010).

14) Oral slope factor; All values are adapted from ORNL (2010).

15) Dermal slope factor; All values are determined by dividing SF_o value by pollutant-specific GIABS.

16) Inhalation unit risk; All values are adapted from ORNL (2010).

17) Inhalation slope factor; All values are determined by multiplying IUR by inhalation conversion factor (70000 kg-μg / 20 m³-mg).18) 1 : 10⁻⁴ lifetime excess cancer risk inhalation

19) These values are adapted from Lijzen et al. (2007).

20) This value is calculated route-to-route extrapolation (i.e., This value is derived by multiplying CR_{oral} by inhalation conversion factor (70 kg / 20 m³ × 100 / 75).

21) Oral reference dose; All values are adapted from ORNL (2010).

22) Dermal reference dose; All values are determined by multiplying RfD_o value by pollutant-specific GIABS.

23) Inhalation reference concentration; All values are adapted from ORNL (2010).

24) Inhalation reference dose; All values are determined by multiplying RfC_i by inhalation conversion factor (20 m³ / 70 kg).

25) Tolerable Concentration in air

26) This value is calculated by route-to-route extrapolation (i.e., This value is derived by multiplying TDI by inhalation conversion factor (70 kg / 20 m³ × 100 / 75).

역에서의 노출을 설정하였으며, 구체적으로는 토양섭취
(ingestion of soil), 토양접촉(dermal contact with soil),

가스상 오염물질의 실내 및 실외흡입(indoor and outdoor
inhalation of soil vapors)과 비산먼지 흡입(inhalation of

Table 2. Screening value for the ingestion of soil derived using USEPA (1996a), ASTM (2002), and KMOE (2009) approach (unit: mg/kg)

Pollutant	Carcinogenic effect		
	USEPA	ASTM	KMOE
Benzene	3.10E+01	6.19E+01	2.55E+01
EB	1.55E+02	3.10E+02	1.27E+02
B(a)P	2.33E-01	4.67E-01	1.92E-01
As	1.14E+00	2.27E+00	9.33E-01
Pollutant	Non-carcinogenic effect		
	USEPA	ASTM	KMOE
Benzene	2.92E+03	5.84E+03	2.40E+03
EB	7.30E+04	1.46E+05	6.00E+04
Phenol	2.19E+05	4.38E+05	1.80E+05
As	2.19E+02	4.38E+02	1.80E+02
Hg	1.17E+02	2.34E+02	9.60E+01
Cd	7.30E+02	1.46E+03	6.00E+02
F	4.38E+04	8.76E+04	3.60E+04

fugitive dust)이다. 각 지침에서 제공하는 위해성평가를 위한 식(equations)과 기타 조건들은 [보충자료]에 명시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양섭취에 대한 오염토양 선별기준

세 지침을 이용하여 도출한 토양섭취에 대한 오염토양 선별기준을 Table 2에 나타내었다. 본 연구의 평가대상 오염물질 모두에 대해서, 발암 및 비발암위해도를 고려한 선별기준은 ASTM 지침에 따라 산정된 오염토양 선별기준이 가장 높고 그 다음은 USEPA 지침, 우리나라 지침의 순이었으며, 각 지침을 이용하여 도출한 선별기준 간의 차이는 3배 이내였다. 이와 같이 선별기준에 차이가 발생하는 이유는 각 지침에서 사용하는 수용체의 체중, 노출빈도 및 토양섭취율의 기본값이 서로 다르기 때문이다. USEPA와 ASTM 지침에서는 성인 체중과 노출빈도의 기본값으로 각각 70 kg과 350일을 사용하는 반면(ASTM, 2004; ORNL, 2010), 우리나라 지침에서는 60 kg과 365일을 사용한다(환경부, 2009). 또한, USEPA와 우리나라 지침에서는 성인의 토양섭취율 기본값으로 100 mg/day를 사용하지만(환경부, 2009; ORNL, 2010), ASTM 지침에서는 50 mg/day를 사용한다(ASTM, 2004). 세 지침은 모두 동일한 토양섭취 선별기준식을 사용하기 때문에 노출인자 기본값을 동일하게 설정하면 어떤 지침을 사용해도 동일한 오염토양 선별기준을 얻을 수 있다.

Table 3. Screening value for the dermal contact with soil derived using USEPA (1996a), ASTM (2002), and KMOE (2009) approach (unit: mg/kg)

Pollutant	Carcinogenic effect		
	USEPA	ASTM	KMOE
Benzene	1.55E+01	3.92E+00	1.28E+01
EB	7.76E+01	1.96E+01	6.38E+01
B(a)P	4.50E-01	2.95E-01	4.81E-01
As	9.49E+00	2.40E+00	7.80E+00
Pollutant	Non-carcinogenic effect		
	USEPA	ASTM	KMOE
Benzene	1.46E+03	3.70E+02	1.20E+03
EB	3.66E+04	9.24E+03	3.01E+04
Phenol	5.49E+05	1.39E+05	4.51E+05
As	1.83E+03	4.62E+02	1.50E+03
Cd	4.57E+03	4.62E+04	3.76E+03

3.2. 토양접촉에 대한 오염토양 선별기준

세 지침을 이용하여 도출한 토양접촉에 대한 오염토양 선별기준을 Table 3에 나타내었다. 수은과 불소에 대한 피부흡수계수가 알려져 있지 않아 이들 오염물질의 토양 접촉에 대한 오염토양 선별기준은 도출할 수 없었다. 토양섭취에 대한 오염토양 선별기준 도출 시, 토양접촉과 마찬가지로 각 지침마다 사용하는 기본값에 차이가 있었고, 이로 인해 각 지침을 이용하여 도출한 선별기준 간에 약 3배 이내의 차이가 발생하였다. 오염토양의 섭취보다 접촉에 대한 선별기준의 차이가 더 큰 이유는, 전자는 성인 체중과 노출빈도만이 필요한 반면 후자의 경우에는 토양과 접촉하는 체표면적 및 토양접촉계수가 더 필요하며, 각 지침에서 사용하는 그 기본값들이 다르기 때문이다. USEPA와 우리나라 지침에서는 주거지 성인 체표면적과 토양접촉계수의 기본값으로 각각 5,700 cm²과 0.07을 사용하나(환경부, 2009; ORNL, 2010), ASTM 지침에서는 3,160 cm²과 0.5를 사용하고 있다(ASTM, 2004). 이와 같이 USEPA와 ASTM에서 사용하는 주거지 성인 체표면적이 다른 이유는 토양과 접촉하는 신체부위를 서로 달리 설정하기 때문이다. USEPA에서는 토양과 접촉하는 신체부위로 얼굴(face), 전박(forearms), 손(hands), 종아리(lower legs) 및 발(foot)을 가정하며, ASTM에서는 토양과 접촉하는 신체부위로 머리(head), 손(hands) 및 전박(forearms)을 가정한다(USEPA, 1996b, ASTM, 2002). 우리나라에서는 USEPA의 지침에 명시된 토양체표면적의

기본값을 그대로 사용하고 있다(환경부, 2009).

특히, 카드뮴의 경우 ASTM 지침을 이용하여 도출된 선별기준이 USEPA나 우리나라 지침을 이용하여 도출된 기준보다 10배 이상 낮았는데, 이는 사용하는 독성인자의 종류가 다르기 때문이다. ASTM 지침에서는 토양접촉에 대한 오염물질의 발암독성인자와 비발암독성인자로 각각 SF_o와 RfD_o를 사용하는 반면(ASM, 2004), USEPA 지침에서는 토양접촉에 대한 오염물질의 발암독성인자와 비발암독성인자로 각각 SF_o/GIABS와 RfD_o X GIABS를 사용한다(ORNL, 2010). 여기서 GIABS는 fraction of contaminant absorbed in gastrointestinal tract의 약자이다. 또한, 우리나라 지침에서는 토양접촉에 대한 오염물질의 발암독성인자와 비발암독성인자로 각각 SF_{abs}와 RfD_{abs}를 사용한다(환경부, 2009). SF_{abs}와 RfD_{abs} 값을 도출한 방법에 대해서는 지침에 명시되어 있지 않지만, SF_{abs}는 SF_o/GIABS와 값이 일치하였고, RfD_{abs}는 RfD_o X GIABS와 값이 일치하였다. 따라서 우리나라 지침에서 사용하는 독성인자와 일치한다고 볼 수 있다. 그러므로 GIABS 값이 0.025인 카드뮴의 경우 어떤 지침을 사용하였는지에 따라 토양접촉에 대한 오염도양 선별기준이 크게 변화하게 된다. 그렇지만, 세 지침 모두 토양접촉에 대해 동일한 선별기준식을 사용하기 때문에 오염물질의 독성인자와 노출인자 기본값을 동일하게 설정하고, GIABS 개념을 도입하느냐 하지 않느냐의 문제를 결정하면 어떤 지침을 사용해도 동일한 오염도양 선별기준을 도출할 수 있다.

