

다양한 실내 침투 휘발물질 농도 예측 방법을 이용한 토양오염물질의 실내흡입 위해성평가

정재웅 · 남택우 · 남경필*

서울대학교 건설환경공학부

Risk Assessment of Volatile Organic Compounds for Vapor Intrusion Pathway Using Various Estimation Methodology of Indoor Air Concentration

Jae-Woong Jung · Taekwoo Nam · Kyoungphile Nam*

Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

Indoor inhalation of vapors intruded into buildings is an important exposure pathway in volatile organic compounds-contaminated sites. Site-specifically measured indoor air concentration is preferentially used for risk assessment. However, when indoor air concentration of VOC is not measured, the indoor air concentration needs to be estimated from soil concentration or measured soil gas concentration of the VOC. Some risk assessment guidance (e.g., Korea Ministry of Environment (KMOE) and American Society for Testing and Materials (ASTM) International guidance) estimate the indoor air concentration from soil concentration while other guidances (e.g., United States Environmental Protection Agency (USEPA) and Dutch National Institute for Public Health (RIVM)) estimate it from measured soil gas concentration. This study derived indoor inhalation risks of intruded benzene in two benzene-contaminated residential areas with four different risk assessment guidances (i.e., KMOE, USEPA, ASTM, and Dutch RIVM) and compared the derived risks. The risk assessment results revealed that indoor air estimation approach from soil concentration could either underestimate (when the contaminant is not detected in soil) or overestimate (when the contaminant is detected in soil even at negligible concentration) the indoor air inhalation risk. Hence, this paper recommends to estimate indoor air concentration from soil gas concentration, rather than soil concentration. Discussions about the various indoor air concentration estimation approaches are provided.

Keywords : Risk assessment, Vapor intrusion, Volatile organic compounds, Indoor inhalation

1. 서 론

토양 내 휘발물질(volatile compounds)의 실내침투(vapor intrusion)로 인해 실내로 유입된 휘발물질을 실내 거주자(resident)나 노동자(workers)가 흡입하는 경로는 토양오염의 주요한 노출경로(exposure pathway) 중 하나이다. 우리나라 토양오염물질 위해성평가 지침(환경부고시 제2015-64호) (이하 “현행지침”이라 한다)에서도 실내로 침투한 휘발물질의 실내흡입을 주요한 노출경로로 인정하여 이 경로에 대한 위해도 산정 방법을 제시하고 있다

(KMOE, 2015). 우리나라 현행지침에서는 기본적으로 실내공기 농도 실측을 권장하나, 실내공기에서의 오염물질 농도를 실측하거나 실측이 어려운 경우(예: 오염부지 내에 다양한 건물이 존재하여 대표성 있는 실내공기 시료를 채취하기 어렵거나 향후 신축될 건물에서 생활할 사람에 대한 위해성평가를 수행하고자 해 위해성평가 시점에는 조사대상 건축물이 없는 경우 등)에는 아래 식 (1)을 이용하여 실내공기 중 오염물질의 농도를 예측하여 사용하도록 하고 있다.

*Corresponding author : kpnam@snu.ac.kr

Received : 2015. 4. 29 Reviewed : 2015. 7. 3 Accepted : 2015. 7. 3

Discussion until : 2015. 10. 31

$$C_{ia} = C_s \times \frac{H'}{K_d + \frac{\theta_w + \theta_a H'}{\rho_b}} \times \alpha \quad (1)$$

여기서, C_s , C_{ia} , H , K_d , θ_w , θ_a 및 ρ_b 는 각각 토양 농도 (soil concentration) (mg/kg), 실내공기 농도(indoor air concentration) (mg/m³), 무차원 헨리상수(dimensionless Henry's laws constant), 토양분배계수(soil partition coefficient) (L/kg), 물로 채워진 공극률(water-filled porosity) (L/L) 및 공기로 채워진 공극률(air-filled porosity) (L/L) 이며, α 는 토양공기 농도에 대한 실내공기 농도의 비율로 정의되는 감쇄계수(attenuation factor) (unitless)이다.

위 식 (1)에서 $\frac{H'}{K_d + \frac{\theta_w + \theta_a H'}{\rho_b}}$ 는 토양의 3상분배(three-

phase partitioning) 현상을 이용해 토양농도로부터 토양공기 농도를 예측하는 식이며, α 는 다시 토양공기 농도로부터 실내공기 농도를 예측하는 인자로서 현행지침에서는 표토의 경우 감쇄계수를 0.1로, 심토의 경우 0.01로 적용하고 있다(KMOE, 2015). 실내공기 중 오염물질의 농도를 예측하는 현행지침 방식은 미국 환경청(United States Environmental Protection Agency, USEPA)이나 미국재료시험학회(American Society for Testing and Materials (ASTM) International), 그리고 네덜란드 Dutch National Institute for Public Health(RIVM)에서 사용하는 방법과 차이가 있다. USEPA에서는 토양의 3상분배 현상을 이용해 토양공기 중 오염물질의 농도를 예측하지 않고 토양공기 중 해당 오염물질의 농도를 실측한 후, 그 값에 감쇄(Johnson-Ettinger Model(JEM))을 이용해 부지특이적으로 결정을 곱하여 실내공기 농도를 예측하도록 하고 있다(USEPA, 2002; USEPA, 2004). ASTM에서는 우리나라와 같이 3상분배로 토양공기 중의 오염물질농도를 예측한 후 감쇄계수를 JEM을 이용해 부지특이적으로 결정하도록 하고 있다(ASTM International, 2010). RIVM에서는 건물의 바닥 특성을 세분화하여(예: 지하실이 있는 건물(buildings with a basement), 슬라브디자인 건물(slab-on-grade buildings), 마루 밑 공간이 있는 건물(buildings with a crawlspace) 각기 다른 모델을 이용해 감쇄계수를 도출하여 사용하도록 하고 있다(Bakker et al., 2008). 이 상에서 알 수 있듯이, 동일한 오염부지에서 각 기관에서 발행한 위해성평가 지침을 이용해 예측한 실내공기 중 오염물질의 농도 및 그 흡입에 의한 위해도는 서로 차이가 날 수 있다.

본 논문에서는 각 지침의 실내흡입에 대한 위해성평가

방법 차이점이 위해성평가 결과에 미치는 영향을 파악하기 위해 USEPA, ASTM 및 RIVM에서 사용하고 있는 실내공기 중 오염물질의 농도를 예측하는 방법을 살펴보고, 우리나라 OO 벤젠 오염부지를 대상으로 이들 지침과 우리나라 현행지침을 사용한 경우 위해도 차이를 비교해 보았다. 또한, 보다 신뢰성 있는 위해성평가를 위한 우리나라 현행지침의 개선방향을 제시하였다.

2. USEPA, ASTM 및 RIVM 예측방법 비교

2.1. USEPA

USEPA 지침에서는 건물의 형태를 들레에 틈이 있는 바닥을 가진 슬라브디자인 건물 혹은 지하실이 있는 건물로 가정하며, 이 때 실내로 침투한 휘발물질의 실내공기 농도는 아래 식 (2)를 이용하여 예측한다(USEPA, 2015).

$$C_{ia} = C_{sa} \times \alpha \quad (2)$$

여기서, C_{ia} , C_{sa} 와 α 는 각각 실내공기 중 오염물질농도 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), 토양공기 중 오염물질농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 및 감쇄계수 (unitless)이다.

