

# 유류오염부지에서 토양유래 실내공기 휘발성물질 흡입경로 인체 위해도 산정 방법의 비교 및 타당성 평가

이무열 · 김영랑 · 조윤주 · 오민아 · 이영규 · 문소영\*

서울대학교 농생명과학공동기기원

## Comparison and Validation of Human Health Risk Estimation Methods for the Inhalation Pathway of Soil-Derived Volatile Compounds in Indoor Air at Petroleum-Contaminated Sites

Mu Yeol Lee, Young Rang Kim, Yun-ju Jo, Minah Oh, Young Kyu Lee, and So Young Moon\*

National Instrumentation Center for Environmental Management (NICEM), Seoul National University

### ABSTRACT

In human health risk assessment, indoor vapor inhalation exposure concentration evaluation methods based on field measurements using multiple environmental media, including soil, soil gas and indoor air have been proposed to quantify contaminant fluxes and their vapor intrusion from soil to buildings. However, only soil and indoor air are currently considered to evaluate the impact of vapor intrusion in domestic guidelines. This study assessed indoor vapor inhalation exposure concentration and conducted human health risk assessment for BTEX and TPH in soil, soil gas and indoor air samples collected from petroleum-contaminated sites. Calculated vapor inhalation risks based on soil concentrations were approximately  $10^2$ - $10^3$  times higher than those based on soil gas and indoor air. Additionally certain compounds, such as benzene, were not detected in soil samples, indicating the potential omission of target analytes. Vapor inhalation risks based on soil gas and indoor air were generally comparable, whereas naphthalene was detected only in indoor air samples, suggesting potential interference from non-soil sources, such as external infiltration. These results highlight the essential role of soil gas measurements in accurately assessing the vapor intrusion pathway.

**Key words :** Human health risk assessment, Soil vapor intrusion, Soil gas

### 1. 서 론

토양 내에 잔류하는 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)은 높은 증기압과 기체-액체 간 분배 계수 등과 같은 물리·화학적 특성으로 인해 토양 입자 표면에서 쉽게 탈착되거나 공극수로부터 휘발하여 기체상으로 전이될 수 있다. 이러한 특성은 토양 및 지하수에 잔류한 오염물질이 토양가스를 매개로 이동할 수 있는

가능성을 높인다. 특히 휘발성이 높고 분자량이 낮으며 헨리상수가 큰 물질일수록 기체상으로의 전이가 용이하여, 지하 토양이나 지하수에 존재하던 오염물질이 건물 하부의 균열이나 틈새를 통해 실내공기로 유입될 가능성이 증가한다. 이와 같은 증기상 이동은 실내 거주자에게 노출될 경우 발암 및 비발암 위해를 유발할 수 있는 중요한 경로로 작용한다(Rodrigo-Ilari et al., 2023). 이에 따라 건물 하부 토양, 건물 주변 토양 및 건물 하부 대수층이 VOCs로 오염된 환경을 대상으로, 토양오염물질이 실내공기로 침투하는 매커니즘을 규명하고자 하는 연구가 지속적으로 수행되어 왔다. 이러한 연구에서는 토양, 토양가스와 실내 공기 등 다양한 매체를 대상으로 한 현장 실측과 함께 모델링 기법을 적용하여 실내로 유입되는 휘발성 오염물질 농도를 정량화하고 있다(Collignan et al., 2020; Provoost et al., 2010). 그러나 토양오염 분석 결과만을 활용한 VOCs의

주저자: 이무열, 연구원  
공저자: 김영랑, 선임연구원; 조윤주, 선임연구원;  
오민아, 선임연구원; 이영규, 연구교수  
\*교신저자: 문소영, 센터장  
E-mail: moon402@snu.ac.kr

Received : 2026. 03. 23 Reviewed : 2026. 04. 03  
Accepted : 2026. 04. 28 Discussion until : 2026. 06. 30

위해도 예측은 휘발, 확산 및 생분해 등의 과정을 통해 오염물질이 감소하는 시간적 변화를 충분히 반영하지 못하고 토양 내 오염물질의 장기 잔류를 가정하여 위해성평가 시 실내공기 농도를 과대 또는 과소평가할 가능성이 있다 (Devuall, 2017). 또한 토양가스 기반 방법은 보다 직접적인 지표를 제공하지만 건물 구조 및 기초 조건에 따른 감쇄 계수의 불확실성이 존재하며, 실내공기 측정은 실제 노출을 반영하지만 시간적 변동성과 실내 배경오염원의 영향으로 대표성 확보에 한계가 있다(Swartzjes, 2015). 이와 같이 VOCs의 위해성평가 시 활용하는 매체에 따라 다양한 불확실성이 존재하며, 이러한 한계에도 불구하고 기존 연구들은 주로 토양, 토양가스 및 실내공기 간 개별적인 관계 분석 또는 예측 모델 검증에 초점을 두고 수행되어 왔다. 그러나 동일 부지에서 세 매체를 동시에 측정하고 이를 기반으로 노출농도 산정 방법별 위해도 결과를 비교·평가한 연구는 상대적으로 제한적이다. 이에 따라 각 매체 기반 평가에 따른 불확실성과 위해도 차이를 종합적으로 검토할 필요가 있다. 다수의 선행 연구에서는 VOCs의 현장 실측 농도와 다양한 예측 모델의 결과를 비교·분석함으로써, 실내공기 침투에 따른 오염물질 노출을 보다 정확하게 평가하기 위해서는 토양, 토양가스 및 실내공기 등 복수 매체에 대한 통합적인 현장 실측자료의 확보가 필수적임을 강조하고 있다(Ma et al., 2020; Zhang et al., 2018).