3.3. 가스상 오염물질의 실외흡입에 대한 오염도양 선별 기준

세 지침을 이용하여 도출한 가스상 오염물질의 실외흡입에 대한 오염도양 선별기준을 Table 4에 나타내었다. 우리나라 지침 > ASTM 지침 > USEPA 지침의 순으로 오염도양 선별기준이 높게 도출되었으며, USEPA 지침과 ASTM 지침을 이용하여 도출한 선별기준은 약 2배 정도의 차이가 발생한 반면, 우리나라 지침과 USEPA 지침을 이용하여 도출한 선별기준은 약 20~80배 정도의 차이가 발생하였다. 이와 같이 세 지침을 이용하여 도출한 선별기준에 차이가 발생하는 것은 각 지침마다 가스상 오염물질의 실외휘발에 대한 해석을 달리하는 것이 주된 원인이며, 사용하는 노출인자의 기본값과 사용하는 독성인자의 종류의 차이가 부차적인 원인이다.

Table 4. Screening value for the outdoor inhalation of soil vapors derived using USEPA (1996a), ASTM (2002), and KMOE (2009) approach (unit: mg/kg)

Pollutant	Carcinogenic effect		
	USEPA	ASTM	KMOE
Benzene	1.20E+00	2.30E+00	2.28E+01
EB	6.12E+00	1.06E+01	2.06E+02
Pollutant	Non-carcinogenic effect		
	USEPA	ASTM	KMOE
Benzene	1.21E+02	2.03E+02	5.35E+03
EB	6.55E+03	1.13E+04	5.14E+05
Hg	1.03E+01	1.40E+01	3.84E+02

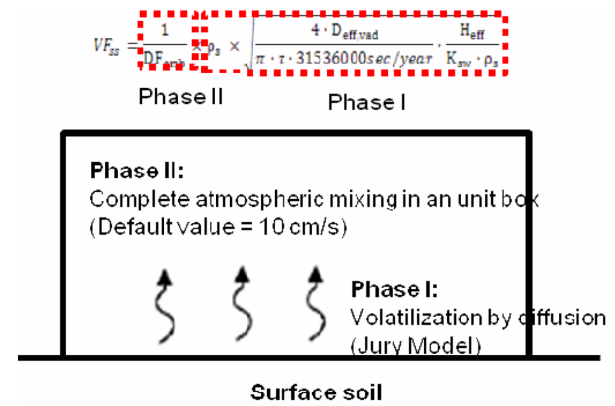


Fig. 1. Graphical expression of volatilization factor equation of ASTM (2002).

3.3.1. 가스상 오염물질의 매체 간 이동에 대한 해석의 차이

(1) ASTM

ASTM 지침에서는 표토에서의 휘발계수(VF_{ss})를 식 (1)과 같이 표현하며, 식 (1)은 오염물질이 토양표면에서 diffusion에 의해 휘발되는 단계(Phase I)와 휘발된 오염물질이 대기 중에서 확산되는 단계(Phase II)로 Fig. 1과 같이 구분된다.

$$VF_{ss} = \frac{1}{DF_{smb}} \times \rho_s \times \sqrt{\frac{4 \cdot D_{eff,vad}}{\pi \cdot \tau \cdot 31536000 \text{ sec/year}}} \cdot \frac{H_{eff}}{K_{sw} \cdot \rho_s} \quad (1)$$

여기서,

- VF = volatilization factor, surfacial soil to ambient air (g/cm³)
- DF_{amb} = dispersion factor for ambient air (cm/s)
- ρ_s = bulk density (g/cm³)
- D_{eff,vad} = effective diffusivity – vadose zone (cm²/s)
- τ = exposure interval (year)

H_{eff} = effective Henry's law constant

K_{sw} = soil to water partition coefficient (cm^3/g)

이다.

ASTM에서는 diffusion에 의해 지표면에서 대기로 휘발이 일어나는 flux(Phase I)를 도출하는 식으로 Jury Volatilization Model을 사용하고 있다. Jury Volatilization Model은 USEPA의 지원 하에 개발된 모델로, 노출기간 동안 휘발이 일정한 속도로 계속 발생한다고 가정하며 (USEPA, 1996b), 오염물질의 유효확산계수($D_{eff,vad}$), 노출 시간(τ), 유효헨리상수(H_{eff}), 토양-물 분배계수(K_{sw}) 및 토양 용적밀도(ρ_b)의 함수로 이루어진다(ASTM, 2004). 이 때, 주의해야 할 점은 오염물질의 확산계수로 유효확산계수를 액상분배계수(liquid-phase partition coefficient)로 나누어 산정한 확산계수를 사용한다는 점이다. 오염물질 액상분배계수(liquid-phase partition coefficient)는 H_{eff} 를 K_{sw} 와 ρ_b 의 곱으로 나누면 산정된다(ASTM, 2004).

ASTM 지침에서는 유한한 공간 내에서 가스상 오염물질이 완전하게 혼합됨(steady well-mixed dispersion)을 가정한 "Box Model"을 이용하여 가스상 오염물질의 확산(Phase II)을 해석한다(ASTM, 2004). 이 때, ASTM 지침에서는 unit box 내에서 가스상 오염물질의 확산 속도를 dispersion factor(DF_{amb})로 표현하며, 기본적으로 $10(g\cdot cm^{-2}/s)/(g/cm^3)$ 을 사용한다(ASTM, 2004).

(2) USEPA

USEPA 지침에서는 휘발계수(Volatilization Factor; VF)를 식 (2)와 같이 표현하며, 식 (2)는 오염물질이 토양표면에서 diffusion에 의해 휘발되는 단계(Phase I)와 휘발된 오염물질이 대기 중에서 확산되는 단계(Phase II)로 Fig. 2와 같이 구분된다(USEPA, 1996a).

$$VF = Q/C \times \frac{(3.14 \times D_A \times T)^{1/3} \times 10^{-4} \left(\frac{m^2}{cm^2} \right)}{2 \times \rho_b \times D_A} \quad (2)$$

여기서,

VF = volatilization factor (m^3/kg)

Q/C = inverse of the mean concentration at the center of a 0.5-acre-square source ($g/m^2\cdot s$ per kg/m^3)

D_A = apparent diffusivity (cm^2/s)

T = exposure interval (s)

ρ_b = bulk density (g/cm^3)

이다.

$$VF (m^3/kg) = Q/C \times \frac{(3.14 \times D_A \times T)^{1/2} \times 10^{-4} (m^2/cm^2)}{(2 \times \rho_b \times D_A)}$$

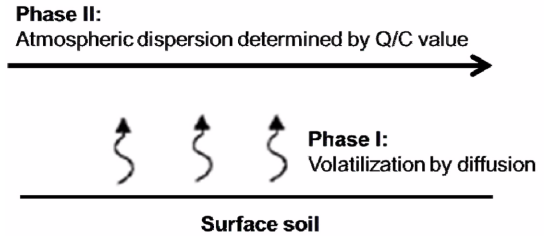


Fig. 2. Graphical expression of volatilization factor equation of USEPA (1996a).

USEPA 지침에서는 ASTM 지침과 마찬가지로 diffusion에 의해 휘발이 일어나는 flux(Phase I)를 도출하는 식으로 Jury Volatilization Model을 사용하고 있다(USEPA, 1996b). 이 때 주의해야 할 점은 오염물질의 확산계수로 유효확산계수(effective diffusivity)가 아닌 겉보기 확산계수를 사용하고 있다는 점이며, 겉보기 확산계수는 유효확산계수를 액상분배계수(liquid-phase partition coefficient)로 나누어 산정할 수 있다(USEPA, 1996b).

USEPA 지침에서는 휘발된 오염물질이 대기 중에서 확산되는(Phase II) 정도를 산정할 때 Box Model에 들어가는 오염원의 폭, 풍속 및 대기 혼합 높이에 대한 기본값을 일정하게 가정하는 것은 매우 다양한 부지 유형과 기상학적 특징을 반영하지 못한다는 이유(USEPA, 1996b)로 1996년부터 Box Model 대신 Q/C(inverse of the mean concentration at center of square source) 값을 채택하여 현재까지도 사용하고 있다(ORNL, 2010). Q/C는 오염도양에서 휘발되는 가스상 오염물질의 flux 당 대기 중 존재하는 가스상 오염물질의 역수로써 기상학적 조건에 따라 결정되는 값이다(USEPA, 1996b).

