

유류 오염지역 토양의 위해성 평가 및 사전복원목표 산정 사례연구

정 규 혁

성균관대학교 약학부

Case Study of Health Risk Assessment and Preliminary Remediation Goals Calculation for the Petroleum Contaminated Site

Kyu-Hyuck Chung

College of Pharmacy, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

ABSTRACT

As concerns on the effects of soil contamination on human health have grown, more efforts have been made to quantify the effects. One of such efforts is the development of risk assessment methodology. The fundamental objectives of this approach is to investigate the alternative options that reduce the risk of hazardous chemicals results from environmental pollution, which will eventually lead to an accomplishment of removal of identified toxicants in polluted environment. The U.S. EPA Risk Assessment guidance for the superfund (RAGS) provides a methods for assessing the health risk of contaminated soils and determining the preliminary remediation goals (PRGs). Using this approach, we assessed the health risk and preliminary remediation goals of petroleum contaminated site in Kyounggi province.

Key words : Soil contamination, Risk assessment, Preliminary remediation goals

서 론

토양의 오염은 인간 및 생태계에 있어 여러 경로를 통한 접촉에 의해 독성영향을 미치게 된다. 따라서 인체 및 생태의 건강에 미치는 악영향을 사전에 예방하기 위해 위해성에 기초한 토양오염의 정확한 진단과 적정수준의 복원목표의 설정이 요구된다. 토양오염 위해성 평가모델로는 lifetime exposure model과 human exposure to soil pollutant

(HESP) model 등 인체에 대한 노출을 추정하기 위한 모델과 오염지역에서의 유해성분의 공기 중으로의 방출량 또는 토양처리과정에서 방출되는 오염물질의 농도를 수학적모델에 의해 추정하기 위한 모델 등 토양오염물질의 다른 매체로의 이동을 추정하기 위한 다양한 모델이 소개되고 있다(Hawley, 1985). 최근에는 토양오염물질의 동태 및 이동을 감안한 위해성평가 모델인 SoilRisk (Labieniec 등, 1996), GEOTOX (Loranger 및 Zayed, 1997), CALTOX (McKone, 1993) 등이 소개되어 있다. RAGS (Risk assessment guidance for superfund, EPA, 1989)는 토양오염지역으로 선정된 지역의 복원 전과정

※ To whom correspondence should be addressed.

Tel: 82-31-290-7714, E-mail: khchung@skku.ac.kr

을 평가하기 위한 절차를 제시한 것으로서 기본적인 토양 위해성평가에 활용하기 적합하다.

위해성평가와 사전복원목표 설정단계로는 우려대상 매체의 확인단계, 노출경로와 방법, 노출인자 및 수식 확인단계, 독성정보 단계, 위해도 및 목표 위해도 수준 결정단계 및 수정단계로 구분할 수 있다(미국, EPA 1997; Loranger 및 Zayed, 1997). RAGS는 토양오염지역의 위해성평가 및 복원사업 관리와 관련된 참여자의 지침을 자세히 제시하고 있다. 사전복원목표(PRGs, Preliminary Remediation Goals)는 장기간의 목적 하에 복원계획을 수립하는데 있어 복원대책을 분석하고 선정하는 과정에 이용되게 된다. 복원대상지역을 조사하고 타당성을 연구하는 초기단계에 PRGs를 결정함으로써 복원대책의 범위와 효과적인 복원방법의 선정이 가능하게 된다. PRGs를 결정하는데에는 우려대상 매체의 현황, 우려대상 화학물질의 오염현황, 향후 토양의 이용성 등 현장특성의 조사자료가 요구된다. RAGS의 지침에는 매체나 토지사용 범위내에서 위해도에 근거한 PRGs를 산출할 수 있도록 표준화된 노출변수, 위해도 산정수식 등을 제시하고 있으며 위해도의 산출에는 특정경로, 매체 및 토지사용의 복합적 상태에서 화학물질 노출에 의한 잠재적 위해도를 반영하도록 하고 있다. 발암효과에 대한 총위해도는 10^{-6} 을 기준으로 하고 비발암효과에 대한 총위해도인 Hazard Index (HI)는 1을 그 기준값으로 정하고 있다.