토양의 3상분배 현상을 이용해 토양공기 중 오염물질의 농도를 예측하는 우리나라 현행지침과는 달리 USEPA 지침에서는 토양공기 중 오염물질농도를 실측하도록 하고 있다(USEPA, 2015a). 그 이유는, 토양의 3상분배 현상을 이용한 토양공기 농도 예측의 불확실성 때문이다. 예를 들어, 토양에서 오염물질이 불검출된 경우에도 실제 토양공기 내에 오염물질이 존재할 수 있으며, 동시에 토양에서 오염물질이 검출된 경우에는 토양공기 내 오염물질의 농도가 매우 높게 예측되는 경향이 있기 때문이다(USEPA, 2015a).

또한, USEPA 지침에서 일정한 감쇄계수(0.03)를 사용하는 것은 Preliminary remediation goal(PRG) 수준을 도출하기 위해서 실내공기의 오염물질 허용농도로부터 토양에서의 허용농도를 역산할 때이다(USEPA, 2015a). 즉, 우리나라 현행지침에서 사용하는 것과 같이 토양농도를 바탕으로 실내공기 허용농도를 산출하기 위한 목적으로 개발된 값은 아닌 것이다. 대신 USEPA의 경우, 토양공기 중 오염물질의 농도를 측정 후 JEM을 이용해 감쇄계수를 부지특이적으로 예측하도록 하고 있다. JEM은 토양공기가 수직적으로 건물 내부로 유입되는 이송(convection)과 확산(diffusion)되는 현상에 대한 정상상태(steady-state) 해석해로써, JEM을 이용해 감쇄계수를 도출하는 식은 아래 식 (3)과 같고, 인자들에 대한 정의 및 기본값은 첨부

자료(Table S1)에 명시되어 있다(USEPA, 2004). USEPA에서는 건물을 슬라브디자인 건물(slab-on-grade buildings)과 지하실이 있는 건물(buildings with a basement)로 구분하고 있다.

$$\alpha = \frac{\left[\left(\frac{D_{Tf}^{eff} \cdot A_B}{Q_{building} \cdot L_T} \right) \times \exp\left(\frac{Q_{soil} \cdot L_{crack}}{D_{crack} \cdot A_{crack}} \right) \right]}{\exp\left(\frac{Q_{soil} \cdot L_{crack}}{D_{crack} \cdot A_{crack}} \right) + \left(\frac{D_{Tf}^{eff} \cdot A_B}{Q_{building} \cdot L_T} \right) + \left(\frac{D_{Tf}^{eff} \cdot A_B}{Q_{soil} \cdot L_T} \right) \left[\exp\left(\frac{Q_{soil} \cdot L_{crack}}{D_{crack} \cdot A_{crack}} \right) - 1 \right]} \quad (3)$$

2.2. ASTM

ASTM 지침에서 제시하는 실내로 침투한 휘발물질의 실내공기 농도를 예측하는 식은 식 (4)와 같고 식 (4)에 들어가는 인자들에 대한 정의 및 기본값은 첨부자료(Table S2)에 명시되어 있다(ASTM International, 2010).

$$C_{ia} = C_s \times \frac{K_{sw}}{H_{eff}} \times \left[e^{\xi} + \left(\frac{D_{eff,vad}}{DF_{esp} \cdot L_s} \right) + \left(\frac{D_{eff,vad} \cdot A_B}{Q_s \cdot L_s} \right) (e^{\xi} - 1) \frac{DF_{esp} \cdot L_s}{D_{eff,vad} \cdot e^{\xi}} \right] \quad (4)$$

위 식 (4)의 $\frac{K_{sw}}{H_{eff}}$ 는 우리나라 현행지침과 표현 방식은 다르지만 토양의 3상분배 현상을 이용해 토양공기 농도를 예측하는 term으로 현행지침의 $\frac{H'}{K_d + \frac{\theta_w + \theta_a H'}{\rho_b}}$ 와 동일하다.

또한, $\left[e^{\xi} + \left(\frac{D_{eff,vad}}{DF_{esp} \cdot L_s} \right) + \left(\frac{D_{eff,vad} \cdot A_B}{Q_s \cdot L_s} \right) (e^{\xi} - 1) \frac{DF_{esp} \cdot L_s}{D_{eff,vad} \cdot e^{\xi}} \right]$

는 USEPA의 감쇄계수(식 (3))와 동일하지만 이를 다른 방식으로 표현한 것이다. 따라서 ASTM의 지침에서는 우리나라 현행지침과 동일하게 토양농도를 바탕으로 3상분배 현상을 이용해 토양공기 농도를 예측하며, USEPA 지침과 동일하게 JEM을 이용해 토양공기 농도로부터 실내 공기 농도를 예측한다.

2.3. RIVM

네덜란드 RIVM 지침에서는 건물을 바닥 특성에 따라 슬라브디자인 건물(slab-on-grade buildings), 지하실이 있는 건물(buildings with a basement), 마루 밑 공간이 있는 건물(buildings with a crawlspace)로 구분하여 각각에 대한 실내공기 농도 예측식을 별도로 제공한다(Bakker et al., 2008).

슬라브디자인 건물은 기초공사를 하지 않고 바닥에 콘크리트 재질 등의 슬라브를 설치해 건물을 고정시키는 방식의 건물이다. Dutch RIVM에서는 ①슬라브 바닥에 틈(crack)이 없는 바닥(intact floor), ②둘레에 틈이 있는 바닥(floor with a perimeter seam gap), ③구멍이나 틈이

있는 바닥(floor with gaps and holes) 등 3종류의 바닥으로 다시 구분하여 각 바닥의 특성에 따른 실내공기 농도 예측방법을 제공한다. Dutch RIVM 지침에서도 USEPA 지침과 동일하게 토양공기 농도를 실측할 것을 권장한다. 첫째 슬라브 바닥에 틈이 없는 경우 토양공기는 오직 슬라브의 공극을 통해서만 유입된다고 가정하며, 이러한 경우 실내공기 농도는 아래 식 (5)를 이용해 예측된다(Bakker et al., 2008).

$$C_{ia} = \frac{J_{si} \cdot A_f}{V_i \cdot \nu \nu_i} \quad (5)$$

여기서, C_{ia} , J_{si} , A_f , V_i 및 $\nu \nu_i$ 는 각각 실내공기 농도(g/m^3), 실내로 침투하는 오염물질 flux(contaminant flux through the floor into the indoor space)($g/m^2 \cdot h$), 바닥 면적(surface area of the floor) (m^2), 실내공간 부피(volume of the indoor space) (m^3) 및 실내공기 회전율(air-exchange rate for indoor space) ($1/h$)이다. 식 (5)에서 J_{si} 및 $\nu \nu_i$ 를 계산하는 식과 인자들에 대한 설명은 첨부자료(Table S3)에 명시되어 있다.