우리나라에서는 「토양오염물질 위해성평가 지침」을 기반으로 토양과 지하수 내 휘발성 오염물질의 실내 유입 노출경로에 대한 인체 위해성 평가를 수행하고 있다. 평가에서는 토양유래 휘발성물질의 노출농도를 산정하는 방식으로 실내공기 오염물질의 농도를 직접 실측하거나 토양 오염 농도를 활용해 실내공기 오염물질 농도를 예측하는 방식을 채택하고 있다. 실내공기 오염물질의 농도 실측은 실내에서의 실제 인체 노출 수준을 반영할 수 있다는 장점이 있으나, 건물의 환기 조건, 생활 활동, 건축자재 등 주변의 요인에 영향을 받아 지하에서의 오염물질 침투가 없더라도 영향을 받을 수 있는 한계가 있다(Pennell et al., 2013). 반면, 토양오염 농도를 활용한 실내공기 오염물질의 농도 예측은 실내공기 실측이 어려운 경우에도 적용 가능하지만 토양 내 VOCs 농도의 변동성, 토양 시료 채취 과정에서 발생하는 VOCs 손실과 모델링을 통한 농도 예측의 불확실성 등으로 정확한 평가가 어려운 한계가 있다(Ma et al., 2018). 미국 환경보호청(United States Environmental Protection Agency, EPA)에서는 이러한 불확실성을 보완하기 위해서 토양가스 측정을 병행하고 측정된 농도에 감쇄계수를 적용하여 노출농도를 산정하고 있다. 토양가스는

주변환경의 영향을 받지 않고 토양유래 휘발성 오염물질의 이동 및 거동 특성을 직접적으로 반영할 수 있어 실내공기 실측 결과의 불확실성을 보완할 수 있는 지표로 평가된다 (Eklund and Burrows, 2009).

이에 본 연구에서는 국내 유류 오염 토양위해성평가 대상부지에서 토양, 토양가스 및 실내공기 3개 매체의 시료를 채취·분석하여 토양유래 실내공기 휘발성 물질의 노출농도와 위해도를 매체별로 산정하였다. 또한, 노출농도 결정 방법에 따른 위해도 산정 결과를 비교·분석함으로써 각각의 특성과 한계를 평가하고 향후 위해성 평가의 정밀도와 신뢰성 향상을 위한 방안을 제안하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 시료의 채취 및 분석

토양 시료는 「토양정밀조사의 세부방법에 관한 규정」에 따른 임의격자법을 준용하여 총 100개 지점을 선정하였으며, 각 지점에서 지표면 기준 깊이 GL(-) 0.5~1 m, 1~3 m, 3~5 m의 세 심도에서 「토양오염공정시험기준」에 따라 총 300개 시료를 채취하였다. 분석 항목은 「국내 토양오염물질 위해성평가 지침」에 명시된 석유계 총탄화수소 분획 중 휘발성 분획(Volatile Petroleum Hydrocarbons fraction, VPH fraction)에 근거하여 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌 및 휘발성 석유계 탄화수소(Volatile Petroleum Hydrocarbons, VPH)의 세 분획 구간(C<sub>5</sub>~C<sub>8</sub> 지방족, C<sub>9</sub>~C<sub>12</sub> 지방족, C<sub>9</sub>~C<sub>10</sub> 방향족)으로 총 7개 항목을 대상으로 하였다. 시료의 분석은 Purge & Trap(Tekmar Purge & Trap)이 결합된 기체 크로마토그래피-질량분석기(Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS; Thermo Trace 1310/ISQ 7000)로 분석하였다. 토양가스의 채취는 「대기오염공정시험기준」에 따라 부지 내 유류오염 부지 중심으로 설치된 13개 지하수 관측정에 호스를 연결하여 기밀 상태를 유지한 후 가스포집장치(AVS-550)를 활용하여 테들러백(10L)에 지표면 하부 1.5 m 지점에서 토양가스를 6.5 ml/min의 유량으로 채취하였다. 실내공기질 채취는 「실내공기질공정시험기준」에 따라 대상부지 내 존재하는 사무건물 내부의 사무실, 휴게실, 복도 등 총 6개 지점에서 실시하였으며 휘발성물질 포집장치(MP-Σ30KNII)를 활용하여 TO-17(3Bed) 흡착관에 0.15 L/min의 유량으로 60분간 공기 시료(총 9L)를 채취하였다. 두 매체의 시료는 1년간 분기별 1회씩 동일한 시간(14:00~16:00)에 채취하였다. 토양가스 및 실내공기 시료 분석은 미국 매사추세츠 환경보호국(Massachusetts Department of Environmental Protection, MassDEP) 지침을