본 연구에서는 페인트 제조 회사의 유류 저장탱크(경유일종, 자일렌 및 톨루엔 등)에서 유출된 유류로 인하여 주변 토양이 오염되어 문제가 되었던 경기도 소재의 지역을 대상으로 오염된 토양 및 지하수의 위해성을 RAGS (EPA, 1989)의 지침에 따라 평가하고 그 복원 목표를 산정하였다.

재료 및 방법

1. 조사대상 지역의 토양 특성

조사대상은 경기도 군포시 소재 A, B공장지역 인근에 개천이 흐르고 야산이 존재하며 개천 하상 수위까지의 높이가 3~4m로 우수기에 지하수위가 하천의 높이에 영향을 받을 수 있는 지형조건을

갖고 있다. 오염원인 유류 저장탱크는 페인트를 제조하는 회사인 B공장에 있으며 지상탱크 3개 지하탱크 3개를 보유하고 있다.

정밀조사에서는 오염확산의 근원지로 인정된 B공장의 유류저장탱크를 조사지점의 기준 원점으로 하였다. 이 저장탱크에 존재하는 유류물질 및 용량은 경유일종 140,000 l, 자일렌 140,000 l 및 톨루엔 140,000 l이었으며 지하탱크의 저장물질 및 용량은 경유 6,000 l, 방카 A 12,000 l 및 방카 C 12,000 l이었다. 이 지역의 오염은 B공장의 탱크지역 경계면인 A공장 주차장 및 테니스장 인근에서 지하수 흐름방향 북쪽인 A공장으로 거동하고 있다는 것이 확인되었다.

토양시료 채취위치의 선정은 공장의 사업장 부지 전체를 구획하여 오염의 진행성 및 확산정도를 고려하여 오염원이 검출되지 않는 지역으로부터 오염원 발생 기준지역까지 근접하면서 시료 채취 시추공을 선정하였다. 위해성 평가에 활용한 시료 채취 시추공에서 채취된 토양에 대한 물리적 성질 분석 결과 표토와 심토의 투수계수가 5.01×10^{-4} m/s 및 6.72×10^{-5} m/s로 높아 물의 침투가 용이할 것으로 추정되었고 오염의 전도 또한 용이할 것으로 판단되었다. 표토와 심토의 함수비는 42.3% 및 50.2%이었으며 비중은 2.54 및 2.87, 공극률은 1.009 및 1.007이었다.

2. 조사대상 지역의 오염성분 및 독성학적 평가

오염도 측정결과 오염지역의 주요성분은 톨루엔(toluene), 등유(kerosene)이며 유류저장시설 주변에는 경유(diesel)가 혼재되어 검출되는 것으로 분석되었으며 BTEX의 오염농도가 1,000 ppm 정도로서 우리나라기준의 대책지역에 해당한다. 오염면적은 43,000 m² 정도이며 공장지역내에 부분적으로 넓게 오염이 확산되어 있음이 관찰되었다.

화학물질로 오염된 토양의 잠재적인 독성을 평가(screening)하는 여러 가지 단기간의 시험법 중 유류오염토양의 발암효과를 평가하기 위한 기법으로서 Ames test를 선정하여 오염된 지역에서의 독성에 대한 평가를 수행하였다. 시료의 전처리에는 토양시료의 경우 100 g의 시료에 dichloromethane 50 ml를 넣고 30분간 sonication을 2회 반복 수행하여 추출한 후 원심분리하여 얻어진 상등액을 rotary