두 번째는 둘레에 틈이 있는 바닥(floor with a perimeter seam gap)과 같은 경우이며, 이는 건물바닥 슬라브 바닥 둘레에 틈이 존재해 그 틈을 통해 오염물질이 실내로 유입되는 것을 가정하고 있는데, USEPA와 ASTM 지침에서 사용하는 JEM을 이용해 실내공기 농도를 예측하며, 틈이 없는 바닥과 동일하게 식 (5)를 이용해 실내공기 농도를 예측한다. 실내공기 회전율($\nu \nu_i$)을 도출할 때에는 틈이 없는 바닥에 적용하는 방법과 동일하게 Table S3에 명시된 $\nu \nu_i$ 산정식을 사용하나, 실내로 침투하는 오염물질 flux(J_{si})를 도출할 때에는 틈이 없는 바닥에 적용하는 방법과 달리 아래 식 (6)을 사용한다. 식 (6)의 인자들에 대한 정의 및 기본값은 첨부자료(Table S4)에 명시되어 있다(Bakker et al., 2008).

$$J_{si} = \frac{-F_f \cdot C_{sa}}{e \frac{-F_{crack} \cdot L_{crack}}{D_{crack}} - 1 - \frac{F_s \cdot L_s}{D_s}} \quad (6)$$

마지막으로는 구멍이나 틈이 있는 바닥(floor with gaps and holes)의 경우가 있는데, 이는 바닥에 생긴 구멍이나 틈이 흠으로 채워지고 그 흠의 공극을 통해 오염물질이 실내로 유입되는 것을 가정하고 있다. 실내공기 농도는 앞의 두 경우와 동일하게(틈이 없는 바닥의 경우, 둘레에 틈이 있는 바닥의 경우) 식 (5)를 이용해 예측한다. 실내공기 회전율($\nu \nu_i$)은 틈이 없는 바닥에 적용하는 방법과 동일

하게 Table S3에 명시된 vv_i 산정식을 통해 도출될 수 있으나, 실내로 침투하는 오염물질 flux(J_{si})는 틈이 없는 바닥에 적용하는 방법과 달리 아래 식 (7)을 이용해 도출된다. 식 (7)의 인자들에 대한 정의 및 기본값은 첨부자료 (Table S5)에 명시되어 있다.

$$J_{si} = \frac{-F_f \cdot C_{sa}}{e^{-\frac{F_s \cdot L_s}{D_s}} \cdot e^{-\frac{F_{gap} \cdot L_f}{D_{gap}}} - 1} \quad (7)$$

지하실이 있는 건물은 지하실 바닥이나 벽면에 틈이 없는 경우를 가정하며, 이러한 형태의 건물의 실내공기 농도는 아래 식 (8)을 이용해 예측된다.

$$C_{ia} = \frac{J_f \cdot A_f + J_{bw} \cdot A_{bw}}{V_{i,b} \cdot vv_i} \quad (8)$$

여기서, C_{ia} 는 실내공기 농도(g/m^3)이고 J_f 와 J_{bw} 는 각각 지하실 바닥을 통해 유입되는 오염물질 flux($g/m^2 \cdot h$)와 지하실 벽을 통해 유입되는 오염물질 flux($g/m^2 \cdot h$)이다. A_f 와 A_{bw} 는 각각 지하실 바닥과 벽의 면적(m^2)이며 $V_{i,b}$ 와 vv_i 는 각각 실내공간(지하실 포함) 부피(m^3) 및 실내공기 회전율(1/h)이다. 식 (10)에서 J_f , J_{bw} 및 vv_i 를 계산하는 식과 인자들에 대한 정의 및 기본값은 첨부자료(Table S6)에 명시되어 있다.

마루 밑 공간이 있는 건물의 실내공기 농도는 식 아래 식 (9)를 이용해 예측된다(Bakker et al., 2008).

$$C_{ia} = \frac{J_{ci} \cdot A_f}{V_i \cdot vv_i} \quad (9)$$

여기서, C_{ia} , J_{ci} , A_f , V_i 및 vv_i 는 각각 실내공기 농도(g/m^3), 마루 밑 공간에서 실내로 침투하는 오염물질 flux(contaminant flux from the crawlspace into indoor space)($g/m^2 \cdot h$), 바닥 면적(m^2), 실내공간 부피(m^3) 및 실내공기 회전율(1/h)이다. 식 (11)에서 J_{ci} 및 vv_i 를 계산하는 식과 인자들에 대한 정의 및 기본값은 첨부자료(Table S7)에 명시되어 있다.

3. 벤젠 오염부지의 실내흡입 경로에 대한 다양한 위해성평가 결과 비교

이상에서 살펴본 내용을 바탕으로 국내외의 4개 지점(우리나라 현행지침, USEPA 지침, ASTM 지침 및 Dutch RIVM 지침)을 이용해 벤젠 오염부지에 대한 위해성평가를 실시하고 그 결과를 비교·분석하였다. 이 때,

명확한 비교를 위해 건물의 형태를 상기 지침에서 모두 가정하고 있는 둘레에 틈이 있는 바닥을 가진 슬라브디자인 건물로 가정하였다.

3.1. 대상 부지 조사

벤젠으로 오염된 연구대상 부지(이하 “Site A”와 “Site B”라 한다)는 주거지역이며, 내부에 오염원은 존재하지 않으나 주변에서 유입된 유류성분으로 인해 벤젠오염이 발생한 것으로 조사되었다. 토양 내 벤젠의 실내침투에 의한 벤젠의 실내흡입에 대한 위해성평가를 위해 두 부지에서 토양 및 토양공기 내 벤젠농도 조사를 수행하였다. 토양조사 시에는 토양정밀조사 지침(KMOE, 2013a)을 준용해 면적에 따른 시료채취 지점 수를 결정한 후 각 지점의 지표면에서부터 최대오염심도까지 1 m 간격으로 시료를 채취해 분석하였다. 이후 각 심도별 농도의 평균을 각 지점의 대표농도로 결정하고, 이를 이용해 부지 전체의 노출농도(상위 95% 신뢰한계도)를 결정하였다. Site A에서는 총 9지점에서 조사를 실시하였으나 토양 내에서 벤젠이 모두 검출되지 않았다. Site B에서는 총 30지점에서 조사를 실시하였으나 3지점에서만 벤젠이 검출되었으며, 각 검출지점의 심도별 농도의 평균은 0.064, 0.583, 0.143 mg/kg이었다. 토양대표농도를 도출하기 위해서 본 연구에서는 USEPA 방법에 따라 ProUCL software를 사용하고자 하였으나, 전체 시료채취지점 중 농도가 검출된 지점의 수가 4개 미만인 경우에는 ProUCL을 이용한 대표농도 도출 시 통계학적 불확실성이 크다고 알려져 있다. 이 경우, USEPA에서는 추가시료채취가 불가능하다면 중간값(median)을 대표농도로 사용하며, 중간값이 불검출에 해당한다면 노출농도를 정량한계로 설정한다(USEPA, 2013). 본 조사에서는 3개 지점에서만 농도가 미량으로 검출되었고(최고농도 0.583 mg/kg), 추가적인 시료채취가 불가능하였으며, 전체 시료의 중간값이 불검출에 해당하였기 때문에 벤젠의 정량한계를 노출농도로 설정하였다. 따라서 Site B의 토양 벤젠 노출농도는 우리나라 환경부에서 제시하고 있는 벤젠 정량한계인 0.1 mg/kg으로 결정하였다(KMOE, 2013b). 참고로 검출된 최고농도가 노출농도의 10배를 초과하면 노출농도가 과소평가되었을 가능성에 대해 고려하여야 하나(Missouri Department of Natural Resources(MDNR), 2006), Site B에서 검출된 최고농도가(0.583 mg/kg) 노출농도(0.1 mg/kg)의 10배 미만이었다.