Eklund et al.(1991)은 미국 내 50개 부지에서 토양오염물질의 대기로의 emission flux를 실측하였고, USEPA에서는 이 조사 자료를 바탕으로 29개 Superfund 오염부지에서 오염면적에 따른 대기 중 가스상 오염물질의 농도를 모델링하여 Q/C를 구하는 식을 식 (3)과 같이 제시하였다 (USEPA, 1996a).

$$Q/C = A \times \frac{(\ln A_{site} - B)^2}{C} \quad (3)$$

여기서,

Q/C = inverse of the mean concentration at the center of a 0.5-acre-square source ($g/m^2\cdot s$ per kg/m^3)

A, B, C = constants based on air dispersion modeling
(unitless)

A_{site} = areal extent of the site or contamination (acres)

이다.

USEPA에서는 식 (3)을 이용하여 29개 오염부지에서 Q/C를 산정하였으며, 이 중 상위 90%에 해당하는 지점 (Los Angeles)에서의 Q/C(68.81 g/m²-s per kg/m³)를 기본값으로 설정하였다(USEPA, 1996b). USEPA에서는 이렇게 도출한 Q/C값과 Jury Volatilization Model을 바탕으로 VF를 구하는 식을 식 (3)과 같이 제시하였으며, wind tunnel 시험을 통해 식 (3)이 적합한 식임을 검증하였다(USEPA, 1996b).

(3) 우리나라

우리나라 지침에서는 가스상 휘발계수(volatilization factor)라는 파라미터를 사용하는데, 그 식이 어떻게 도출되었는지에 대한 설명이 언급되어 있지 않지만, 제시된 식은 ASTM이 유류오염지역에서 선별기준을 도출하기 위해 사용하는 식과 동일하다(ASTM, 2002; 환경부, 2009). USEPA와 ASTM 지침에서는 지표면에서 대기로의 확산을 고려하지만, 우리나라 지침에서는 지표 하 일정 심도에서 지표면까지 확산에 의해 오염물질이 이동하고 지표면까지 상승한 오염물질이 모두 대기로 휘발된다고 가정한다. 또한 대기로 휘발된 오염물질은 바람에 의해 unit box 내에서 균일하게 혼합된다고 가정한다(ASTM, 2002; 환경부, 2009). 우리나라 지침에서 가정하는 오염물질의 휘발 과정을 Fig. 3에 시각적으로 표현하였다.

우리나라 지침에서는 휘발된 오염물질이 대기 중에서 확산되는 정도를 산정하기 위해 단일 공간 내에서 가스상 오염물질의 확산을 풍속(wind speed above ground surface in ambient mixing zone; U_{air}), 대기 혼합고(ambient air mixing zone height), 오염원의 폭(width of source area parallel to wind direction; W) 및 오염원의 깊이(depth to subsurface soil sources; L_s)의 함수로 표현한다. 우리나라 지침에서는 풍속과 대기 혼합 높이의 기본값으로 각각 240 cm/s와 200 cm를 제시하고 있지만, 오염원의 폭과 오염원의 깊이의 기본값은 제시하지 않았다(환경부, 2009). 이에 본 연구에서는 오염원의 폭과 깊이의 기본값으로 ASTM 지침에 명시된 수치를 사용하였으며, 그 값은 각각 4,500 cm과 100 cm이다(ASTM, 2004). 2002년에 발간된 ASTM 지침에서는 오염원의 폭에 대한 기본값으로 1,500 cm를 사용하였지만(ASTM, 2002), 가장 최근의 ASTM 지침에서는 4,500 cm를 사용

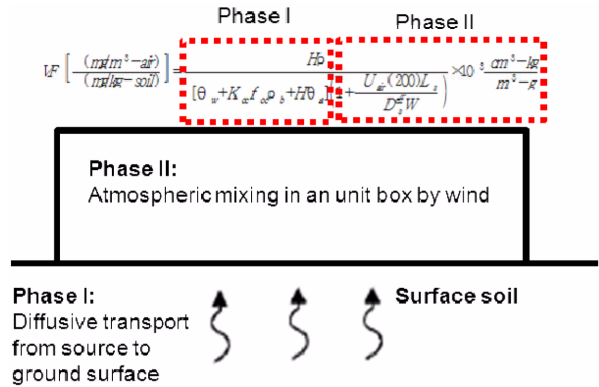


Fig. 3. Graphical expression of volatilization factor equation of KMOE (2009).

하며(ASTM, 2004), USEPA에서도 기본 오염면적을 45 m × 45 m로 가정하고 있으므로(USEPA, 1996b), 본 연구에서도 4,500 cm를 오염원의 폭에 대한 기본값으로 사용하였다.

3.3.2. 노출인자 기본값의 차이

가스상 오염물질의 실외흡입에 대한 오염도양 선별기준을 도출할 때 USEPA 지침과 ASTM 지침에서는 체중이 70 kg인 성인이 하루 24시간 동안 30년간 오염물질에 노출된다고 가정하지만(ASTM, 2004; ORNL, 2010), 우리나라 지침에서는 체중이 60 kg인 성인이 하루에 1.14시간 동안만 오염물질에 노출된다고 가정한다. 또한, 우리나라 지침에서는 특정한 노출기간을 반영하지 않고 평생 동안 노출이 일어나는 것을 가정하고 있다(환경부, 2009).

우리나라 지침에서 사용하는 휘발계수 산정식은 1995년에 발간된 ASTM 지침에 명시된 휘발계수 산정식과 동일하다(ASTM, 1995; 환경부, 2009). 그러나 USEPA에서 1996년에 발간된 지침(USEPA, 1996b)과 ASTM에서 1998년(ASTM, 1998)에 발간된 지침에서는 Jury Volatilization Model을 사용하기로 결정하였다. 따라서 가스상 오염물질의 실외흡입에 대한 선별기준을 도출하기 위해서는 각 기관에서 발간된 최신의 지침들에서 명시된 휘발계수 산정식에 대한 사전검토가 필요하다고 할 수 있다.

3.3.3. 독성인자 종류의 차이

가스상 오염물질의 흡입에 관한 위해도는 오염물질의 흡입독성과 관계가 있다. 그러나 발암독성은 oral slope factor(SF₀)로, 비발암독성은 oral reference dose(RfD₀)로 표현하는 경구독성과는 달리, 오염물질의 흡입독성을 표현하는 방법은 여러 가지가 있으며 세 지침은 서로 다른

방법으로 흡입독성을 표현한다. USEPA에서는 발암흡입독성과 비발암흡입독성으로 각각 IUR과 RfC를 사용한다(ORNL, 2010). IUR과 RfC는 USEPA의 Integrated Risk Information System(IRIS) 등 독성치 제공기관에서 제시하는 독성인자로 USEPA는 이들 인자를 변형하지 않고 사용하고 있다(ORNL, 2010). IUR과 RfC의 단위는 각각 $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$ 및 mg/m^3 으로, 인체가 흡입하는 공기 중 오염물질의 농도를 기준으로 도출된 독성인자이다.

반면, ASTM에서는 발암흡입독성인자와 비발암흡입독성인자로 각각 SF_i 와 RfC_i 를 사용하고 있다(ASM, 2004). SF_i 의 단위는 SF_o 의 단위와 동일한 $(\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{day})^{-1}$ 로, 식 (4)를 통해 도출된다.

$$SF_i = IUR \times BW / IR \times 1000 (\mu\text{g}/\text{m}^3) \quad (4)$$

여기서,

SF_i = inhalation slope factor $(\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{day})^{-1}$

IUR = inhalation unit risk $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$

BW = body weight (kg); USEPA's default value of body weight (70 kg)

IR = inhalation rate (m^3/day) ; USEPA's default value of inhalation rate $(20 \text{ m}^3/\text{day})$

이다.

우리나라 지침에서는 발암흡입독성인자와 비발암흡입독성인자로 각각 SF_i 와 RfD_i 를 사용하고 있다(환경부, 2009). RfD_i 의 단위는 RfD_o 의 단위와 동일한 $(\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{day})$ 로, 식 (5)를 통해 도출된다.

$$RfD_i = RfC_i \times IR / BW \quad (5)$$

여기서,

RfD_i = inhalation reference dose $(\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{day})$

RfC = inhalation reference concentration (mg/m^3)

BW = body weight (kg); USEPA's default value of body weight (70 kg)

IR = inhalation rate (m^3/day) ; USEPA's default value of inhalation rate $(20 \text{ m}^3/\text{day})$

이다.