evaporator로 건조시켰다. 여기에 dimethyl sulfoxide (DMSO)를 5g/1 ml가 되도록 넣어 녹인 후 시험에 사용하였다. 물시료의 경우에는 시료를 여과하여 멸균한 후 동결건조 농축시킨 후 그 pellet을 DMSO에 녹여 사용하였다. Ames test는 Maron 및 Ames (1983)의 방법에 따라 실시하였다. 시험관(13 mm × 50 mm, glass)에 시험물질 0.1 ml 및 0.2 M PBS (phosphate buffered saline, pH 7.4) 또는 S9 혼합액 0.5 ml를 넣어 혼합한 후 37°C에서 30분간 전배양 하였다. 배양 종료 후 *Salmonella typhimurium* 균주 (TA98 또는 TA100)와 top agar를 첨가하여 혼합하고 변이원성 검색용 배지 (minimal glucose agar medium)에 넣어 굳힌 후, 37°C에서 48시간 배양하여 생성된 복귀돌연변이 집락의 수를 계수하였다. 복귀돌연변이 집락의 수는 3개의 plate의 평균치로 나타내고, 돌연변이 유발에 대한 판정은 용매대조의 2배 이상 복귀변이 집락수를 나타내고 용량 의존성을 가지는 경우를 양성으로 하였다.

3. 위해성 평가 및 사전복원목표 산정 방법

위해성 평가 및 사전복원목표 산정은 미국 EPA의 RAGS (Risk Assessment Guidance for Superfund) guideline (EPA, 1989)에 준하여 실시하였다. 발암성 물질에 대한 위해성 평가 (Total Risk of Cancer, TR) 및 비발암성 물질의 위해성 평가 (Total Hazard Index, THI)를 각각 산출한 후 발암 위해도인 TR 값이 10⁻⁶ 이상일 경우와 비발암에 대한 총위해도 THI 값이 1 이상일 경우를 위해성이 있는 것으로 판정하였다. 조사대상 지역의 토양에서는 대부분 비발암물질이 발견되어 토양 위해성 평가에 대해서는 비발암물질에 대한 평가를 수행하였으며 지하수에서 발암물질인 bis (2-ethylhexyl) phthalate가 발견되어 물에 대한 위해성 평가에 대해서는 발암물질에 대해 수행하였다.

1) 산업/상업지역 토양에 대한 비발암 위해성 평가 및 복원목표 산정

본 조사대상 지역은 산업/상업지역에 해당되므로 이에 대한 위해성을 평가하였다. 산업 및 상업용지의 토양에 대한 위해도 평가는 직접적인 토양 섭취, 토양으로부터 휘발성물질의 흡입, 토양 입자의 흡입에 기인하는 것을 추정하고 있다. 또한 성인

근로자에 한하여 산출하고 있다(토양에 의한 총위해도 = 토양 섭취에 의한 위해도). 주거지역보다는 중장비 및 관련 운송수단의 사용 가능성이 높기 때문에 토양입자나 휘발성 물질의 방출 가능성이 높아진다. 또한 특정 지역에서는 피부 노출 등 다른 경로도 예상될 수 있으므로 이러한 경우에는 당면한 모든 노출경로가 복원 조사 단계에서 고려되어 위해도를 산출하여야 한다. 기본적인 위해도 평가로서 다음 세가지 노출경로에 의해 총위해도를 평가하였다.

$$\begin{aligned} \text{총위해도} &= \text{근로자의 토양 섭취를 통한 위해도} \\ &+ \text{근로자의 토양으로부터의 휘발성 물질 흡입을 통한 위해도} \\ &+ \text{근로자의 토양입자 흡입을 통한 위해도} \end{aligned}$$

토양 중에 함유된 화학물질의 비발암 위해성은 식 1에 의해 THI를 산출하였으며 그 결과 THI가 1보다 클 경우 위해성이 있는 지역으로 평가하고 조사지역에서 THI가 1에 해당하는 화학물질의 사전복원목표 (PRGs) 농도는 식 1에서 유도한 식 2에 의해 산출하였다. 사전복원목표 농도는 조사지역 토양에서의 조사대상물질에 대한 포화농도 (saturation concentration)와 비교하여 더 적은 값으로 선정한다. 포화농도를 계산하는 방법은 식 3에 나타내었다.