토양공기의 경우, 각 부지에서 유류오염이 가장 심하다고 판단되는 3지점의 심도 2 m에서 시료를 채취해 분석

Table 1. Soil and soil air benzene concentration and geological properties of Site A and Site B

Parameter	Site A	Site B
Soil concentration (mg/kg)	ND ¹⁾	0.1
Soil air concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	59	62
Soil texture	loamy sand	loamy sand
Soil bulk density (kg/L)	1.55	1.46
Annual precipitation rate (m/year)	1.45	1.45
Source-building separation (m)	1.85	1.85

1) Not detected

한 후 검출된 최고농도를 부지 전체의 노출농도로 사용하였다. 조사지점이 5개 미만인 경우 통계처리를 통한 대표 농도 도출 시 통계적 오차가 크게 발생할 수 있어 최고 농도를 노출농도로 설정하는 것이 바람직하다(USEPA, 2013). Site A에서는 토양 내 벤젠이 검출되지 않았지만 토양공기 농도에서는 $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 검출되었다. 한편, Site B에서는 벤젠의 토양농도가 $0.1 \text{ mg}/\text{kg}$ 이었고, 토양공기 농도는 $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 또한, 실내농도 예측을 위해 필요한 토양특성인자인 토성, 용적밀도 등에 대한 조사도 수행하였다(Table 1).

3.2. 다양한 지침을 이용한 실내공기 벤젠 농도 예측 및 위해도 산정

토양과 토양공기 내 벤젠 오염농도 및 토양특성인자 조사결과(Table 1)를 바탕으로 우리나라 현행지침 및 USEPA, ASTM, Dutch RIVM 지침을 이용해 실내공기 농도를 예측하였다. 다만, 오염부지 내부에 다양한 주거건물이 혼재하고 있어 대표성 있는 건물특성인자를 도출하기 어려워 USEPA에서 제시한 둘레에 틈이 있는 바닥을 가진 슬라브디자인 건물특성인자 기본값을 적용하였다(Table S1). 건물특성인자 외에 부지특이적 인자, 오염물질 특이적 인자 및 노출인자의 경우 각각 현장조사 결과, 벤젠의 특성 및 우리나라 지침에 명시된 노출인자 기본값을 반영해 값을 결정하였다(Table 2). 상기한 우리나라 현행지침 및 USEPA, ASTM, Dutch RIVM 지침에 명시된 실내공기 농도 예측식에 Table S1과 Table 2에 명시된 값을 대입하여 예측한 실내공기 농도 및 도출된 실내공기 농도를 현행지침의 위해도 산정식에 대입하여 도출한 위해도는 Table 3과 같다.

우리나라 지침에서는 과거 USEPA 지침(USEPA, 2002)을 인용해 표토오염의 경우 감쇄계수를 0.1로 적용하고 심토오염의 경우 감쇄계수를 0.01로 적용하도록 하고 있으며, 본 연구의 위해성평가대상 부지의 오염심도를 지표

Table 2. Input value of parameters used for the estimation of the indoor air concentration and corresponding risk of intruded benzene in this study

Parameter ¹⁾	Unit	Input value
D_a	cm^2/s	0.088
ρ_b	g/cm^3	1.55 (Site A) 1.46 (Site B)
D_w	cm^2/s	$9.80\text{E}-06$
P	m/year	$1.45^{2)}$ (Site A & B)
n'	unitless	0.349
TS	$^{\circ}\text{C}$	10
T_R	$^{\circ}\text{K}$	298.15
H_R	$\text{atm}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$	$5.54\text{E}-03$
$\Delta H_{v,b}$	cal/mol	7342
R_C	cal/mol- $^{\circ}\text{K}$	1.9872
R	$\text{atm}\cdot\text{m}^3/\text{mol}\cdot^{\circ}\text{K}$	$8.205\text{E}-05$
T_B	$^{\circ}\text{K}$	353.24
T_C	$^{\circ}\text{K}$	562.16
A_B	cm^2	$1.00\text{E}+06$
L_B	cm	1,000
W_B	cm	1,000
H_B	cm	2.44
ER	1/h	0.25
L_S	cm	200
L_F	cm	15
ΔP	$\text{g}/\text{cm}\cdot\text{s}^2$	40
X_{crack}	cm	4,000
Z_{crack}	cm	15
r_{crack}	cm	0.1
K_s	cm/h	4.38 (Site A & B)
μ_w	$\text{g}/\text{cm}\cdot\text{s}$	0.01307
ρ_w	g/cm^3	0.999
g	cm/s^2	980.665
θ_r	unitless	0.049 (Site A & B)
M	unitless	0.4273 (Site A & B)
L_{crack}	cm	10
A_{crack}	cm^2	400

1) The description of the parameters can be found in Table S1.
2) This precipitation rate was set at 30-year average measured at the Seoul meteorological station because the Seoul station is the nearest station from the Sites.

하 200 cm로 설정하였고, 우리나라에서는 심도 0.15 m를 표토와 심토의 구분기준으로 설정하므로, 우리나라 지침을 이용한 실내공기 농도 예측 시 감쇄계수를 0.01로 적용하였다. 참고로 우리나라 지침에서 감쇄계수를 인용한 원문을 작성한 USEPA에서는 표토와 심토의 구분 없이 감쇄계수 기본값(위해성평가에서는 사용하지 않으며 사전 선별평가 시에만 사용)을 0.03으로 제시하는데(USEPA,

2015a), 유류 오염물질의 경우 호기성 생분해가 쉽게 일어나 0.03을 기본값으로 그대로 사용하면 실내공기 농도를 매우 과대평가하게 되므로, 호기성 생분해를 고려한 유류오염물질의 감쇄계수 준기본값(semi-generic attenuation factor)을 약 10^{-3} ~ 10^{-10} 의 범위에서 별도로 제시한다(USEPA, 2015b).

Site A의 경우 우리나라 지침이나 ASTM 지침을 이용해 도출한 벤젠의 실내공기 농도는 0이었다. 우리나라와 ASTM 지침에서는 토양농도에 3상분배식(식 (1))을 곱해 토양공기 농도를 예측하기 때문에 토양공기 농도도 0인 것으로 예측되며, 이로 인해 실내공기에도 벤젠이 존재하지 않는 것으로 예측된다. 그렇지만 실제로 Site A에서는 벤젠 토양공기 농도가 $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 검출되었기 때문에, 토양에서 오염물질이 검출되지 않을 경우 3상분배식을 사용해 토양공기 농도를 예측하면 과소평가의 불확실성이 발생할 수 있다.