준용하였으며, 분석 항목은 지침에 따른 Target APH analytes인 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌, 나프탈렌, 1,3-Butadiene, Methyl tertiary butyl ether(MTBE)와 휘발성 석유계 탄화수소의 세 분획 구간(C<sub>5</sub>~C<sub>8</sub> 지방족, C<sub>9</sub>~C<sub>12</sub> 지방족, C<sub>9</sub>~C<sub>10</sub> 방향족)으로 총 10개 항목을 대상으로 자동 열탈착 장치(Automatic Thermal Desorption, ATD; PerkinElmer ATD-400)를 결합한 GC-MS(Thermo Trace 1310/ISQ)로 분석하였다. 7종의 Target APH analytes 중 국내 위해성 평가 지침에 따른 평가대상 오염물질로 규정된 BTEX를 제외한 나프탈렌, 1,3-Butadiene 및 MTBE는 토양가스와 실내공기 측정 과정에서 발생할 수 있는 외부 오염원의 유입 또는 주변 환경 영향 여부를 파악하기 위한 보조 지표 물질로 활용하였다. 매체별 분석 항목에 대한 방법검출한계(Method Detection Limit, MDL), 정량한계(Limit of Quantitation, LOQ), 정확도 및 정밀도 등의 품질관리(Quality Assurance and Quality Control, QA/QC) 항목은 Table 1에 제시하였다.

## 2.2. 수용체 및 평가대상 오염물질 선정

대상부지는 유류 지하 저장 탱크(Underground Storage Tank, UST) 철거에 따른 토양오염도 조사 결과 유류오염이 확인된 부지로 토양·지하수에 잔류한 오염물질이 증기 형태로 건물 하부 균열이나 틈새를 통해 이동함으로써

사무건물 내부에서 활동 중 흡입에 의한 노출을 가정하였다. 수용체는 건물 내부에서 업무를 수행하는 근로자이며 평가대상 물질은 위해성평가 지침에 따른 유류오염물질 항목 중 토양, 토양가스와 실내공기 시료 분석 결과 검출된 물질인 TPH와 BTEX로 선정하였다.

## 2.3. 토양유래 실내공기 유입 휘발성물질 노출농도 결정 방법

본 연구에서는 토양유래 실내공기 유입 휘발성물질 노출농도(C<sub>ia</sub>, mg/m<sup>3</sup>)를 산정하기 위하여 토양과 토양가스 오염농도를 기반으로 실내공기 노출농도로 환산하였으며 실내공기 오염농도 현장 실측값을 실내공기 노출농도로 사용하는 등 3가지 매체의 오염농도를 활용하였다. 모든 매체의 노출농도 산정은 국내 지침에 명시된 노출인자 기본값을 반영하여 표본 데이터의 평균과 표준편차를 기반으로 t-분포에 따른 신뢰구간 계산을 통해 산출된 95% 신뢰상한값(Upper Confidence Limit, UCL)을 사용해 추정하였다.

### 2.3.1. 토양 노출농도(C<sub>s</sub>, mg/kg)를 실내공기 유입 휘발성 물질 노출농도(C<sub>ia</sub>, mg/m<sup>3</sup>) 결정

토양오염조사 과정에서 각 지점별로 최대 5 m 깊이까지 심도별로 토양을 채취하여 오염물질별 농도를 분석하였으며,

**Table 1.** Summary of QA/QC parameters for target contaminants in soil, soil gas and indoor air

Media	Contaminants	MDL (mg/kg)	LOQ (mg/kg)	Accuracy (%)	Precision (%)	
Soil	VPH	C <sub>5</sub> -C <sub>8</sub> Aliphatic Hydrocarbons	0.357	1.136	107	0.6
		C <sub>9</sub> -C <sub>12</sub> Aliphatic Hydrocarbons	0.367	1.168	96	1.2
		C <sub>9</sub> -C <sub>10</sub> Aromatic Hydrocarbons	0.300	0.956	109	1.3
		Benzene	0.013	0.042	103	1.6
		Toluene	0.020	0.062	118	1.4
		Ethylbenzene	0.018	0.056	107	1.6
		Xylenes	0.053	0.170	104	1.3
Media	Contaminants	MDL (µg/m <sup>3</sup> )	LOQ (mg/m <sup>3</sup> )	Accuracy (%)	Precision (%)	
Soil Gas, Indoor Air	APH	C <sub>5</sub> -C <sub>8</sub> Aliphatic Hydrocarbons	6.66	21.22	100.08	2.70
		C <sub>9</sub> -C <sub>12</sub> Aliphatic Hydrocarbons	2.11	6.73	100.46	2.81
		C <sub>9</sub> -C <sub>10</sub> Aromatic Hydrocarbons	1.13	3.57	99.09	2.73
		Benzene	1.21	3.87	102.00	2.72
		Toluene	0.30	0.97	100.57	1.34
		Ethylbenzene	0.16	0.52	98.10	5.01
		Xylenes	1.03	3.27	98.41	5.67
		Naphthalene	0.21	0.68	98.99	5.81
		1,3-Butadiene	0.65	2.05	98.61	10.51
Methyl tertiary butyl ether	0.91	2.89	104.64	8.58		

**Table 2.** Equation and input parameter used for exposure concentration calculation

Exposure Route	Equation
Soil vapor inhalation	$C = 90\% UCL = x + t_{95\%,df} \frac{\sigma}{\sqrt{N_2}}$

C: exposure concentration, x: mean contamination concentration,  $\sigma$ : standard deviation,  $N_2$ : total sample size,  $t_{95\%,df}$ : t-value at 95% confidence level