$$\begin{aligned} \text{THI} &= \frac{C \times 10^{-6} \text{ kg/mg} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{IR}_{\text{soil}}}{\text{RfD}_o \times \text{BW} \times \text{AT} \times 365 \text{ days/yr}} \\ &+ \frac{C \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{IR}_{\text{air}} \times (1/\text{VF} + 1/\text{PEF})}{\text{RfD}_i \times \text{BW} \times \text{AT} \times 365 \text{ days/yr}} \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C \text{ (mg/kg; risk-based)} &= \frac{\text{THI} \times \text{BW} \times \text{AT} \times 365 \text{ days/yr}}{\text{ED} \times \text{EF} \times \left[\left(\frac{1}{\text{RfD}_o} \right) \times 10^{-6} \text{ kg/mg} \times \text{IR}_{\text{soil}} + \left(\frac{1}{\text{RfD}_i} \right) \times \text{IR}_{\text{air}} \times (1/\text{VF} + 1/\text{PEF}) \right]} \quad (2) \end{aligned}$$

- THI : target hazard index (unitless)
- C : chemical concentration in water or soil (mg/L)
- RfD_o: oral chronic reference dose (mg/kg-day)
- RfD_i: inhalation chronic reference dose (mg/kg-day)
- BW : adult body weight (kg)
- AT : averaging time (yr) (for noncarcinogens, equal to ED)
- EF : exposure frequency (days/yr)
- ED : exposure duration (yr)

IR_{soil} : soil ingestion rate (mg/day)

IR_{air} : workday inhalation rate (m^3/day)

VF : soil-to-air volatilization factor (m^3/kg)

PEF : particulate emission factor (m^3/kg)

토양의 오염물질에 대한 포화농도는 토양의 특성 및 화학물질의 특성에 따라 달라지는데 미국 EPA에서 제시한 식 3에 의해 구하였다.

$$C_{sat} = (K_d \times s \times n_m) + (s \times \theta_m) \quad (3)$$

K_d : soil-water partition coefficient (L/kg), $K_{oc} \times OC$

K_{oc} : organic carbon partition coefficient (L/kg)

OC : organic carbon content of soil (fraction)

s : solubility (mg/L-water)

n_m : soil moisture content (expressed as a weight fraction)

θ_m : soil moisture content (expressed as L-water/kg-soil)

2) 산업/상업지역 지하수에 대한 비발암 및 발암 위해성 평가 및 복원목표 산정

미국 EPA의 가이드라인에 의하면 상업 및 산업 용지의 위해도 평가에 있어서 표층수 또는 지하수에 의한 위해도는 음용수로서 이용 가능할 경우에는 그 위해도를 평가하고 거주자 및 근로자에 대한 사전복원목표 (PRGs)를 산출하도록 하고 있다. 기본적인 위해도 평가로서 다음 두가지 노출경로에 의해 총위해도를 평가하였다.

총위해도 = 근로자의 물 섭취를 통한 위해도
+ 근로자의 물로부터의 휘발성 물질 흡입을 통한 위해도

지하수에 함유된 화학물질의 비발암 위해성은 식 4에 의해 THI를 산출하였으며 그 결과 THI가 1보다 클 경우 위해성이 있는 지역으로 평가하고 조사지역에서 THI가 1에 해당하는 화학물질의 사전복원목표 (PRGs) 농도는 식 4에서 유도한 식 5에 의해 산출하였다.

$$THI = \frac{C \times IR_w \times EF \times ED}{RfD_o \times BW \times AT \times 365 \text{ days/yr}} + \frac{C \times K \times IR_a \times EF \times ED}{RfD_i \times BW \times AT \times 365 \text{ days/yr}} \quad (4)$$