반면, USEPA나 네덜란드 RIVM 지침에서는 실측한 토양공기 농도에 JEM을 이용해 도출한 부지특이적 감쇄계수를 곱해 실내공기 농도를 예측하며(Bakker et al., 2008; USEPA, 2004), 이렇게 도출한 감쇄계수는 $3.5\text{E}-04$ 이고, 그에 따라 예측된 벤젠의 실내공기 농도는 $0.021 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

Site B에서는 벤젠의 토양공기 실측농도가 $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고 JEM을 이용해 도출한 부지특이적 감쇄계수가 $3.6\text{E}-04$ 이기 때문에, USEPA나 네덜란드 RIVM 지침(실측한 토양공기 농도에 부지특이적 감쇄계수를 곱해 실내공기 농도 예측)을 이용해 예측한 벤젠의 실내공기 농도는 $0.022 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 도출된다. 반면, ASTM 지침이나 우리나라 현행지침에서는 토양오염물질의 3상분배 현상을 이용해

토양공기 농도를 예측하며, 이를 이용해 예측한 토양공기 농도는 약 $20,200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 실측한 토양공기 농도에 비해 약 330배 높았다. 그러나 ASTM 지침과 우리나라 현행지침을 이용해 예측한 실내공기 농도는 각각 $7.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $202 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 상이하였는데, 이는 예측한 토양공기 농도를 바탕으로 실내공기 농도를 예측하는 방법은 ASTM 지침과 우리나라 현행지침이 서로 다르기 때문이다. ASTM 지침에서는 토양공기 농도를 바탕으로 실내공기 농도를 예측할 때 JEM을 이용하는 반면, 우리나라 현행지침에서는 토양공기 농도에 감쇄계수 0.01을 곱해 실내공기 농도를 예측한다. ASTM 지침을 이용한 경우, JEM을 이용하여 예측한 토양공기 농도에 대한 실내농도의 비율(즉, 감쇄계수)은 $3.6\text{E}-03$ 이었다. 이 감쇄계수는 USEPA와 RIVM에 따른 JEM을 이용한 예측 결과와도 동일하다. 그 결과, 우리나라 현행지침을 이용해 예측한 실내공기 농도는 $202 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 ASTM 지침을 이용해 예측한 실내공기 농도인 $7.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 28배 높았다.

3.3. 다양한 방법을 이용한 실내공기 내 벤젠 흡입으로 인한 위해도 산정 결과 평가

Site A의 경우 우리나라 현행지침이나 ASTM 지침을 이용했을 때에는 실내공기 내에 벤젠이 존재하지 않는 것으로 예측되었기 때문에 위해도 역시 없는 것으로 산정되었다. 반면, USEPA 지침이나 네덜란드 RIVM 지침을 이용한 경우 예측된 실내공기 농도는 $0.021 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 이로 인해 산정된 발암위해도와 비발암위해도는 각각 $6.2\text{E}-08$ 과 $6.7\text{E}-04$ 이었고(Table 3), 이는 우리나라 현행지침에 명시된 허용 가능한 발암위해도 수준인 10^{-6} ~ 10^{-5} 와 허용 가능한 비발암위해도 1보다 모두 낮은 수치이다.

Table 3. Estimated indoor air concentration, cancer risk and noncancer hazard quotient of intruded benzene

Guidance	Site A		
	Indoor air concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cancer risk	Noncancer hazard quotient
Korean	0	0	0
USEPA	2.1E-02	6.2E-08	6.7E-04
ASTM	0	0	0
Dutch RIVM	2.1E-02	6.2E-08	6.7E-04
Guidance	Site B		
	Indoor air concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cancer risk	Noncancer hazard quotient
Korean	2.0E+02	6.0E-04	6.5E+00
USEPA	2.2E-02	6.5E-08	7.0E-04
ASTM	7.5E+00	2.2E-05	2.4E-01
Dutch	2.2E-02	6.5E-08	7.0E-04

Site B의 경우 USEPA 지침이나 네덜란드 RIVM 지침을 이용하였을 때에는 예측된 실내공기 농도가 $0.022 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 이를 이용해 도출한 발암위해도와 비발암위해도는 각각 $6.5\text{E-}08$ 과 $7.0\text{E-}04$ 로(Table 3), 우리나라의 허용가능한 발암위해도나 비발암위해도에 비해 낮았다. 반면, ASTM 지침을 이용해 예측한 실내공기 농도는 $7.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 이로 인한 발암위해도와 비발암위해도는 각각 $2.2\text{E-}05$ 와 0.24 로(Table 3), 우리나라 현행지침의 허용 가능한 비발암위해도인 1 미만이었으나 허용 가능한 발암위해도 수준인 $10^{-6}\sim 10^{-5}$ 를 초과하였다. 한편, 우리나라 현행지침을 이용해 예측한 실내공기 농도는 $202 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 이로 인한 발암위해도와 비발암위해도는 각각 $6.0\text{E-}04$ 와 6.5 로 우리나라 현행지침의 허용 가능한 위해도 수준을 초과하는 것으로 나타났다.

Site B의 벤젠 토양농도는 $0.1 \text{mg}/\text{kg}$ 로서 현재 우리나라의 벤젠 1지역 토양오염우려기준($1 \text{mg}/\text{kg}$)의 1/10에 해당하는 수준이다. 그렇지만 우리나라 현행지침이나 ASTM 지침을 이용해 산정한 실내흡입에 의한 위해도는 허용 가능한 위해도를 초과하였다. 또한 목표발암위해도를 10^{-5} 로 결정하여 토양정화수준을 역산하여 도출해 보면 $0.0017 \text{mg}/\text{kg}$ 이 되는데, 이는 우리나라의 토양오염공정시험기준의 벤젠 정량한계인 $0.1 \text{mg}/\text{kg}$ 보다도 훨씬 낮은 값이며, 공학적으로 달성하기 어려운 수준의 정화목표가 도출된다. 반면, 토양공기 실측농도($62 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 이용해 실내흡입에 대한 위해도를 산정한 경우(USEPA와 네덜란드 RIVM 지침을 이용한 경우), 발암위해도와 비발암위해도 모두 허용 가능한 매우 낮은 수준이었고, Site B의 벤젠 토양오염도($0.1 \text{mg}/\text{kg}$)를 고려하면 USEPA 지침이나 네덜란드 RIVM을 이용해 도출한 위해도가 신뢰성이 있는 것으로 판단된다. 이러한 결과는, 우리나라의 경우와 같이 토양농도를 이용해 토양공기 내 오염물질의 농도를 예측하고, 그 결과에 따라 실내흡입 위해도를 산정하는 것은 큰 불확실성이 존재할 수 있다는 것을 의미하며, 이러한 이유 때문에 USEPA에서는 실내흡입 위해성평가의 경우 토양공기 농도를 실측한 후 이를 이용해 흡입 위해성평가를 수행하도록 하고 있다(USEPA, 2002).

Site A의 경우에도 토양공기에서는 벤젠이 검출되었지만, 토양에서는 벤젠이 검출되지 않았고, 따라서 우리나라 현행지침이나 ASTM 지침을 이용한 위해성평가 시에는 토양공기에 벤젠이 존재하지 않는 것으로 예측되었다. 이로 인해 우리나라 현행지침이나 ASTM 지침을 이용했을 때에는 벤젠 실내흡입으로 인한 위해도가 존재하지 않는 것으로 예측되었다. 그러나 Site A의 토양공기 조사 결과

벤젠이 검출되었는데, 이는 토양농도를 이용해 실내흡입에 대한 위해성평가를 수행할 경우 위해도를 과소평가할 수 있다는 것을 의미한다.