해당 지점의 대표농도는 식 (1)에 따라 심도가중평균값으로 산정하여 Table 2에 따라 토양 노출농도를 결정하였다. 식 (1)에서  $\bar{c}$ 는 심도별 농도의 가중평균값을 나타내며,  $l_i$ 는 i번째 심도의 두께,  $c_i$ 는 해당 심도에서 분석된 오염물질의 농도(오염물질이 검출되지 않은 심도는 정량한계 값의 1/2)를 의미한다. 결정된 토양 노출농도는 국내 지침에 제시된 3상 분배 모델을 적용하여 토양 내 오염물질이 수분, 공기, 고체상에 분포하는 물리화학적 특성을 고려하여 토양 노출농도( $C_s$ )로부터 토양가스 농도( $C_{sg}$ )를 간접적으로 예측하였으며, 이를 바탕으로 토양유래 실내공기 유입 휘발성물질의 노출농도( $C_{ia}$ )를 산정하였다. 여기서,  $C_s$ 는 토양 노출농도(mg/kg),  $\alpha$ 는 토양유래가스의 실내유입 감쇄인자(unitless),  $H$ 는 무차원헨리상수,  $\rho_b$ 는 토양용적밀도(kg/L),  $K_d$ 는 토양분배계수(L/kg),  $\theta_w$ 는 토양수분공극률(unitless)이며  $\theta_w$ 는 토양공기공극률(unitless)을 의미한다.

$$\bar{c} = \frac{\sum l_i c_i}{\sum l_i} \quad (1)$$

$$C_{ia} \left[ \frac{mg}{m^3 - air} \right] = \frac{C_s \left[ \frac{mg}{kg - soil} \right] \times \alpha \times H \times \rho_b}{K_d \times \rho_b + \theta_w + \theta_a \times H} \times 10^3 \left[ \frac{L}{m^3 - air} \right] \quad (2)$$

**2.3.2. 토양가스 노출농도( $C_{sg}$ , mg/m<sup>3</sup>)를 실내공기 유입 휘발성물질 노출농도( $C_{ia}$ , mg/m<sup>3</sup>) 결정**

지하수 관측점 지점별 1.5 m 이하 깊이에서 토양 내

기체상으로 존재하는 오염물질을 채취하여 토양가스 농도를 분석하였으며, 분기별 측정값 중 오염물질별 최고 농도(오염물질이 검출되지 않은 지점은 정량한계 값의 1/2)를 각 지점의 대표농도로 산정하여 Table 2에 따라 토양가스 노출농도를 결정하였다. 결정된 토양가스 노출농도에 국외 및 국내 지침에 따른 감쇄계수( $\alpha$ )를 적용하여 토양 유래 실내공기 유입 휘발성물질의 노출농도를 산정하였다. 감쇄계수는 MassDEP 및 국내 지침을 참고하여 0.03을 적용하였다.

$$C_{ia} \left[ \frac{mg}{m^3 - air} \right] = C_{sg} \left[ \frac{mg}{m^3 - soil \ gas} \right] \times \alpha \quad (3)$$

**2.3.3. 현장 실내공기 실측을 통한 실내공기 유입 휘발성 물질 노출농도( $C_{ia}$ , mg/m<sup>3</sup>) 결정**

대상부지 내 존재하는 사무건물 내부에서 사무실, 휴게실 복도 등 지점별로 실내공기 시료를 채취하여 오염 농도를 분석하였으며, 분기별 측정값 중 오염물질별 최고 농도(오염물질이 검출되지 않은 지점은 정량한계 값의 1/2)를 각 지점의 대표농도로 산정하여 Table 2에 따라 토양유래 실내공기 유입 휘발성물질의 노출농도를 결정하였다.

**2.4. 실내공기 휘발물질 흡입경로 위해성 평가**

**2.4.1. 노출량 산정**

토양유래 실내공기 휘발물질 흡입에 대한 인체노출량(Average Daily Exposure, ADE)은 식 (4)에 따라 산정하였다. 평가에 사용된 노출계수는 국내 지침과 평가부지의 부지특이적인 노출시나리오를 고려한 값들을 산정하였다(Table 3). 수용체는 건물 내부에서 근로하는 실내 근로자로서 부지 관계자를 통해 확인된 실제 근무시간인 1년 50주 주5일 1일 4시간을 고려하여 부지특이적 노출빈도(Exposure frequency, EF)를 41.7일/년으로 산정하였으며, 노출기간(Exposure duration, ED)은 상·공업지역 기준인 25년으로 설정하였다. 평균시간(Average time, AT)은 발암물질 25,550일, 비발암물질 9,125일로 설정하였다.

**Table 3.** Definitions and input values of exposure parameters for average daily exposure calculation

Symbol	Definition	Unit	Value
ADE	Average daily exposure	mg/m <sup>3</sup>	-
$C_{ia}$	Indoor vapor inhalation exposure concentration	mg/m <sup>3</sup>	Site specific
EF	Exposure frequency	days/year	41.7
ED	Exposure duration	years	25
AT	Average time	days	Carcinogenic: 25,550 Noncarcinogenic: 9,125