C (mg/L; risk-based) =

$$\frac{THI \times BW \times AT \times 365 \text{ days/yr}}{EF \times ED \times [(1/RfD_i \times K \times IR_a) + (1/RfD_o \times IR_w)]} \quad (5)$$

C : chemical concentration in water (mg/L)

THI : target hazard index (unitless)

RfD_o : oral chronic reference dose (mg/kg-day)

RfD_i : inhalation chronic reference dose (mg/kg-day)

BW : adult body weight (kg)

AT : averaging time (yr) (for noncarcinogens, equal to ED)

EF : exposure frequency (days/yr)

ED : exposure duration (yr)

IR_a : daily indoor inhalation rate (m^3/day)

IR_w : daily water ingestion rate (L/day)

K : volatilization factor (unitless)

지하수 중에 함유된 화학물질의 발암 위해성은 식 6에 의해 TR을 산출하였으며 그 결과 TR이 10^{-6} 보다 클 경우 위해성이 있는 지역으로 평가하고 조사지역에서 TR이 10^{-6} 에 해당하는 화학물질의 사전복원목표 농도는 식 6에서 유도한 식 7에 의해 산출하였다.

$$TR = \frac{SF_o \times C \times IR_w \times EF \times ED}{BW \times AT \times 365 \text{ days/yr}} + \frac{SF_i \times C \times K \times IR_a \times EF \times ED}{BW \times AT \times 365 \text{ days/yr}} \quad (6)$$

C (mg/L; risk-based) =

$$\frac{TR \times BW \times AT \times 365 \text{ days/yr}}{EF \times ED \times [(SF_i \times K \times IR_a) + (SF_o \times IR_w)]} \quad (7)$$

TR : target excess individual lifetime cancer risk (unitless)

C : chemical concentration in water (mg/L)

SF_i : inhalation cancer slope factor ($(mg/kg-day)^{-1}$)

SF_o : oral cancer slope factor ($(mg/kg-day)^{-1}$)

BW : adult body weight (kg)

AT : averaging time (yr) (always equals to ED)

EF : exposure frequency (days/yr)

ED : exposure duration (yr)

IR_a : daily indoor inhalation rate (m^3/day)

IR_w : daily water ingestion rate (L/day)

K : volatilization factor (unitless) (Andelman 등, 1990)

결과 및 고찰

1. 현장시료의 발암성 평가

오염지역의 물과 토양의 발암성을 평가하기 위해 Ames test를 실시한 결과 Table 1에서 보는 바와 같이 *Salmonella typhimurium* TA98, TA100 등 2종의 시험 용균제에서 S-9 혼합액 적용하지 않은 직접법의 경우, 전용량단계에 걸쳐서 음성대조와 같은 정도의 복귀변이 집락수를 나타내었다. S-9 mix를 이용한 대사활성화법에 있어서도 대체적으로 S-9 혼합액 적용하지 않은 직접법과 유사한 결과를 나타내었다. 양성대조 화합물은 S-9 혼합액 첨가한 대사활성화의 경우와 직접법에서 각각의 시험용 균주에 대하여 복귀변이 집락수를 증가시켜 본 실험이 적절히 행하여졌음을 나타내었다. 이상의 결과에서 볼 때 유류 저장 탱크 인근에 오염된 토양에 대한 유전독성시험에 있어 실험 토양과 수질 시료에서는 돌연변이 유발성을 가지지 않는