3.4. 가스상 오염물질의 실내흡입에 대한 오염토양 선별 기준

세 지침을 이용하여 도출한 가스상 오염물질의 실내흡입에 대한 오염토양 선별기준을 Table 5에 나타내었다. USEPA 지침을 이용한 선별기준과 ASTM 지침을 이용한 선별기준은 큰 차이를 보이지 않았으나(1.5배 이하), 우리

Table 5. Screening value for the indoor inhalation of soil vapors derived using USEPA (1996a), ASTM (2002), and KMOE (2009) approach (unit: mg/kg)

Pollutant	Carcinogenic effect		
	USEPA	ASTM	KMOE
Benzene	1.33E-02	1.79E-02	5.19E-01
EB	2.30E-01	1.56E-01	3.53E+00
Pollutant	Non-carcinogenic effect		
	USEPA	ASTM	KMOE
Benzene	-	1.35E+00	1.21E+02
EB	-	1.25E+02	8.82E+03
Hg	9.57E-01	6.38E-01	3.01E+00

나라 지침을 이용한 선별기준은 USEPA나 ASTM 지침을 이용한 선별기준보다 4~50배 정도 높았다. 이와 같이 세 지침을 이용하여 도출한 선별기준에 차이가 발생하는 것은 가스상 오염물질의 실외흡입에 대한 선별기준을 도출할 때와 마찬가지로 각 지침마다 가스상 오염물질의 실외 휘발에 대한 해석을 달리하며, 사용하는 노출인자의 기본값과 사용하는 독성인자의 종류가 상이하기 때문이다.

3.4.1. 가스상 오염물질의 매체 간 이동에 대한 해석의 차이

USEPA 지침에서는 가스상 오염물질의 실내로의 이동을 해석하기 위해 Johnson-Ettinger Model을 사용한다. Johnson-Ettinger Model은 부지특이적인 인자(오염원 깊이, 건물 바닥면내 crack의 개수 및 크기 등)를 입력해야 하므로 일반적인 선별기준(generic soil screening levels)을 도출하는 용도로는 사용하는 것은 무리가 있겠지만, 본 연구에서는 위의 부지특이적인 인자를 USEPA에서 제공하는 기본값을 사용하여 계산하였으며, 모델의 구동은 USEPA에서 제공하는 website(http://www.epa.gov/athens/learn2model/part-two/onsite/JnE_lite.html)를 이용하였다. ASTM 지침에서는 토양 내에서 토양 내에서 오염물질이 토양 공극수, 토양 내 공기 및 토양입자에 평형 상태로 존재하며, 이 때 토양 내 공기에 존재하는 오염물질만 휘발된다고 가정한다. 그리고 토양 공기 내 오염물질은 실내 공기가 완전 혼합되는 건물 바닥면의 틈새를 통해 실내로 유입된다고 가정하여, 이 때 주거 건물 내부에서 오염물질의 확산계수의 기본값으로 $2.78 \times 10^{-2} (\text{g}\cdot\text{cm}^2/\text{s})/(\text{g}/\text{cm}^3)$ 을 사용한다. 반면, 우리나라 지침에서는 토양 공기 내 가스상 오염물질의 1%가 실내로 유입된다고 가정하고 있는데, 이에 대한 특별한 이유나 참고문헌은 언급되어 있지 않다.

3.4.2. 노출인자 기본값의 차이

가스상 오염물질의 실내흡입에 대한 오염도양 선별기준을 도출할 때 USEPA 지침과 ASTM 지침에서는 체중이 70 kg인 성인이 하루에 24시간 동안 30년간 오염물질에 노출된다고 가정하지만(ASM, 2004, ORNL, 2010), 우리나라 지침에서는 체중이 60 kg인 성인이 하루에 22.86 시간 동안(24시간 중 실외흡입 시의 노출시간을 제외한 시간) 오염물질에 노출된다고 가정한다. 또한, 우리나라 지침에서는 특정한 노출기간을 반영하지 않고 평생 동안 노출이 일어나는 것을 가정하고 있다(환경부, 2009).

3.4.3. 독성인자 종류의 차이

가스상 오염물질의 실외흡입에 대한 선별기준을 도출할 때와 마찬가지로 가스상 오염물질의 실내흡입에 대한 선별기준을 산정할 때, 세 지침에서는 오염물질 흡입에 대한 독성인자의 종류를 서로 달리 사용하기 때문에 이로 인해 도출되는 선별기준에 차이가 발생한다(3.3.3절 참고).

3.5. 비산먼지 흡입에 대한 오염도양 선별기준

세 지침을 이용하여 도출한 비산먼지 흡입에 대한 오염도양 선별기준을 Table 6에 나타내었다. ‘ASTM 지침 > USEPA 지침 > 우리나라 지침’의 순서대로 오염도양 선별기준이 높게 도출되었는데, 각 지침을 이용하여 도출한 선별기준 간에 큰 차이가 발생하였다. 우리나라 지침을 이용하여 도출한 비산먼지 흡입에 대한 선별기준은 USEPA

지침을 이용하여 도출한 선별기준과는 약 100배 정도 낮았으며, ASTM 지침을 이용하여 도출한 선별기준과는 약 10,000배 정도의 차이가 낮았다. 이와 같이 세 지침을 이용한 선별기준에 차이가 나는 이유는 다음과 같은 세 가지 이유 때문이다.

3.5.1. 비산먼지 발생에 대한 해석의 차이

(1) ASTM

ASTM 지침에서는 토양에서 기원한 흡입 가능한 비산먼지의 농도(total respirable particulate concentration originating from surfacial soil source; VF_p)를 식 (6)과 같이 표현하며, 식 (6)은 바람에 의해 비산먼지가 토양에서 발생하는 단계(Phase I)와 비산먼지가 대기 중에서 확산되는 단계(Phase II)로 Fig. 4와 같이 구분된다.

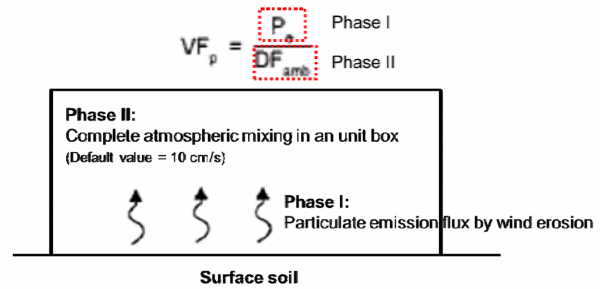


Fig. 4. Graphical expression of particulate concentration equation of ASTM (2002).

Table 6. Screening value for the inhalation of particulates derived using USEPA (1996a), ASTM (2002), KMOE (2009), and Lijzen et al. (2007) approach (unit: mg/kg)

Pollutant	Carcinogenic effect			
	USEPA	ASTM	KMOE	RIVM
Benzene	4.24E+05	4.52E+07	3.52E+03	6.40E+05
EB	1.32E+06	1.41E+08	1.10E+04	-
B(a)P	3.01E+03	3.21E+05	2.49E+01	7.47E+04
As	7.70E+02	8.20E+04	6.38E+00	-
Cd	1.84E+03	1.96E+05	1.52E+01	-
Pollutant	Non-carcinogenic effect			
	USEPA	ASTM	KMOE	RIVM
Benzene	4.25E+07	4.53E+09	8.23E+05	-
EB	1.42E+09	1.51E+11	2.74E+07	2.46E+07
Phenol	2.84E+08	3.02E+10	5.49E+06	6.40E+05
As	2.13E+04	2.27E+06	4.12E+02	3.20E+04
Hg	4.25E+05	4.53E+07	8.26E+03	6.40E+03
Cd	1.42E+04	1.51E+06	2.74E+02	7.47E+04
F	1.84E+07	1.96E+09	3.57E+05	-

$$VF_p = \frac{P_e}{DF_{smb}} \quad (6)$$

여기서,

- VF_p = total respirable particulate concentration originating from surfacial soil source (g/cm³)
- DF_{amb} = dispersion factor for ambient air (cm/s)
- P_e = areal total respirable particulate emission flux from source (g/cm²-sec)

이다.