**Table 4.** Inhalation Unit Risk Factors (URF<sub>inh</sub>) and Reference Concentrations (RfC) for TPH and BTEX

Contaminants	Inhalation	
	URF <sub>inh</sub> ((μg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> )	RfC (mg/m <sup>3</sup> )
C <sub>5</sub> -C <sub>8</sub> Aliphatic Hydrocarbons	-	2.0E-1
C <sub>9</sub> -C <sub>12</sub> Aliphatic Hydrocarbons	-	2.0E-1
C <sub>9</sub> -C <sub>10</sub> Aromatic Hydrocarbons	-	5.0E-2
Benzene	7.8E-6	3.0E-2
Toluene	-	1.0E+0
Ethylbenzene	-	5.0E+0
Xylenes	-	1.0E-1

$$ADE(\text{mg}/\text{m}^3) = \frac{C_{ia} \times EF \times ED}{AT} \quad (4)$$

#### 2.4.2. 독성참고치와 발암계수

TPH와 BTEX의 위해도 산정을 위하여 국내 위해성평가 지침 및 통합위해도 정보 시스템(USEPA IRIS)을 참고하여 흡입단위위해도(Inhalation Unit Risk Factor, URF<sub>inh</sub>)와 흡입노출참고농도(Inhalation Reference Concentration, RfC)를 설정하였다. 벤젠을 제외한 다른 물질은 IRIS의 발암등급 D군(Not classifiable as to human carcinogenicity) 또는 없음으로 분류되어 흡입단위 위해도가 존재하지 않으며, 평가대상 물질들의 URF<sub>inh</sub>와 RfC는 Table 4에 제시하였다.

#### 2.4.3. 발암/비발암 위해도 산정

국내 위해성평가 지침에 따라 평가대상물질별 초과발암 위해도(Excess Cancer Risk, ECR)와 비발암위해도(Hazard Quotient, HQ)를 산정하였다(Table 5). 개별 발암 오염물질의 노출경로별 ECR을 합산하여 총초과발암위해도(Total Excess Cancer Risk, TCR)로 나타내며, 개별 비발암 오염

**Table 5.** Equations and input parameters used for Excess Cancer Risk and Hazard Quotient calculations

Inhalation Risk Assessment	Equation
Excess Cancer Risk	$ECR = URF_{inh} \times ADE \times CF_2$
Hazard Quotient	$HQ = \frac{ADE}{RfC}$

ECR: excess cancer risk, URF<sub>inh</sub>: inhalation unit risk factor ((μg/m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>), ADE: average daily exposure (mg/m<sup>3</sup>), CF<sub>2</sub>: unit conversion factor (10E+3 μg/mg), HQ: Hazard Quotient, RfC: inhalation reference concentration (mg/m<sup>3</sup>)

물질의 노출경로별 HQ를 합산하여 위험지수(Hazard Index, HI)로 표현한다. 다만, TPH의 위험지수는 TPH fraction에 따른 모든 분획 구간별 HQ를 총합하여 HI를 결정한다. 허용가능한 총초과발암위해도는 10<sup>-6</sup>~10<sup>-5</sup>, 위험지수는 1이며 산정된 값이 허용가능한 총초과발암위해도 또는 위험지수의 값보다 크면 발암/비발암 위해성이 있는 것으로 판단한다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1. 검출물질 분석결과 및 비교

Table 6은 토양, 토양가스 및 실내공기 내 검출된 오염 물질을 비교하여 나타낸 결과이다. 토양 100개 지점에서 분석 항목 7개 중 벤젠을 제외한 6개 항목이 검출되었다. 토양가스 13개 지점에서 분석 항목 10개 중 나프탈렌, 1,3-Butadiene과 Methyl tertiary butyl ether를 제외한 7개 항목이 검출되었으며, 실내공기 6개 지점에서 분석 항목 10개 중 1,3-Butadiene과 MTBE를 제외한 8개 항목이 검출되었다. 토양조사에서 검출되지 않은 벤젠은 토양가스 13개 지점 중 11개 지점에서 1.340~48.211μg/m<sup>3</sup> 농도로 검출되었으며, 실내공기 6개 지점 중 5개 지점에서

**Table 6.** Number of sampling locations with detected contaminants in soil, soil gas and indoor air

Contaminants	Soil (n=100)	Soil Gas (n=13)	Indoor Air (n=6)
C <sub>5</sub> -C <sub>8</sub> Aliphatic Hydrocarbons	43/100	4/13	6/6
C <sub>9</sub> -C <sub>12</sub> Aliphatic Hydrocarbons	54/100	13/13	6/6
C <sub>9</sub> -C <sub>10</sub> Aromatic Hydrocarbons	31/100	13/13	4/6
Benzene	0/100	11/13	5/6
Toluene	3/100	13/13	6/6
Ethylbenzene	5/100	13/13	6/6
Xylenes	7/100	13/13	6/6
Naphthalene	- <sup>1)</sup>	0/13	1/6
1,3-Butadiene	- <sup>1)</sup>	0/13	0/6
Methyl tertiary butyl ether	- <sup>1)</sup>	0/13	0/6