Table 1. Mutagenic effect of soil and water samples determined by Ames test

CHEMICAL	AMOUNT	S-9	Revertant	
			TA98	TA100
Soil (in DMSO)	50 mg/plate	+	29.7±3.1	165.3±22.8
		-	26.0±4.6	158.3±19.6
	500 mg/plate	+	27.7±4.7	175.3±0.6
		-	21.7±5.5	164.3±8.0
	DMSO (control)	+	23.4±2.3	180.7±8.0
		-	15.0±4.4	177.3±5.0
Water	100.0 µl/plate	+	55.3±5.9	173.0±9.6
		-	54.3±10.0	180.3±21.5
	50.0 µl/plate	+	65.0±11.0	168.0±15.1
		-	52.7±9.3	161.3±3.8
	25.0 µl/plate	+	64.3±9.7	181.0±18.5
		-	45.0±4.6	175.7±14.0
	12.5 µl/plate	+	62.0±11.4	183.7±40.5
		-	47.0±7.0	176.7±6.4
	D.W. (control)	+	56.7±6.4	180.0±15.7
		-	45.3±5.5	188.7±18.6

D.W.: Distilled Water

Results are expressed as means and S.D. (standard deviation) of three separate experiments for each data point.

것으로 사료되어 발암유발물질에 의한 오염이 되어 있지 않거나 미약한 것으로 나타나 이 지역의 위해성 평가시에는 비발암효과를 중심으로 평가가 이루어져야 할 것으로 판단되었다.

2. 노출인자 및 기타 인자의 산정

조사대상 지역의 오염물질의 인체 노출 경로로는 공기의 흡입, 토양의 직접적 노출에 의한 것으로 추정되었으며 이 지역은 산업지역에 속하기 때문에 성인에 대한 노출을 기준으로 하고 노출기간은 사람에 대한 만성노출에 대한 집단의 위해도를 측정하기 위해 사용되는 30년의 평균세대 간격을 기준으로 하였다.

노출인자의 평균값은 이미 보고된 국내자료를 활용하여 산정하였다(연세대, 1995; 이효민 등, 1997). 노출빈도는 월평균 24.5일과 평균체중은 60 kg으로 하였고 성인의 음수량은 2l/day로 선정하였다. 토양 섭취율은 50 mg/day, 흡입율은 국내 의과대학의 비공식적 자료 중 일할 때의 값으로서 이용된 IR_a 값인 20 m³/day로 선정하였다. RfD (Reference dose), RfC (Reference concentration), SF_o (Cancer slope factor; oral) 및 SF_i (Cancer slope factor; inhalation) 값은 미국 EPA의 자료를 이용하였다. 또한 국내 통계 자료가 설정되어 있지 않는 항목에 대해서도 미국 EPA에서 지정한 수치를 사용하였다(EPA, 1989). Table 2에 PEF 및 VF를 제외한 수식 1과 2에 활용될 모든 인자들의 수치를 표시하였다.

VF (soil to air volatilization factor) 및 PEF (Particulate Emission Factor) 값은 조사 지역의 현장자료 및 미국 EPA의 RAGS 가이드라인에 의해 제시된

Table 2. Exposure factor values for risk assessment

	Factor	Unit	Values
BW	adult body weight	kg	60
AT	averaging time (always equals to ED)	yr	30
EF	exposure frequency	days/yr	294
ED	exposure duration	yr	30
IR _a	daily indoor inhalation rate	m ³ /day	15
IR _w	daily water ingestion rate	l/day	2
K	volatilization factor (Andelman <i>et al.</i> , 1990)	l/m ³	0.0005 × 1000
IR _{soil}	soil ingestion rate	mg/day	50
IR _{air}	workday inhalation rate	m ³ /day	20

Table 3. Calculation of Particulate Emission Factor (PEF) and VF (soil to air volatilization factor)

$$\text{PEF (m}^3/\text{kg)} = \frac{\text{LS} \times \text{V} \times \text{DH} \times 3600 \text{ s/hr}}{\text{A}} \times \frac{1000 \text{ g/kg}}{0.036 \times (1-G) \times (\text{Um}/\text{Ut})^3 \times \text{F(x)}} \quad (1)$$

$$\text{VF (m}^3/\text{kg)} = \frac{\text{LS} \times \text{V} \times \text{DH}}{\text{A}} \times \frac{(3.14 \times \alpha \times \text{T})^{1/2}}{(2 \times \text{D}_{ei} \times \text{E} \times \text{K}_{as} \times 10^{-3} \text{ kg/g})} \quad (2)$$

$$\alpha \text{ (cm}^2/\text{s)} = \frac{(\text{D}_{ei} \times \text{E})}{\text{E} + (\text{P}_s) (1 - \text{E})/\text{K}_{as}} = 4.479 \times 10^{-4}$$