ASTM 지침에서는 면적당 비산먼지 발생률 P_e를 도출하기 위해 식 (7) (Cowherd et al., 1985)을 사용하고 있으며, 식 (7)은 오염면적과 식생이 존재하는 면적의 비율 (V), 평균풍속(U_m) 및 7 m 상공에서의 풍속(U_t)의 함수로 표현된다.

$$P_e = \frac{0.036 \times (1-V) \times \left(\frac{U_m}{U_t}\right)^s \times F(x) \times 0.001}{3600s/h} \quad (7)$$

여기서,

- V = fraction of vegetative cover (unitless)
- U_m = mean annual wind speed (m/s)
- U_t = equivalent threshold value of wind speed at 7 m (m/s) = $2.5 \times \ln\left(\frac{700}{z_o}\right) \times U^*$
- Z_o = roughness height (cm)
- U* = friction velocity (m/s)
- F(x) = function dependent on U_m/U_t (unitless) = $0.18 (8x^3 + 12x) \times \exp(-x^2)$
- x = ratio between U_m and U_t (unitless) = $0.886 \times \left(\frac{U_t}{U_m}\right)$
- 0.036 = respirable fraction (g/m²-hr)
- 0.0001 = unit conversion factor (m²/cm²)

이다.

U_t는 지면에서의 임계마찰풍속(U*)과 지면과 바람의 마찰이 일어나는 높이(Z_o)의 함수로 표현되는데, 임계마찰풍속은 토양입경의 최빈값(aggregate size distribution mode)과 관련이 있다(Cowherd 등, 1985). ASTM에서는 토양입경의 최빈값으로 2 mm를 제시하고 있으며, 이 때의 임계마찰풍속은 약 0.86 m/s이다(Fig. 5). 또한, ASTM에서는 오염부지에 식생이 존재하지 않는다고 가정하며 (즉, V = 0) 평균풍속(U_m)은 4 m/s라고 가정한다. 이와 같은 가정을 통해 도출된 P_e 값은 6.9×10^{-14} cm/s이다 (ASTM, 2004).

가스상 오염물질의 실외흡입에 대한 선별기준을 도출할

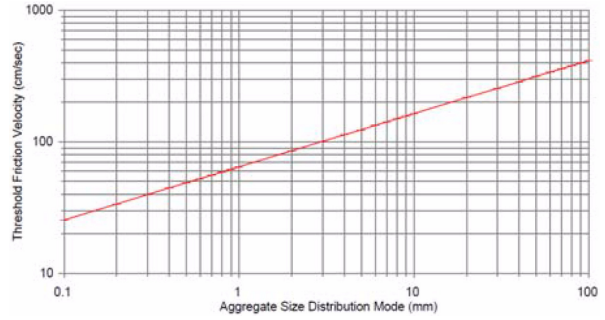


Fig. 5. Relationship of threshold friction velocity to size distribution mode (Cowherd et al., 1985).

때와 마찬가지로 ASTM에서는 비산먼지가 unit box에서 완전히 혼합된다는 Box Model을 사용하며, 확산속도의 기본값으로 10(g-cm²/s)/(g/cm³)을 사용한다(ASTM, 2004).

(2) USEPA

USEPA 지침에서는 비산먼지 발생계수(particulate emission factor; PEF)를 식 (8)과 같이 표현하며, 식 (8)은 바람에 의해 비산먼지가 토양에서 발생하는 단계 (Phase I)와 비산먼지가 대기 중에서 확산되는 단계(Phase II)로 Fig. 6과 같이 구분된다.

$$PEF = Q/C \times \frac{3600s/h}{0.036 \times (1-V) \times \left(\frac{U_m}{U_t}\right)^3 \times F(x)} \quad (8)$$

여기서,

- PEF = particulate emission factor (m³/kg)
- V = fraction of vegetative cover (unitless)
- Q/C = inverse of the mean concentration at the center of a 0.5-acre-square source (g/m²-s per kg/m³)
- U_m = mean annual wind speed (m/s)
- U_t = equivalent threshold value of wind speed at 7 m (m/s) = $2.5 \times \ln\left(\frac{700}{z_o}\right) \times U^*$
- Z_o = roughness height (cm)
- U* = friction velocity (cm)
- F(x) = function dependent on U_m/U_t (unitless) = $0.18 (8x^3 + 12x) \times \exp(-x^2)$
- x = ratio between U_m and U_t (unitless) = $0.886 \times \left(\frac{U_t}{U_m}\right)$

이다.

USEPA 지침에서 비산먼지가 토양에서 발생하는 flux (Phase I)를 도출하는 식은 ASTM에서 사용하는 식과 동

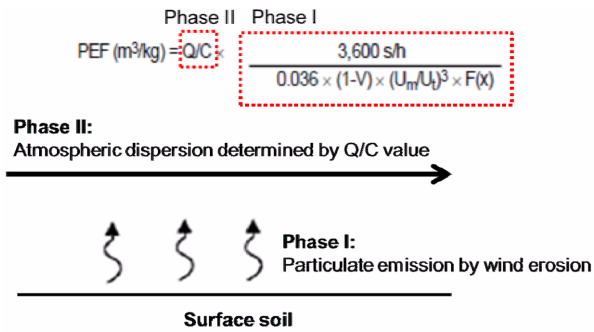


Fig. 6. Graphical expression of particulate emission factor equation of USEPA (1996a).

일하지만(식 (7)) 식에 들어가는 인자들의 기본값이 ASTM과 상이하다(USEPA, 1996b). USEPA에서는 토양 입경의 최빈값으로 0.5 mm를 사용한다. 이 경우 임계마찰 풍속은 0.5 m/s이나(Fig. 4) 보정을 통해 0.625 m/s를 임계마찰풍속의 기본값으로 사용하고 있으며 토양입자와 바람 사이의 마찰이 일어나는 높이(Z_0)를 0.5 cm라고 가정한다(USEPA, 1996b). 이렇게 도출한 U_c 는 11.32 m/s가 된다.

USEPA에서는 가스상 오염물질의 실외흡입에 대한 선별기준 도출 시 평가한 29개 Superfund 오염부지에서의 연평균풍속자료를 바탕으로 식 (8)을 이용하여 비산먼지가 토양에서 발생하는 flux를 계산하였으며, 이 때 오염면적 대비 식생이 자라는 면적의 비율을 0.5로 가정하였다. USEPA에서는 이렇게 도출된 29개 오염부지에서의 비산먼지 flux 중 상위 90%에 해당하는 지점(Minneapolis)에서의 연평균풍속(4.69 m/s)과 Q/C값(93.77 g/m²-s per kg/m³)을 바탕으로 PEF를 도출하였으며, 그 값은 1.36 × 10⁹ (m³/kg)이다(USEPA, 1996b). 휘발계수를 계산할 때와 마찬가지로 Q/C값은 식 (3)을 이용하여 계산할 수 있으며, 지역별 기상조건에 따라 그 값이 다르다(USEPA, 1996b).

도출된 PEF 값은 대기 중 비산먼지 농도 0.76 μg/m³과 상응하는 값으로(ORNL, 2010), ASTM 지침에서 제시하는 대기 중 비산먼지 농도 기본값(0.0069 μg/m³)보다 약 100배 높다. 이렇게 USEPA 지침과 ASTM에서 가정하는 대기 중 비산먼지 농도에 차이가 발생하는 가장 근본적인 이유는 두 지침에서 가정하는 토양입경의 최빈값이 서로 다르기 때문이다. 토양입경 최빈값은 지표면에서의 임계마찰속도에 영향을 미치며, 임계마찰속도는 다시 비산먼지 발생 flux에 영향을 미친다. 토양입경 최빈값 이외에도 연평균풍속과 전체 오염면적 당 식생이 자라는 면적의 비율도 비산먼지 발생 flux에 영향을 미치나, 그 영향은 임

계마찰속도보다 낮은 것으로 사료된다. USEPA 에서는 휘발계수를 구할 때와 마찬가지로 wind tunnel 시험을 통해 식 (8)이 적합한 식임을 검증하였다(USEPA, 1996b).

(3) 우리나라

우리나라 지침에서는 비산먼지 흡입에 대한 선별기준을 도출할 때 대기 중 존재하는 총 먼지 중 토양에서 기원한 비산먼지가 일정 비율로 존재한다고 가정한다(환경부, 2009). 우리나라 지침에서 가정하는 대기와 실내공기에 존재하는 총 먼지량은 각각 70과 57.5 μg/m³이며, 대기와 실내공기에 존재하는 총 먼지량 중 토양에서 기원한 비산먼지의 비율은 각각 50% 및 80%라고 가정한다(환경부, 2009).

3.5.2. 독성인자 종류의 차이

가스상 오염물질의 흡입에 대한 선별기준을 도출할 때와 마찬가지로 비산먼지 흡입에 대한 선별기준 도출 시 세 지침에서는 오염물질 흡입에 대한 독성인자의 종류를 서로 달리 사용하기 때문에, 이로 인해 도출되는 선별기준에 차이가 발생한다(3.3.3절 참고).