1) Compound was not analyzed of the applied analytical method

1.260~5.313  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  농도로 검출되었다. 여러 문헌에 따르면, 토양 내 벤젠이 존재하더라도 검출한계 미만의 농도로 인해 토양 시료에서는 검출되지 않을 수 있으며 벤젠은 휘발성이 높아 기체상으로 이동하면서 토양가스 및 실내 공기에서 검출될 수 있는 것으로 알려져 있다(EPA, 1996; Zhang et al., 2018). 이는 토양 분석 결과를 기반으로 위해성평가를 수행할 경우 평가대상물질의 누락으로 인하여 과소평가의 가능성이 발생한다. 실내공기 6개 지점 중 1개 지점에서는 토양가스 조사에서 검출되지 않은 나프탈렌이 0.720  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  농도로 검출되었다. 나프탈렌은 다환방향족 탄화수소(Polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH)의 일부로 금속 및 화학 산업공정, 휘발유와 석유 연소, 차량 배기가스 등 화석연료의 불완전 연소에서 주로 발생하는 물질로 흡연, 건축자재, 가정용품 등 다양한 물질에서도 배출되는 것으로 알려져 있다(Batterman et al., 2012; Kang et al., 2012). 나프탈렌이 검출된 지점은 여성휴게실로 사용되고 있으며 가구 및 방향제 등 가정용품이 비치되어 있으며, 건물 외부에서는 작업자의 흡연 및 작업차량의 이동이 빈번한 환경이다. 또한 휴게 및 개인 위생을 위한 용도로 사용되는 공간의 특성상 화장품, 개인 위생용품 등의 사용이 다른 실내공기 측정 지점에 비해 빈번할 수 있다.

특히 토양오염이 없는 지역의 실내외 배출원으로 인한 나프탈렌의 실내 농도가 0.2~2.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  수준임을 고려할 때, 해당 지점에서 검출된 나프탈렌은 토양에서 유래한 오염 물질의 실내 유입 보다는 실내 가정용품과 건축자재 및 건물 주변 차량 운행 등 실내외 요인에 의해 영향을 받았을 가능성이 높다(Jia and Batterman, 2010). 이는 실내공기 분석 결과 기반으로 위해성평가를 수행할 경우 주변 환경 요인의 간섭으로 인해 평가 결과의 불확실성이 증가할 수 있다는 기존 연구 결과와 일치한다(EPA, 2015; Xie et al., 2023). 다만 본 연구에서는 해당 건물의 건축자재에 대한 정보 및 관련 자료가 충분히 확보되지 않아 나프탈렌의 오염원을 명확히 구분하는 데에는 한계가 존재한다.

**3.2. 매체별 노출농도 및 위해성평가 결과 비교**

Table 7은 3가지 방법으로 결정된 토양유래 실내공기 유입 휘발성물질 노출농도와 위해도 산정 결과이다. 토양 가스 및 실내공기 노출농도는 모든 물질에서 서로 유사하게 나타났다. 그러나 토양 노출농도는 TPH의 세 분획과 TEX에서 토양가스와 실내공기 노출농도 대비 약  $10^2\sim 10^3$ 배 크게 산정되었으며 검출되지 않은 벤젠의 노출농도는 존재하지 않는다. 토양의 TPH 분획 구간별 비발암위해도는

**Table 7.** Calculated indoor vapor inhalation exposure concentration, Total Excess Cancer Risk (TCR) and Hazard Index(HI)

Contaminants	Indoor vapor inhalation exposure concentration (mg/m <sup>3</sup> )		
	Soil	Soil Gas	Indoor Air
C <sub>5</sub> -C <sub>8</sub> Aliphatic Hydrocarbons	6.37E+02	2.63E-01	2.50E-01
C <sub>9</sub> -C <sub>12</sub> Aliphatic Hydrocarbons	5.33E+01	9.87E-01	1.43E-01
C <sub>9</sub> -C <sub>10</sub> Aromatic Hydrocarbons	2.21E+00	4.32E-03	9.19E-03
Benzene	- <sup>1)</sup>	6.96E-04	4.07E-03
Toluene	8.11E-02	3.47E-03	1.16E-02
Ethylbenzene	1.08E-01	2.53E-04	2.43E-03
Xylenes	7.06E-02	6.35E-04	5.16E-03
Contaminants	Total Excess Cancer Risk and Hazard Index		
	Soil	Soil Gas	Indoor Air
C <sub>5</sub> -C <sub>8</sub> Aliphatic Hydrocarbons	3.64E+02	1.50E-01	1.43E-01
C <sub>9</sub> -C <sub>12</sub> Aliphatic Hydrocarbons	3.04E+01	5.64E-01	8.17E-02
C <sub>9</sub> -C <sub>10</sub> Aromatic Hydrocarbons	5.06E+00	9.87E-03	2.10E-02
∑TPH fractions	3.99E+02	7.24E-01	2.46E-01
HI Benzene	- <sup>1)</sup>	2.65E-03	1.55E-02
HI Toluene	1.85E-03	7.92E-05	2.65E-04
HI Ethylbenzene	1.23E-02	2.89E-05	2.78E-04
HI Xylenes	8.07E-02	7.25E-04	5.89E-03
TCR Benzene	- <sup>1)</sup>	2.22E-07	1.29E-06