	Factor	Unit	Values
LS	width of contaminated area	m	60
V	wind speed in mixing zone	m/s	2.25
DH	diffusion height	m	2
A	area of contamination	m ²	43,152
0.036	respirable fraction	g/m ² -hr	0.036
G	fraction of vegetative cover	unitless	0
Um	mean annual wind speed	m/s	4.5
Ut	equivalent threshold value of wind speed at 10 m	m/s	12.8
F(x)	function dependent on Um/Ut (Cowherd 1985)	unitless	0.0497
A	area of contamination (m ² × 10,000 cm ² /m ²)	cm ²	43,152 × 10,000
D _{ei}	effective diffusion (D _i × E ^{0.33} = 0.086 × 0.30 ^{0.33})	cm ² /s	0.0578
E	true soil porosity	unitless	0.30
K _{as}	soil/air partition coefficient, 41 : conversion factor, (H/K _d × 41 = 6.61 × 10 ⁻³ /5.18 × 41)	g soil/cm ³ air	5.23 × 10 ⁻²
P _s	true soil density or particulate density	g/cm ³	2.87
T	exposure interval	s	7.9 × 10 ⁸
D _i	molecular diffusion	cm ² /s	0.086
H	Henry's law constant	atm-m ³ /mol	6.61 × 10 ⁻³
K _d	soil-water partition coefficient (K _{oc} × OC = 259 × 0.02)	cm ³ /g	5.18
K _{oc}	organic carbon partition coefficient	cm ³ /g	259
OC	organic carbon content of soil (fraction)	unitless	0.02

기타 인자에 대한 값들이 얻어지면 식 1 및 2에 각 항목을 대입하여 그 값을 산정할 수 있다. 계산 결과 토양입자의 배출계수, PEF는 2.898×10^8 m³/kg, 토양의 대기로의 확산계수, VF는 363.6 m³/kg으로 나타났다. 식 1 및 식 2와 계산에 사용될 모든 인자의 수치는 Table 3에 표시하였다.

3. 조사대상 지역의 위해성 평가 및 사전복원 목표 산정

조사대상 지역의 현장토양 시료 중에 함유된 화학물질을 GC-MS로 분석한 결과 toluene과 ethylbenzene이 가장 많이 오염되어 있는 성분으로 나타났다. 따라서 이들 화학물질을 조사대상 지역의 위해성 평가 및 사전복원목표치를 산정하기 위한 대상 화학물질로 선정하였다. 한편 오염된 지하수 현

장시료의 독성학적 평가에서는 발암성이 나타나지 않았으나, GC-MS 분석 결과 발암성이 있는 bis(2-ethylhexyl)-phthalate가 검출된 경우가 있어 이에 대한 발암 위해성을 평가하고 사전복원목표치를 산정하였다.

1) Toluene에 대한 위해성 평가 및

사전복원목표 산정

동물모델의 만성독성시험에서 toluene의 반복 투여는 중추신경계에 유해한 영향을 미치고 상위 호흡기계와 간 및 신장을 손상시킬 수 있음이 나타나 있다. 유해한 결과를 나타내는 경로는 경구 및 흡입이다. 미국 EPA에서 사람에게 신경행동학적인 유해한 영향을 유발하는 최소효과농도 (lowest-observed-effect level, LOEL)는 88 ppm이고, 노출에 따른 경구 RfD₀는 0.2 mg/kg/day, 흡입 RfC₁는

0.11 mg/kg/day로 제시되어 있다. Toluene의 발암등급은 D group으로 인체 발암성 물질로 분류되어 있지 않다(U.S. EPA, 1998). 따라서 비발암효과에 대한 위해성을 평가하였으며 향후 토지이용은 공장부지이므로 상업/산업 용지로 하여 평가하였다.