3.5.3. 노출인자 기본값의 차이

USEPA와 ASTM 지침에서는 체중이 70 kg인 성인이 실외에서만 하루에 24시간 동안 30년간 비산먼지에 노출된다고 가정하며, 흡입한 비산먼지는 모두 폐에 잔류한다고 가정한다(ASTM, 2004; ORNL, 2010). 그러나 우리나라 지침에서는 체중이 60 kg인 성인이 하루에 실내 1.14시간, 실외 22.86시간 동안 비산먼지에 노출된다고 가정하며, 노출기간을 반영하지 않고 평생 동안 노출이 일어나는 것을 가정하고 있다. 또한, 우리나라 지침에서는 흡입한 비산먼지 중 75%만이 폐에 잔류한다고 가정한다(환경부, 2009).

그러나 한 가지 유의해야 할 것은, 우리나라의 지침과 동일한 노출인자 기본값을 사용하고 비산먼지 농도에 대해서도 동일하게 가정하는 네덜란드 National Institute of Public Health and the Environment(RIVM)의 지침을 이용하여 도출한 선별기준 역시 우리나라 지침을 이용하여 도출한 선별기준과 차이를 보였다는 사실이다. 네덜란드 지침을 이용하여 도출한 에틸벤젠 및 페놀에 대한 선별기준의 경우, 우리나라 지침을 이용하여 도출한 선별기준과 큰 차이를 보이지 않았으나(10배 이내), 벤젠, 벤조(a)피렌 및 비소의 경우 네덜란드 지침을 이용하여 도출한 선별기준은 우리나라 지침을 이용하여 도출한 선별기준보

다 약 77~3,000배 높았다. 이와 같이 동일한 수식과 기본값을 사용함에도 도출된 선별기준에 차이가 발생하는 이유는 사용하는 독성인자가 서로 다르기 때문이다. 우리나라 지침에서는 발암독성인자와 비발암독성인자로 각각 SF와 RfD를 사용하는 반면(환경부, 2009), 네덜란드 지침에서는 각각 $CR_{inhal}(1:10^{-4}$ lifetime excess cancer risk inhalation)과 TCA(tolerable concentration in air)를 사용한다(Lijzen et al., 2007). 이러한 차이는 아마도 네덜란드 RIVM의 선별기준식을 사용하면서 그에 맞는 독성인자를 사용하지 않고, USEPA에서 사용하는 독성인자를 그대로 사용하도록 한 지침 상의 오류로 판단된다. 실제 네덜란드 지침과 독성인자 등을 그대로 이용하여 도출된 비산먼지 흡입에 대한 오염도양 선별기준은 우리나라 지침에 의해 도출된 값보다 훨씬 더 USEPA의 값과 유사함을 알 수 있다(Table 6).

따라서 우리나라 오염부지에서 비산먼지 흡입에 대한 선별기준을 도출할 때 USEPA나 ASTM 지침을 활용하려면 먼저 우리나라에서의 토양입경 최빈값을 어떻게 설정할 것인지 결정해야 한다. 토양입경 최빈값을 낮게 설정하는 것은 보수적인 결론을 도출할 수 있으나 자칫하면 합리적이지 못한 선별기준을 도출할 우려가 있으므로 토양입경분포 조사 등 실측을 통해 합리적인 수치를 제시할 필요가 있다. 또한, USEPA 지침을 활용하려면 각종 기상 자료 확보 및 대기모델링을 통해 한국형 Q/C값을 도출할 필요가 있으며, ASTM 지침을 활용하기 위해서는 우리나라에서도 단일 unit box에서의 비산먼지 확산속도가 10 cm/s인지 검토해야 할 것이다. 마지막으로 우리나라 지침을 활용하기 위해서는 대기 중 총 먼지량의 50%가 실제로 토양에서 기인한 비산먼지인지에 대한 확인이 필요하다.

4. 결 론

오염도양 선별기준(risk-based screening level)은 오염지역 주변의 환경 여건과 노출인자, 독성인자 등에 대한 보수적인 가정과 기본값을 사용하여 대상 부지의 위해성 존재 여부를 선별하고, 그에 따라 추가적인 조사 및 평가가 필요한지를 결정하기 위한 것이다. 그러나 선별기준을 도출하기 위해 사용하는 인체노출인자나 부지특성인자 기본값과 오염물질의 매체 간 이동현상을 해석하는 방식이 USEPA, ASTM, 우리나라 등에서 사용하고 있는 지침마다 상이하기 때문에 동일한 부지용도와 동일한 수용체를 가정하여도 도출되는 선별기준에 차이가 난다. 각 지침을 이용하여 도출한 선별기준 중 수용체가 오염도양과 직접

접촉하는 경로(토양섭취 및 토양접촉)에 대한 선별기준에 차이가 나는 이유는 단순한 인체노출인자의 기본값의 차이와 사용하는 독성인자의 차이에 기인한다고 볼 수 있다. 즉, 기본값과 사용하는 독성인자를 동일하게 하면 동일한 선별기준이 도출되므로 우리나라 지침에서 기준을 통일하여 사용한다면 큰 문제가 되지 않는다. 그러나 오염물질의 매체 간 이동(cross-media transfer)에 대한 해석이 필수적인 가스상 오염물질 흡입 및 비산먼지 흡입에 대한 선별기준의 경우는 사용하는 인체노출인자의 기본값이 다를 뿐 아니라 오염물질의 이동을 해석하는 방법과 그 해석을 위해 세운 가정이 각 지침마다 상이하기 때문에, 노출인자에 대한 기본값을 동일하게 사용한다고 해서 동일한 선별기준이 도출되지 않는다. 따라서 특정 지침을 이용하여 오염도양 선별기준을 도출하기 위해서는 사용하고 자 하는 지침에서 어떠한 가정을 통해 인체노출인자나 부지특성인자 기본값을 도출하였는지에 대한 면밀한 검토가 필요할 뿐 아니라, 어떠한 가정과 방식을 통해 오염물질의 매체 간 이동을 해석하였는지, 그러한 해석이 실제 대상 오염현장의 상황 및 수용체에 적절한지에 대한 전문적인 기술적 검토가 반드시 선행되어야 한다. 따라서 가스상 오염물질 흡입 및 비산먼지 흡입에 대한 오염도 선별기준 및 위해성평가는 오염물질 이동 해석에 대한 지식을 가진 전문 인력에 의해 수행되는 것이 바람직하다.

사 사

본 연구는 환경부의 “토양 지하수 오염방지기술개발사업”인 GAIA (Geo-Advanced Innovative Action) Project와 국토해양부 건설기술혁신사업인 자연과 함께하는 하천복원기술개발 연구단(ECORIVER21)(06핵심건설B01)의 지원을 받은 과제입니다.

참 고 문 헌

- 환경부, 2006, 토양오염 위해성평가지침, 환경부예규 제283호.
- 환경부, 2009, 토양오염 위해성평가지침, 환경부예규 제383호.
- ASTM, 1995, Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites (Designation: E 1739-95), ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, p. 54.
- ASTM, 1998, Standard Provisional Guide for Risk-Based Corrective Action (ASTM PS 104-98), Philadelphia, PA, USA.
- ASTM, 2002, Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites (Designation: E 1739-95

(Reapproved 2002)), ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, p. 54.

ASTM, 2004, Standard Guide for Risk-Based Corrective Action (Designation: E 2081-00 (Reapproved 2004)), ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, p. 95.

Cowherd, Jr., C., Muleski, G.E., Englehart, P.J., and Gillette, D. A., 1985, Rapid Assessment of Exposure to Particulate Emissions from Surface Contamination Sites, USEPA, Office of Health and Environmental Assessment and Office of Research and Development, Washington, DC., USA, 87p, EPA/600/8-85/002.

Eklund, B., Petrincec, C., Ranum, D.p. and Howlett, L., 1991, Air/Superfund National Technical Guidance Study Series: Database of Emission Rate Measurement Projects - Technical Note, USEPA, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC, USA, 33p, EPA/450/1-91/003.

Lijzen, J.P.A., Baars, A.J., Otte, P.F., Rikken, M.G.J., Swartjes, F.A., Verbruggen, E.M.J.p. and van Wezel, A.P., 2007, Technical Evaluation of the Intervention Values for Soil/Sediment and

Groundwater, RIVM, Bilthoven, Netherlands, 147 p, RIVM Report 711701 023.

Oak Ridge National University (ORNL), 2010, Regional Screening Table: User's Guide (May 2010), USEPA Region III homepage, http://www.epa.gov/reg3hscd/risk/human/rb-concentration_table/usersguide.htm.