1) Not detected

C<sub>5</sub>-C<sub>8</sub> 지방족 3.64E+02, C<sub>9</sub>-C<sub>12</sub> 지방족 3.04E+01, C<sub>9</sub>-C<sub>10</sub> 방향족 5.06E+00로 TPH 총합계 3.99E+02로 산정되어 국내 지침에 따른 허용가능한 위험지수 1을 약 400배 가까이 초과하였다. 반면, 토양가스와 실내공기 위해도는 TPH 총합계 7.24E-01과 2.46E-01로 위험지수가 1을 초과하지 않았다. 일반적으로 유류 성분은 토양 내 유기물에 강하게 흡착되어 토양 시료 분석 시 입자에 잔류한 유기화합물이 함께 측정됨으로써 토양오염 농도가 토양가스나 실내공기 오염 농도에 비해 상대적으로 높게 검출될 가능성이 있는 것으로 알려져 있다(Park and Park, 2010; Rodrigo-Illari et al., 2023; Varona-Torres et al., 2017). 또한 토양의 3상 분배식 등 모델링을 통한 기체형태 오염 농도의 예측은 실제 토양오염물질의 자연적 또는 미생물에 의한 분해 영향을 충분히 반영하기 어려운 한계가 있다(Provoost et al., 2009). 선행 연구에서도 토양 농도를 기반으로 실내공기 위해도를 산정할 경우 오염물질의 장기 잔류 및 지속적인 휘발을 가정하는 경향이 있어 토양 내 오염물질이 실제 실내공기로 전달되는 과정에서 시간이 지남에 따라 발생하는 감쇄 효과가 충분히 반영하지 못하며, 이에 따라 수 자릿수 수준까지 차이가 발생할 수 있는 것으로 보고된 바 있다(Devauil, 2017). 따라서 본 연구에서와 같이 토양 입자에 잔류한 유기화합물이 함께 측정되어 실제보다 높은 토양오염 농도가 검출되거나 매체간 이동 및 감쇄 과정을 충분히 반영하지 못하여 모델링 결과의 불확실성이 증가할 수 있으며, 그 결과 위해도가 과대 산정되었을 가능성이 있는 것으로 판단된다. 한편, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 등 다른 오염물질들의 비발암위해도는 토양, 토양가스 및 실내공기 등 모든 매체에서 허용가능한 위험지수 1을 초과하지 않았다. 벤젠의 경우 토양조사에서는 검출되지 않아 토양 노출농도는 산정되지 않았다. 그러나 토양가스와 실내공기 현장 실측에서는 벤젠이 검출되었으며 산정된 노출농도는 토양가스 6.96E-04와 실내공기 4.07E-03이다. 벤젠의 발암위해도는 토양가스 2.22E-07, 실내공기 1.29E-06으로 허용가능한 총초과발암위해도  $10^{-6}$ ~ $10^{-5}$ 의 범위를 만족하며, 비발암위해도는 토양가스 2.65E-03, 실내공기 1.55E-02로 위험지수 1을 초과하지 않았다. 전체적으로 실내공기의 발암/비발암 위해도가 토양가스 대비 약 6배 높게 나타났다. 이와 같이 실내공기 기반 위해도가 토양가스 대비 높게 나타난 이유는 (1) 감쇄계수의 적용 과정의 불확실성과 (2) 실내공기 측정 과정에서 주변 환경요인의 복합적 영향에 기인한 것으로 판단된다(EPA, 2015). 그러나 본 연구에서 적용한 감쇄계수 0.03은 여러 선행 연구에서 제시된 범위( $10^{-1}$ ~ $10^{-5}$ ) 내에서도 보수적인 값에 해당하며,

이는 토양유래 오염물질의 실내공기 유입에 따른 실제 노출 수준을 충분히 반영한 것으로 판단된다(Brewer et al., 2014; Derycke et al., 2018; Eklund et al., 2023). 따라서 본 연구에서 산정된 높은 실내공기 노출농도는 낮은 감쇄 계수 값의 적용보다는 주변 오염원, 오염물질의 농축, 환기 조건 등 실내공기 측정 과정에서의 환경적 요인의 영향이 반영된 결과로 해석된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 유류오염 부지에서 토양, 토양가스 및 실내 공기 등 3개 매체를 분석하여 검출된 TPH와 BTEX의 매체별 토양 유래 실내공기 흡입 노출농도를 산정하고 위해성 평가를 수행하였다. 위해성평가 결과 (1) 토양오염 농도에 기반한 실내공기 노출농도 예측값과 위해도는 토양가스와 실내공기를 기반으로 산정된 값들에 비해 약  $10^2$ ~ $10^3$ 배 높게 산정되었으며, 벤젠이 검출되지 않아 평가에서 제외되었다. (2) 토양가스와 실내공기에 기반하여 산정한 노출농도 예측값과 위해도는 유사한 경향을 나타내나, 실내공기 시료에서만 토양오염 기원이 아닌 주변 환경요인의 간섭으로 나프탈렌이 검출되었다. 이러한 결과는 단일 매체 분석 결과에만 기반한 위해성평가는 평가 대상물질의 누락이나 주변 환경요인의 간섭 등으로 인해 높은 불확실성을 가지며, 그 결과 평가가 과소 혹은 과대 추정될 수 있음을 보여주었다. 따라서 향후 토양유래 휘발성물질 흡입경로 평가에서는 토양가스 실측 등을 병행한 다양한 매체의 분석을 통해 해석하는 통합적 접근이 필요하며, 이는 평가의 신뢰성을 높이고 오염물질의 실내 유입으로 인한 영향을 정밀하게 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

#### References

- Batterman, S., Chin, J.Y., Jia, C., Godwin, C., Parker, E., Robins, T., Max, P., and Lewis, T., 2012, Sources, concentrations, and risks of naphthalene in indoor and outdoor air, *Indoor Air*, **22**(4), 266-278.
- Brewer, R., Nagashima, J., Rigby, M., Schmidt, M., and O'Neill, H., 2014, Estimation of generic subsurface attenuation factors for vapor intrusion investigations, *Groundwater Monitoring & Remediation*, **34**(4), 79-92.
- Collignan, B., Diallo, T.M., Traverse, S., Chastanet, J., Abadie, M., Powaga, E., Hulot, C., Romani, Z., Allard, F., and Grasset, M., 2020, Methodology for the in situ characterisation of soil