4. 결 론

실내흡입에 대한 위해성평가 시에는 실측한 실내공기 농도를 바탕으로 위해성평가를 수행하는 것이 가장 바람직하다. 그러나 본 연구에서와 같이 실내공기 농도 측정이 어려운 경우 실내공기 농도를 예측하여야 하는데, 현재 국가별 혹은 기관별로 다양한 실내공기 농도 예측방식을 제시하고 있다. 본 연구에서는 이러한 여러 가지 지침을 이용하여 벤젠의 실내흡입 위해도를 산정해 보고, 그 결과를 비교, 분석하여 합리적인 흡입 위해성평가 방법을 제안하고자 하였다. 우리나라 현행지침의 경우, 토양농도로부터 3상분배를 이용하여 토양공기 중 벤젠의 농도를 예측하고, 그 결과에 감쇄계수를 적용하여 실내공기 중 벤젠의 농도를 예측하는 방법을 사용하는데, 이는 가장 큰 불확실성을 가지고 위해도를 과대평가할 개연성이 높은 것으로 판단된다. 특히, 우리나라 현행지침에 따라 실내공기 농도를 예측하여(3상분배와 감쇄계수 사용) 위해성평가를 수행할 경우, 표토에서 토양오염도가 우리나라 토양오염공정시험기준에서 제시한 벤젠의 정량한계인 $0.1 \text{mg}/\text{kg}$ 수준으로 검출된다고 할지라도 실내흡입에 대한 발암위해도가 목표발암위해도(10^{-5} 또는 10^{-6})를 초과한다는 결론이 도출되기 때문에, 이에 대한 근본적인 검토가 필요하다.

한편, 현행지침과 토양공기 중 농도를 예측하는 것은 동일하나 감쇄계수를 사용하지 않고 JEM을 적용하여 실내공기 중 벤젠 농도를 예측하는 ASTM 지침은 현장 특이적인 감쇄계수를 사용한다는 점에서 현행지침보다는 합리적이나, 여전히 실내 흡입 노출량과 위해도를 과대평가하는 경향이 있었다. USEPA와 RIVM은 토양 중 오염물질의 농도와는 상관없이 토양공기 내 오염물질의 농도를 실제 측정을 하고, JEM을 이용하여 감쇄계수를 도출하여 실내 오염물질의 농도를 예측하는 방법을 사용하고 있는데, 문헌고찰 결과와 본 연구의 실제 사례연구에 근거하여 판단해 보면, 이는 현재 사용할 수 있는 가장 정확한 예측 방법으로 판단된다. 즉, 실내흡입에 대한 위해성평가 시 실내공기 농도를 실측하지 못해 예측이 필요한 경우, 현행 지침에서는 오염물질의 3상분배식을 이용해 토양농도로부터 토양공기 농도를 예측하고, 예측한 토양공기 농도에 감쇄계수 기본값을 곱해 실내공기 농도를 예측한다. 그렇지만 이 방법의 불확실성이 매우 크기 때문에, 본 논

문에서는 현실적으로 우리나라에서 이용 가능한 방법으로 토양공기 농도를 실측한 후, 이 값에 부지특이적 감쇄 계수(JEM을 이용해 도출) 또는 감쇄계수 기본값을 곱해 실내공기 농도를 예측하는 방법을 제안한다.

사 사

본 연구는 환경산업기술원의 토양지하수오염확산방지사업의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- ASTM International, 2010, Standard Guide for Risk-Based Corrective Action (Reapproved 2010), West Conshohocken, PA, USA, Designation: E2081-00.
- Bakker, J., Lijzen, J.P.A., and van Wijnen, H.J., 2008, Site-Specific Human Risk Assessment of Soil Contamination with Volatile Compounds, RIVM, RIVM Report 711701049.
- Korea Ministry of Environment (KMOE), 2013a, Rules for the Remedial Investigation of Soils, KMOE Notice 2013-59.
- KMOE, 2013b, Standard for the Soil Contamination Testing, KMOE Notice 2013-113.
- KMOE, 2015, Risk Assessment Guidance for Soil Contaminants, KMOE Notice 2015-64.
- MDRN, 2006, Missouri Risk-Based Corrective Action Technical Guidance (Appendices), available at <http://dnr.mo.gov/env/hwp/mrbca/mrbca.htm>.
- USEPA, 1996, Soil Screening Guidance: User's Guide, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, USA, EPA/540/R-96/018.
- USEPA, 2002, OSWER Draft Guidance for Evaluating the Vapor Intrusion to Indoor Air Pathway from Groundwater and Soils (Subsurface Vapor Intrusion Guidance), Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, USA, EPA530-D-02-004.
- USEPA, 2004, User's Guide for Evaluating Subsurface Vapor Intrusion into Buildings, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC, USA.
- USEPA, 2013, ProUCL Version 5.0.00 Technical Guide: Statistical Software for Environmental Applications for Data Sets with and without Nondetect Observations, Office of Research and Development, Washington, DC, USA, EPA/600/R-07/041.
- USEPA, 2015a, OSWER Technical Guide for Assessing and Mitigating the Vapor Intrusion Pathway from Subsurface Vapor Sources to Indoor Air, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, USA, OSWER Publication 9200.2-154.
- USEPA, 2015b, Technical Guide for Addressing Petroleum Vapor Intrusion at Leaking Underground Storage Tank Sites, Office of Underground Storage Tanks, Washington, DC, USA, EPA 510-R-15-001.

첨부자료

Table S1. Definition and default value of parameters used for the attenuation factor estimation using USEPA guidance (USEPA, 2004)

Parameter	Definition	Unit	Default value
D_T^{eff}	Effective diffusion coefficient	cm ² /s	chemical-specific
D_a	Diffusivity in air	cm ² /s	chemical-specific
θ_a	Soil air-filled porosity	unitless	$n - \theta_w$
n	Soil total porosity	unitless	$1 - \rho_b / 2.65^{(1)}$
ρ_b	Soil bulk density	g/cm ³	site-specific
D_w	Diffusivity in water	cm ² /s	chemical-specific
θ_w	Soil water-filled porosity	unitless	site-specific ⁽¹⁾
I	Infiltration rate	m/year	$0.1444 \cdot P^{(2)}$
P	Annual precipitation rate	m/year	site-specific
H'_{TS}	Henry's law constant at the system temperature	unitless	chemical-specific
$\Delta H_{v,TS}$	Enthalpy of vaporization at the system temperature	cal/mol	chemical-specific
n'	Constant	unitless	chemical-specific
TS	System temperature	°C	10
T_R	Henry's law constant reference temperature	°K	298.15
H_R	Henry's law constant at the reference temperature	atm·m ³ /mol	chemical-specific
$\Delta H_{v,b}$	Enthalpy of vaporization at the normal boiling point	cal/mol	chemical-specific
R_C	Gas constant	cal/mol·°K	1.9872
R	Gas constant	atm·m ³ /mol·°K	8.205E-05
T_B	Normal boiling point	°K	chemical-specific
T_C	Critical temperature	°K	chemical-specific
A_B	Area of the enclosed space below grade	cm ²	1.80E+06 (basement) 1.00E+06 (SOG ⁽³⁾)
$Q_{building}$	Building ventilation rate	cm ³ /s	
L_B	Length of building	cm	1,000
W_B	Width of building	cm	1,000
H_B	Height of building	cm	3.66 (basement) 2.44 (SOG)
ER	Building air exchange rate	1/h	0.25
L_T	Source-building separation	cm	$L_S - L_F$
L_S	Soil sampling depth below grade	cm	site-specific
L_F	Depth below grade to bottom of enclosed space floor	cm	15
Q_{soil}	Volumetric flow rate of soil gas into the enclosed space	cm ³ /s	site-specific
ΔP	Soil-building pressure difference	g/cm·s ²	40
k_v	Soil effective vapor permeability	cm ²	site-specific
X_{crack}	Floor-wall seam perimeter	cm	4,000
μ_{TS}	Vapor viscosity at system temperature	Pa·h	6.0E-09
Z_{crack}	Crack depth below grade	cm	15
r_{crack}	Crack radius	cm	0.1
k_i	Soil intrinsic permeability	cm ²	site-specific
k_{rg}	Soil relative air permeability	unitless	site-specific
K_s	Saturated hydraulic conductivity	cm/h	soil texture-specific
μ_w	Dynamic viscosity of water at 10°C	g/cm·s	0.01307
ρ_w	Density of water	g/cm ³	0.999
g	Acceleration due to gravity	cm/s ²	980.665
S_{le}	Effective total fluid saturation	unitless	site-specific
θ_r	Residual soil water content	unitless	soil texture-specific
M	van Genuchten shape parameter	unitless	soil texture-specific
L_{crack}	Enclosed space foundation or slab thickness	cm	10
A_{crack}	Area of total cracks	cm ²	400
D_{crack}	Effective diffusion coefficient through the cracks	cm ² /s	D_T^{eff}