USEPA, 1991, Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume I - Human Health Evaluation Manual (Part B, Development of Risk-Based Preliminary Remediation Goals), Interim, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC, USA, 54 p, EPA/540/R-92/003.

USEPA, 1996a, Soil Screening Guidance, Second Edition, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, USA, 39 p, EPA/540/R-96/018.

USEPA, 1996b, Soil Screening Guidance: Technical Background Document, Second Edition, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC, USA, 168 p, EPA/540/R-95/128.

[보충자료]

Screening Equations for Residential Adults

Table S1. Ingestion of soil

Approach	Carcinogenic effect	Noncarcinogenic effect
USEPA	$SL_{ca_ing} = \frac{TR \times (365 \times LT) \times BW}{EF \times ED \times SF_o \times IRS \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$	$SL_{nc_ing} = \frac{THQ \times (365 \times ED) \times BW}{EF \times ED \times \frac{1}{RfD_o} \times IR_o \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$
ASTM	$SL_{ca_ing} = \frac{Risk \times (365 \times AT_c) \times BW}{EF \times ED \times SF_o \times IR_s \times RAF_o \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$	$SL_{nc_ing} = \frac{TR \times (365 \times AT_n) \times BW}{EF \times ED \times \frac{IR_s \times RAF_o}{RfD_o} \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$
KMOE	$SL_{ca_ing} = \frac{TR \times (365 \times AT) \times BW}{EF \times ED \times SF_o \times CR_s \times FI \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$	$SL_{nc_ing} = \frac{THQ \times RfD_o \times (365 \times ED) \times BW}{EF \times ED \times CR_s \times FI \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$

Definition	USEPA		ASTM		KMOE	
	Symbol	Default	Symbol	Default	Symbol	Default
Soil screening level for the ingestion of soil : Carcinogenic effect (mg/kg)	SL _{ca_ing}	-	SL _{ca_ing}	-	SL _{ca_ing}	-
Soil screening level for the ingestion of soil : Noncarcinogenic effect (mg/kg)	SL _{nc_ing}	-	SL _{nc_ing}	-	SL _{nc_ing}	-
Target risk (unitless)	TR	10 ⁻⁶	Risk	10 ⁻⁶	TR	10 ⁻⁶
Target hazard quotient (unitless)	THQ	1	THQ	1	THQ	1
Lifetime (years)	LT	70	-	-	AT	70
Averaging time for carcinogen (years)	-	-	AT _c	70	-	-
Averaging time for noncarcinogen (years)	-	-	AT _n	30	-	-
Body weight (kg)	BW	70	BW	70	BW	60
Exposure frequency (days)	EF	350	EF	350	EF	365
Exposure duration (years)	ED	30	ED	30	ED	30
Oral slope factor (mg/kg-day) ⁻¹	SF _o	CS ¹⁾	SF _o	CS ¹⁾	SF _o	CS ¹⁾
Oral reference dose (mg/kg-day)	RfD _o	CS ¹⁾	RfD _o	CS ¹⁾	RfD _o	CS ¹⁾
Soil ingestion rate (mg/day)	IRS	100	IR _s	100	CR _s	100
Relative oral absorption factor (unitless)	-	-	RAF _o	1	FI	1

1) Chemical-specific

Table S2. Dermal contact with soil

Approach	Carcinogenic effect	Noncarcinogenic effect
USEPA	$SL_{ca_der} = \frac{TR \times (365 \times LT) \times BW}{EF \times ED \times \frac{SF_o}{CIABS} \times SA \times AF \times ABS_d \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$	$SL_{nc_der} = \frac{THQ \times (365 \times ED) \times BW}{EF \times ED \times \frac{1}{RfD_o \times CIABS} \times SA \times AF \times ABS_d \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$
ASTM	$SL_{ca_der} = \frac{Risk \times (365 \times AT_c) \times BW}{EF \times ED \times SF_o \times SA \times M \times RAF_d \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$	$SL_{nc_der} = \frac{THQ \times (365 \times AT_n) \times BW}{EF \times ED \times \frac{1}{RfD_o} \times SA \times M \times RAF_d \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$
KMOE	$SL_{ca_der} = \frac{TR \times (365 \times AT) \times BW}{EF \times ED \times SP_{abs} \times SA \times AF \times ABS \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$	$SL_{ca_der} = \frac{THQ \times RfD_{abs} \times (365 \times ED) \times BW}{EF \times ED \times SA \times AF \times ABC \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$

Definition	USEPA	ASTM	KMOE		Symbol	Default
	Symbol	Default	Symbol	Default		
Soil screening level for the dermal contact with soil : Carcinogenic effect (mg/kg)	SL _{ca_der}	-	SL _{ca_der}	-	SL _{ca_der}	-
Soil screening level for the dermal contact with soil : Noncarcinogenic effect (mg/kg)	SL _{nc_der}	-	SL _{nc_der}	-	SL _{nc_der}	-
Target risk (unitless)	TR	10 ⁻⁶	Risk	10 ⁻⁶	TR	10 ⁻⁶
Target hazard quotient (unitless)	THQ	1	THQ	1	THQ	1
Lifetime (years)	LT	70	-	-	AT	70
Averaging time for carcinogen (years)	-	-	AT _c	70	-	-
Averaging time for noncarcinogen (years)	-	-	AT _n	30	-	-
Body weight (kg)	BW	70	BW	70	BW	60
Exposure frequency (days)	EF	350	EF	350	EF	365
Exposure duration (years)	ED	30	ED	30	ED	30
Oral slope factor (mg/kg-day) ⁻¹	SF _o	CS ¹⁾	SF _o	CS ¹⁾	-	-
Oral reference dose (mg/kg-day)	RfD _o	CS ¹⁾	RfD _o	CS ¹⁾	-	-
Dermal absorption slope factor (mg/kg-day) ⁻¹	-	-	-	-	SF _{abs}	CS ¹⁾
Dermal absorption reference dose (mg/kg-day)	-	-	-	-	RfD _{abs}	CS ¹⁾
Fraction of contaminant absorbed in gastrointestinal tract (unitless)	GIABS	CS ¹⁾	-	-	-	-
Skin surface area (cm ²)	SA	5700	SA	3160	SA	5700
Absorption factor (unitless)	AF	0.07	M	0.5	AF	0.07
Relative dermal absorption factor (unitless)	ABS _d	CS ¹⁾	RAF _d	CS ¹⁾	ABS	CS ¹⁾

1) Chemical-specific

Table S3. Outdoor inhalation of soil vapors

Approach	Carcinogenic effect	Noncarcinogenic effect
USEPA	$SL_{ca_oinhv} = \frac{TR \times (365 \times LT)}{IUR \times EF \times \frac{1}{VF_s} \times ED \times BT \times \frac{1}{24} \left(\frac{day}{hours} \right) \times 1000 \left(\frac{\mu g}{m^3} \right)}$	$SL_{nc_oinhv} = \frac{THQ \times (365 \times ED)}{\frac{1}{RfC} \times EF \times \frac{1}{VF_s} \times ED \times BT \times \frac{1}{24} \left(\frac{day}{hours} \right)}$
ASTM	$SL_{ca_oinhv} = \frac{Risk \times (365 \times AT_c) \times BW}{SF_i \times EF \times VF_{ss} \times ED \times IR_{air} \times 1000 \left(\frac{cm^3}{m^3} \cdot \frac{kg}{g} \right)}$	$SL_{nc_oinhv} = \frac{THQ \times (365 \times AT_n) \times BW}{\frac{BW \times VF_{ss}}{RfC} \times EF \times ED \times 1000 \left(\frac{cm^3}{m^3} \cdot \frac{kg}{g} \right)}$
KMOE	$SL_{ca_oinhv} = \frac{TR \times BW}{SF_i \times ET_o \times CR_o \times VF}$	$SL_{nc_oinhv} = \frac{THQ \times RfD_i \times BW}{ET_o \times CR_o \times VF}$