- vapor contaminants and their impact on the indoor air quality of buildings, *Building and Environment*, **177**, 106900.
- Derycke, V., Coftier, A., Zornig, C., Leprond, H., Scamps, M., and Gilbert, D., 2018, Environmental assessments on schools located on or near former industrial facilities: Feedback on attenuation factors for the prediction of indoor air quality, *Science of the Total Environment*, **626**, 754-761.
- DeVaull, G.E., 2017, Improved exposure estimation in soil screening and cleanup criteria for volatile organic chemicals, *Integrated Environmental Assessment and Management*, **13**(5), 861-869.
- Eklund, B. and Burrows, D., 2009, Prediction of indoor air quality from soil-gas data at industrial buildings, *Groundwater Monitoring & Remediation*, **29**(1), 118-125.
- Eklund, B., Ricondo, C., Artz-Patton, H., Milose, J., and Wong, C. W., 2023, Development of a default vapor intrusion attenuation factor for industrial buildings, *Groundwater Monitoring & Remediation*, **43**(1), 35-43.
- Massachusetts Department of Environmental Protection(Mass-DEP), 2009, Method for the determination of air-phase petroleum hydrocarbons (APH), Massachusetts, USA.
- Ministry of Environment (MOE), 2025a, Regulations on the detailed method of soil investigation, Sejong in Republic of Korea.
- Ministry of Environment (MOE), 2025b, Risk Assessment Guidelines of Soil Contaminant, Sejong in Republic of Korea.
- Jia, C. and Batterman, S., 2010, A critical review of naphthalene sources and exposures relevant to indoor and outdoor air, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **7**(7), 2903-2939.
- Kang, D.H., Choi, D.H., Won, D., Yang, W., Schleibinger, H., and David, J., 2012, Household materials as emission sources of naphthalene in Canadian homes and their contribution to indoor air, *Atmospheric Environment*, **50**, 79-87.
- Ma, J., Jiang, L., and Lahvis, M. A., 2018, Vapor Intrusion Management in China: Lessons Learned from the United States, *Environmental Science & Technology*, **52**(6), 3338-3339.
- Ma, J., McHugh, T., Beckley, L., Lahvis, M., DeVaul, G., and Jiang, L., 2020, Vapor intrusion investigations and decision-making: A critical review, *Environmental Science & Technology*, **54**(12), 7050-7069.
- Park, I.-S. and Park, J.-W., 2010, A novel total petroleum hydrocarbon fractionation strategy for human health risk assessment for petroleum hydrocarbon-contaminated site management, *Journal of Hazardous Materials*, **179**(1-3), 1128-1135.
- Pennell, K.G., Scammell, M.K., McClean, M.D., Ames, J., Weldon, B., Friguglietti, L., Suuberg, E.M., Shen, R., Indeglia, P.A., and Heiger-Bernays, W.J., 2013, Sewer gas: an indoor air source of PCE to consider during vapor intrusion investigations, *Groundwater Monitoring & Remediation*, **33**(3), 119-126.
- Provoost, J., Bosman, A., Reijnders, L., Bronders, J., Touchant, K., and Swartjes, F., 2010, Vapour intrusion from the vadose zone—seven algorithms compared, *Journal of Soils and Sediments*, **10**(3), 473-483.
- Provoost, J., Reijnders, L., Swartjes, F., Bronders, J., Seuntjens, P., and Lijzen, J., 2009, Accuracy of seven vapour intrusion algorithms for VOC in groundwater, *Journal of Soils and Sediments*, **9**(1), 62-73.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2022, Air Pollution Process Test Standards, Incheon in Republic of Korea.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2022, Soil Contamination Process Test Standards, Incheon in Republic of Korea.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2023, Indoor Air Quality Test Standards, Incheon in Republic of Korea.
- Rodrigo-Illari, J., Rodrigo-Clavero, M.-E., Capilla, J.E., and Romero-Ballesteros, L., 2023, Environmental assessment of soil and groundwater pollution by BTEX leaching in Valencia Region (Spain), *Water*, **15**(18), 3279.
- Swartjes, F., 2015, Human health risk assessment related to contaminated land: state of the art, *Environmental geochemistry and health*, **37**(4), 651-673.
- USEPA, 1996, Soil screening guidance: User's guide, Washington, DC.
- USEPA, 2015, Technical guide for addressing petroleum vapor intrusion at leaking underground storage tank sites, Washington, DC.
- Integrated Risk Information System (IRIS), <https://www.epa.gov/iris> [accessed 05.01.26]
- Varona-Torres, E., Carlton Jr, D.D., Payne, B., Hildenbrand, Z. L., and Schug, K.A., 2017, The characterization of BTEX in variable soil compositions near unconventional oil and gas development, In: Advances in chemical pollution, environmental management and protection, Elsevier, *Place*, 321-351.
- Xie, S., Ström, J.G., and Suuberg, E.M., 2023, Contaminant sorption on soil and indoor materials and its possible impact on transients in vapor intrusion—An example based upon trichloroethylene (TCE), *Journal of Hazardous Materials*, **446**, 130721.
- Zhang, R., Jiang, L., Zhong, M., Han, D., Zheng, R., Fu, Q., Zhou, Y., and Ma, J., 2018, Applicability of soil concentration for VOC-contaminated site assessments explored using field data from the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, *Environmental Science & Technology*, **53**(2), 789-797.