1) Adapted from USEPA (1996), 2) Infiltration rate equals to the recharge rate (USEPA, 1996) and recharge rate in Korea is 0.1444 X annual precipitation rate (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2011), 3) Slab-on-grade

Table S2. Definition and default value of parameters used for the indoor concentration estimation using ASTM International guidance (ASTM International, 2010)

Parameter	Definition	Unit	Default value
C_s	Soil concentration	mg/kg	site-specific
K_{sw}	Soil to water partition coefficient	L/kg	chemical-specific
θ_w	Soil water-filled porosity	unitless	site-specific
K_d	Soil (sorbed) / water partition coefficient	L/kg	chemical-specific
ρ_s	Dry soil bulk density	kg/L	site-specific
H_{eff}	Effective Henry's law coefficient	unitless	chemical-specific
K_{oc}	Organic carbon / water partition coefficient	L/kg	chemical-specific
f_{oc}	Mass fraction of organic carbon in soil	unitless	site-specific
θ_a	Soil air-filled porosity	unitless	site-specific
ξ	An exponent	unitless	site-specific
Q_s	Convective flow through basement slab	cm ³ -air/sec	0
L_{crk}	Enclosed-space foundation or wall thickness	cm	15
A_B	Slab area	cm ²	700,000
$D_{eff,crk}$	Effective diffusivity in soil-filled foundation cracks	cm ² /sec	chemical-specific
D_a	Diffusivity in air	cm ² /s	chemical-specific
D_w	Diffusivity in water	cm ² /s	chemical-specific
n	Soil total porosity	unitless	site-specific
η	foundation crack fraction	unitless	0.01
$D_{eff,vad}$	Effective diffusivity in vadose zone	cm ² /sec	chemical-specific
DF_{esp}	Dispersion factor	cm/sec	2.78E-02
L_s	Thickness of surficial soils	cm	100

Table S3. Definition and default value of parameters used for the estimation of contamination flux through the floor into the indoor space (J_{si}) and air-exchange rate for indoor space (vv_i) for slab-on-grade buildings (intact floor) using Dutch RIVM guidance (Bakker et al., 2008)

Parameter	Definition	Unit	Default value
J_{si}	Contaminant flux through the floor into the indoor space	g/m ² -h	$\frac{-F_T \cdot C_{sa}}{e^{\frac{-F_T \cdot L_s}{D_s}} \cdot e^{\frac{-F_T \cdot L_f}{D_f}} - 1}$
vv_i	Air-exchange rate for indoor space	1/h	$vv_{i,b} + \frac{-F_{si} \cdot A_f}{V_i}$
F_T	Overall flux from the soil-floor column	m/h	$\frac{\Delta P_T}{\frac{L_s}{K_s} + \frac{L_f}{K_f}}$
ΔP_T	Air pressure difference over the soil-floor column	Pa	1
L_s	Length of soil layer	m	site-specific
K_s	Air conductivity of soil	m ² /Pa-h	κ_s/η
κ_s	Air permeability in soil	m ²	coarse sand 10 ⁻¹⁰ medium sand 10 ^{-10.5} fine sand 10 ^{-11.5} silty sand 10 ^{-12.5} silt 10 ^{-13.5} clay 10 ⁻¹⁶
η	Dynamic viscosity of air	Pa-h	6 × 10 ⁻⁹
L_f	Floor thickness	m	0.1
K_f	Air conductivity of the floor	m ² /Pa-h	κ_f/η
κ_f	Air permeability of uniform concrete floor	m ²	very good 10 ^{-18.5} good 10 ^{-17.5} average 10 ^{-16.5} bad 10 ^{-15.0}
C_{sa}	Soil gas concentration	g/m ³	site-specific
D_s	Effective gas diffusion coefficient in soil air	m ² /h	$\frac{D_{air} \cdot \varepsilon_{v,s}}{\varepsilon_{T,s}}$
D_a	Diffusivity in air	m ² /h	chemical-specific
$\varepsilon_{v,s}$	Soil air-filled porosity	unitless	site-specific
$\varepsilon_{T,s}$	Soil total porosity	unitless	site-specific
D_f	Effective gas diffusion coefficient in the floor	m ² /h	$\frac{D_{air} \cdot \varepsilon_{v,f}}{\varepsilon_{T,f}}$
$\varepsilon_{v,f}$	Air-filled porosity of floor	unitless	very good 0.006 good 0.015 average 0.045 bad 0.135
$\varepsilon_{T,f}$	Total porosity of floor	unitless	very good 0.012 good 0.030 average 0.090 bad 0.270 very low 0.17 low 0.33
$vv_{i,b}$	Basic air exchange rate of indoor space	1/h	average 0.50 high 0.67 very high 1.00
F_{si}	Air flux through the floor into the indoor space	m/h	F_T
A_f	Floor area	m ²	50
V_i	Volume of indoor space	m ³	150

Table S4. Definition and default value of parameters used for the estimation of contamination flux through the floor into the indoor space (J_{si}) for slab-on-grade buildings (floor with a perimeter seam gap) using Dutch RIVM guidance (Bakker et al., 2008)

Parameter	Definition	Unit	Default value
F_f	Overall air flux from the soil-floor column	m/h	$F_{crack} \cdot \frac{A_{crack}}{A_B}$
F_{crack}	Overall air flux through the perimeter seam gap	m/h	$\frac{2\pi \cdot \Delta P \cdot k_s \cdot X_{crack}}{\eta \cdot A_{crack} \cdot \ln\left[\frac{2Z_{crack}}{r_{crack}}\right]}$
A_{crack}	Total area of crack	m ²	0.0275
A_B	Floor area	m ²	50
κ_s	Air permeability in soil	m ²	coarse sand 10 ⁻¹⁰ medium sand 10 ^{-10.5} fine sand 10 ^{-11.5} silty sand 10 ^{-12.5} silt 10 ^{-13.5} clay 10 ⁻¹⁶
ΔP	Air pressure difference over the soil-floor column	Pa	1
η	Dynamic viscosity of air	Pa-h	6 × 10 ⁻⁹
L_{crack}	Length of the crack	m	30
Z_{crack}	Depth of the cavity below soil surface	m	0.1
r_{crack}	Width of crack	m	0.001
C_{sa}	Soil gas concentration	g/m ³	site-specific
D_{crack}	Effective diffusion coefficient in floor cracks	m ² /h	D_s
F_s	Overall air flux from the soil-floor column	m/h	F_f
L_s	Length of soil layer	m	site-specific
D_s	Effective gas diffusion coefficient in soil air	m ² /h	$\frac{D_{air} \cdot \varepsilon_{v,s}}{\varepsilon_{T,s}}$
D_a	Diffusivity in air	m ² /h	chemical-specific
$\varepsilon_{v,s}$	Soil air-filled porosity	unitless	site-specific
$\varepsilon_{T,s}$	Soil total porosity	unitless	site-specific