Definition	USEPA	ASTM	KMOE			
	Symbol	Default	Symbol	Default	Symbol	Default
Soil screening level for the outdoor inhalation of soil vapors: Carcinogenic effect (mg/kg)	SL _{ca_oinhv}	-	SL _{ca_oinhv}	-	SL _{ca_oinhv}	-
Soil screening level for the outdoor inhalation of soil vapors: Noncarcinogenic effect (mg/kg)	SL _{nc_oinhv}	-	SL _{nc_oinhv}	-	SL _{nc_oinhv}	-
Target risk (unitless)	TR	10 ⁻⁶	Risk	10 ⁻⁶	TR	10 ⁻⁶
Target hazard quotient (unitless)	THQ	1	THQ	1	THQ	1
Lifetime (years)	LT	70	-	-	-	-
Averaging time for carcinogen (years)	-	-	AT _c	70	-	-
Averaging time for noncarcinogen (years)	-	-	AT _n	30	-	-
Body weight (kg)	BW	70	BW	70	BW	60
Exposure frequency (days)	EF	350	EF	350	-	-
Exposure duration (years)	ED	30	ED	30	-	-
Inhalation unit risk (μg/m ³) ⁻¹	IUR	CS ⁽¹⁾	-	-	-	-
Reference concentration (mg/m ³)	RfC	CS ⁽¹⁾	RfC	CS ⁽¹⁾	-	-
Inhalation slope factor (mg/kg-day) ⁻¹	-	-	SF _i	CS ⁽¹⁾	SF _i	CS ⁽¹⁾
Inhalation reference dose (mg/kg-day)	-	-	-	-	RfD _i	CS ⁽¹⁾
Exposure time (hours/day)	ET	24	-	-	ET _o	1.14
Daily outdoor inhalation rate (m ³ /day)	-	-	IR _{air}	20	-	-
Hourly outdoor inhalation rate (m ³ /hour)	-	-	-	-	CR _o	0.83
Volatilization factor: soil to outdoor air	VF _s	CS ⁽¹⁾	VF _{ss}	CS ⁽¹⁾	VF	CS ⁽¹⁾

1) Chemical-specific

Table S4. Indoor inhalation of soil vapors

Approach	Carcinogenic effect		Noncarcinogenic effect			
USEPA	Johnson-Ettinger Model		Johnson-Ettinger Model			
ASTM	$SL_{ca_inhv} = \frac{Risk \times (365 \times AT_c) \times BW}{SF_i \times EF \times VF_{ss} \times ED \times IR_{air} \times 1000 \left(\frac{cm^3}{m^3}, \frac{kg}{g} \right)}$		$SL_{nc_inhv} = \frac{THQ \times (365 \times AT_n) \times BW}{\frac{BW \times VF_{s,esp}}{RfC} \times EF \times ED \times 1000 \left(\frac{cm^3}{m^3}, \frac{kg}{g} \right)}$			
KMOE	$SL_{ca_inhv} = \frac{TR \times BW}{SF_i \times ET_i \times CR_i \times VF_i}$		$SL_{nc_inhv} = \frac{THQ \times RfD_i \times BW}{ET_i \times CR_i \times VF_i}$			
Definition	USEPA	ASTM	KMOE		Symbol	Default
	Symbol	Default	Symbol	Default		
Soil screening level for the indoor inhalation of soil vapors: Carcinogenic effect (mg/kg)	-	-	SL _{ca_inhv}	-	SL _{ca_inhv}	-
Soil screening level for the indoor inhalation of soil vapors: Noncarcinogenic effect (mg/kg)	-	-	SL _{nc_inhv}	-	SL _{nc_inhv}	-
Target risk (unitless)	-	-	Risk	10 ⁻⁶	TR	10 ⁻⁶
Target hazard quotient (unitless)	-	-	THQ	1	THQ	1
Lifetime (years)	-	-	-	-	-	-
Averaging time for carcinogen (years)	-	-	AT _c	70	-	-
Averaging time for noncarcinogen (years)	-	-	AT _n	30	-	-
Body weight (kg)	-	-	BW	70	BW	60
Exposure frequency (days)	-	-	EF	350	-	-
Exposure duration (years)	-	-	ED	30	-	-
Inhalation unit risk (ig/m ³) ⁻¹	-	-	-	-	-	-
Reference concentration (mg/m ³)	-	-	RfC	CS ¹⁾	-	-
Inhalation slope factor (mg/kg-day) ⁻¹	-	-	SF _i	CS ¹⁾	SF _i	CS ¹⁾
Inhalation reference dose (mg/kg-day)	-	-	-	-	RfD _i	CS ¹⁾
Exposure time (hours/day)	-	-	-	-	ET _o	22.86
Daily indoor inhalation rate (m ³ /day)	-	-	IR _{air}	15	-	-
Hourly indoor inhalation rate (m ³ /hour)	-	-	-	-	CR _i	0.83
Volatilization factor: soil to outdoor air	-	-	VF _{s,esp}	CS ¹⁾	VF _i	CS ¹⁾

1) Chemical-specific

Table S5. Inhalation of particulates

Approach	Carcinogenic effect	Noncarcinogenic effect
USEPA	$SL_{ca_inhp} = \frac{TR \times (365 \times LT)}{IUR \times EF \times \frac{1}{PEF} \times ED \times BT \times \frac{1}{24} \left(\frac{day}{hours} \right) \times 1000 \left(\frac{\mu g}{m^3} \right)}$	$SL_{nc_inhp} = \frac{THQ \times (365 \times ED)}{\frac{1}{RfC} \times EF \times \frac{1}{PEF} \times ED \times ET \times \frac{1}{24} \left(\frac{day}{hours} \right)}$
ASTM	$SL_{ca_inhp} = \frac{Risk \times (365 \times AT_c) \times BW}{SF_i \times EF \times VF_p \times ED \times IR_{air} \times 1000 \left(\frac{cm^3}{m^3} \cdot \frac{kg}{g} \right)}$	$SL_{nc_inhp} = \frac{THQ \times (365 \times AT_n) \times BW}{\frac{BW \times VF_p}{RfC} \times EF \times ED \times 1000 \left(\frac{cm^3}{m^3} \cdot \frac{kg}{g} \right)}$
KMOE	$SL_{ca_inhp} = \frac{TR \times BW}{SF_i \times ITSP \times fr \times fa}$	$SL_{nc_inhp} = \frac{THQ \times RfD_i \times BW}{ITSP \times fr \times fa}$
RIVM	$SL_{ca_inhp} = \frac{CR_{inhal} \times BW}{ITSP \times fr \times fa}$	$SL_{nc_inhp} = \frac{TCA \times BW}{ITSP \times fr \times fa}$

Definition	USEPA		ASTM		KMOE		RIVM	
	Symbol	Default	Symbol	Default	Symbol	Default	Symbol	Default
Soil screening level for the indoor inhalation of soil vapors: Carcinogenic effect (mg/kg)	SL _{ca_inhp}	-	SL _{ca_inhp}	-	SL _{ca_inhp}	-	SL _{ca_inhp}	-
Soil screening level for the indoor inhalation of soil vapors: Noncarcinogenic effect (mg/kg)	SL _{nc_inhp}	-	SL _{nc_inhp}	-	SL _{nc_inhp}	-	SL _{nc_inhp}	-
Target risk (unitless)	TR	10 ⁻⁶	Risk	10 ⁻⁶	TR	10 ⁻⁶	-	-
Target hazard quotient (unitless)	THQ	1	THQ	1	THQ	1	-	-
Lifetime (years)	LT	70	-	-	-	-	-	-
Averaging time for carcinogen (years)	-	-	AT _c	70	-	-	-	-
Averaging time for noncarcinogen (years)	-	-	AT _n	30	-	-	-	-
Body weight (kg)	BW	70	BW	70	BW	60	BW	70
Exposure frequency (days)	EF	350	EF	350	-	-	-	-
Exposure duration (years)	ED	30	ED	30	-	-	-	-
Inhalation unit risk (ig/m ³) ¹	IUR	CS ¹	-	-	-	-	-	-
Reference concentration (mg/m ³)	RfC	CS ¹	RfC	CS ¹	-	-	-	-
1:10 ⁴ lifetime excess cancer risk inhalation (ig/m ³)	-	-	-	-	-	-	CR _{inhal}	CS ¹
Inhalation slope factor (mg/kg-day) ⁻¹	-	-	SF _i	CS ¹	SF _i	CS ¹	-	-
Inhalation reference dose (mg/kg-day)	-	-	-	-	RfD _i	CS ¹	-	-
Tolerable concentration in air (ig/m ³)	-	-	-	-	-	-	TCA	CS ¹
Exposure time (hours/day)	ET	24	-	-	-	-	-	-
Daily indoor inhalation rate (m ³ /day)	-	-	IR _{air}	20	-	-	-	-
Daily inhalation amount of particulates (kg/day)	-	-	-	-	ITSP	8.33E-7	ITSP	8.33E-7
Retention factor of soil particulates in lung (unitless)	-	-	-	-	fr	0.75	fr	0.75
Relative absorption factor (unitless)	-	-	-	-	fa	1	fa	1
Particulate emission factor (m ³ /kg)	PEF	1.36E+09	-	-	-	-	-	-
Particulate concentration (g/cm ³)	-	-	VF _p	6.9E-15	-	-	-	-

1) Chemical-specific