Table S5. Definition and default value of parameters used for the estimation of contamination flux through the floor into the indoor space (J_{si}) for slab-on-grade buildings (floor with gaps and holes) using Dutch RIVM guidance (Bakker et al., 2008)

Parameter	Definition	Unit	Default value
F_f	Overall air flux from the soil-floor column	m/h	$K_f \cdot \frac{\Delta P}{L_f}$
ΔP_f	Air pressure difference over the soil-floor column	Pa	1
L_s	Length of soil layer	m	site-specific
K_s	Air permeability in soil	m^2	coarse sand 10^{-10}
			medium sand $10^{-10.5}$
			fine sand $10^{-11.5}$
			silty sand $10^{-12.5}$
			silt $10^{-13.5}$
clay 10^{-16}			
L_f	Floor thickness	m	0.1
K_f	Air conductivity of the floor	$m^2/Pa\cdot h$	$\frac{f_{of}^2}{n\pi \cdot 8\eta}$
f_{of}	Fraction of openings in the floor	unitless	0.0001
n	Number of openings in the floor	unitless	10
C_{sa}	Soil gas concentration	g/m^3	site-specific
F_s	Overall air flux from the soil-floor column	m/h	F_f
D_s	Effective gas diffusion coefficient in soil air	m^2/h	see Table 3
F_{gap}	Air flux through the holes and gaps	m^2	F_f/n
A_f	Floor area	m^2	50
A_{of}	Area of openings in the floor	m^2	0.005
D_{gap}	Effective diffusion coefficient in gaps and holes	m^2	D_s
D_s	Effective gas diffusion coefficient in soil air	m^2/h	$\frac{D_{air} \cdot \varepsilon_{v,s}}{\varepsilon_{T,s}}$
D_a	Diffusivity in air	m^2/h	chemical-specific
$\varepsilon_{v,s}$	Soil air-filled porosity	unitless	site-specific
$\varepsilon_{T,s}$	Soil total porosity	unitless	site-specific

Table S6. Definition and default value of parameters used for the estimation of contaminant flux from soil through basement floor (J_f), contaminant flux from soil through basement walls (J_{bw}) and air-exchange rate for indoor space (ν_i) using Dutch RIVM guidance (Bakker et al., 2008)

Parameter	Definition	Unit	Default value
J_f	Contaminant flux from soil through basement floor	g/m ² -h	$\frac{-F_{T,f} \cdot C_{sa}}{e^{\frac{-F_{T,f} \cdot L_s}{D_s}} \cdot e^{\frac{-F_{T,f} \cdot L_f}{D_f}} - 1}$
J_{bw}	Contaminant flux from soil through basement walls	g/m ² -h	$\frac{-F_{T,bw} \cdot C_{sa}}{e^{\frac{-F_{T,bw} \cdot L_s}{D_s}} \cdot e^{\frac{-F_{T,bw} \cdot L_{bw}}{D_{bw}}} - 1}$
ν_i	Air-exchange rate for indoor space	1/h	$\frac{\nu r + F_{T,f} \cdot A_f + F_{T,bw} \cdot A_{bw}}{V_{i,b}}$
$F_{T,f}$	Overall air flux through the soil-basement floor column	m/h	$\frac{\Delta P_T}{\frac{L_s}{K_s} + \frac{L_f}{K_f}}$
$F_{T,bw}$	Overall air flux through the soil-basement wall column	m/h	$F_{T,f}$
ΔP_T	Air pressure difference over the soil-floor column	Pa	1
L_s	Length of soil layer	m	site-specific
K_s	Air conductivity of soil	m ² /Pa-h	κ_s/η
κ_s	Air permeability in soil	m ²	coarse sand 10 ⁻¹⁰ medium sand 10 ^{-10.5} fine sand 10 ^{-11.5} silty sand 10 ^{-12.5} silt 10 ^{-13.5} clay 10 ⁻¹⁶
η	Dynamic viscosity of air	Pa-h	6 × 10 ⁻⁹
L_f	Floor thickness	m	0.1
K_f	Air conductivity of the floor	m ² /Pa-h	κ_f/η
κ_f	Air permeability of uniform concrete floor	m ²	very good 10 ^{-18.5} good 10 ^{-17.5} average 10 ^{-16.5} bad 10 ^{-15.0}
C_{sa}	Soil gas concentration	g/m ³	site-specific
L_{bw}	Wall thickness	m	0.15
K_{bw}	Air conductivity of the wall	m ² /Pa-h	κ_{bw}/η
κ_{bw}	Air permeability in the wall	m ²	10 ⁻⁹
D_s	Effective gas diffusion coefficient in soil air	m ² /h	$\frac{D_{air} \cdot \varepsilon_{v,s}}{\varepsilon_{T,s}}$
D_a	Diffusivity in air	m ² /h	chemical-specific
$\varepsilon_{v,s}$	Soil air-filled porosity	unitless	site-specific
$\varepsilon_{T,s}$	Soil total porosity	unitless	site-specific
D_f	Effective gas diffusion coefficient in the floor	m ² /h	D_s
$\varepsilon_{v,f}$	Air-filled porosity of floor	unitless	Very good 0.006 Good 0.015 Average 0.045 Bad 0.135
$\varepsilon_{T,f}$	Total porosity of floor	unitless	Very good 0.012 Good 0.030 Average 0.090 Bad 0.270
D_{bw}	Effective gas diffusion coefficient in the wall	m ² /h	D_f
νr	Basic ventilation rate for indoor space	m ³ /h	125
A_f	Floor area	m ²	50
A_{bw}	Area of walls	m ²	60
$V_{i,b}$	Volume of indoor space (including basement)	m ³	250

Table S7. Definition and default value of parameters used for the estimation of contaminant flux from crawlspace into indoor space (J_{ci}) and air-exchange rate for indoor space (vv_i) using Dutch RIVM guidance (Bakker et al., 2008)

Parameter	Definition	Unit	Default value
J_{ci}	Contaminant flux from crawlspace into indoor space	g/m ² -h	$F_{ci} \cdot C_{sa}$
vv_i	Air-exchange rate for indoor space	1/h	$vv_{i,b} + \frac{-F_{ci} \cdot A_f}{V_i}$
F_{ci}	Overall air flux from crawlspace into indoor space	m/h	$\frac{f_{of}^2}{n\pi \cdot 8\eta} \cdot \frac{\Delta P_{ic}}{L_f}$
f_{of}	Fraction of openings in the floor	unitless	0.0001
n	Number of openings in the floor	unitless	10
η	Dynamic viscosity of air	Pa-h	6×10^{-9}
ΔP_{ic}	Pressure difference between indoor space and crawlspace	Pa	1
L_f	Floor thickness	m	0.1
C_{sa}	Soil gas concentration	g/m ³	site-specific very low 0.17 low 0.33 average 0.50 high 0.67 very high 1.00
$vv_{i,b}$	Basic air exchange rate of indoor space	1/h	
A_f	Floor area	m ²	50
V_i	Volume of indoor space	m ³	150