이 지역에서의 toluene의 인체 노출 경로로는 공기의 흡입, 토양의 직접적 노출에 의한 것으로 추정하였으며 지하수 및 지표수를 이용한 급수는 하지 않는 것으로 조사되어 이에 의한 노출은 제외하였다.

조사대상 지역 토양의 toluene 오염에 대한 위해성을 평가한 결과 Table 4에서 보는 바와 같이 시추공에서 채취한 시료 중 toluene이 오염되어 있는 것으로 나타난 4개 시료(S1, S2, S3 및 S4)에 대해 실험방법에 제시한 식 1에 따라 비발암 위해성 평가를 수행하였다. 그 결과 오염농도가 각각 1,170 mg/kg 및 820 mg/kg인 S1 및 S2의 경우 THI가 7.86 및 5.51로서 1보다 높은 수치를 나타내 위해성이 있는 것으로 판단되었다.

이 지역 토양의 toluene에 대한 사전복원목표(PRGs)는 미국 EPA의 RAGS 가이드라인에 따라 THI 1을 기준으로 하였으며 식 2에 따라 구한 결과 148.9 mg/kg으로 산출되었다. 사전복원목표치는 지역 특성에 따라 차이가 나타나게 되는데 미국 EPA에서는 toluene에 대한 산업지역 토양의 사전복원목표치를 520 mg/kg으로 제시한 바 있다(EPA, 1998). 본 조사대상 지역의 경우 148.9 mg/kg으로 산출되어 이보다 낮았다. 미국 EPA에서는 산출된 사전복원목표치의 오염물질의 농도가 그 토양의 포화농도보다 낮을 경우에는 산출된 농도를 사전복원목표 농도로 하고 산출된 사전복원목표치의 오염물질의 농도가 그 토양의 포화농도보다 높을 경우에는 실제 포화농도를 사전복원목표로 산정하고 있다. 본 조사대상지역의 경우에는 토양 중의 toluene의 포화농도를 구하기 위해 Table 5에서 보는 바와 같은 현장 측정값을 식 3에 대입하여 계산한 결과 478.1 mg/kg인 것으로 나타났다. 따라서 본 조사에서 산출된 조사 대상지역 토양의 사전복원목표 농도는 이보다 낮은 148.9 mg/kg이므로 이를 사전복원목표로 할 수 있다. 이와 비교할 때 Table 4에서 보는 바와 같이 위해성이 있는 것으로 나타난 S1 및 S2지점의 토양의 경우 toluene 농도가 사전복원목표치 보다 5~10배 정도 높게 오염

Table 4. Non-cancer risk assessment of toluene in contaminated soil

Sampling site	S1	S2	S3	S4
Concentration (mg/kg)	1,170	820	0.46	3.93
Total Hazard Index (THI)	7.86	5.51	3.1×10^{-3}	2.6×10^{-2}

S : soil samples

Table 5. Calculation of saturation concentration of toluene

$C_{sat} = (K_d \times s \times n_m) + (s \times \theta_m)$ (3)			
Factor	Unit	Values	
K_d : soil-water partition coefficient, $K_{oc} \times OC$	(L/kg)	5.18	
K_{oc} : organic carbon partition coefficient (L/kg)		259	
OC : organic carbon content of soil (fraction)		0.02	
s : solubility	(mg/L-water)	515	
n_m : soil moisture content (expressed as a weight fraction)	kg/kg	0.1502	
θ_m : soil moisture content (expressed as L-water/kg-soil)	L/kg	0.1502	

Table 6. Non-cancer risk assessment of toluene in ground water

Sampling site	GW1	GW2	GW3
Concentration (mg/l)	7,110	207,000	60,100
Total Hazard Index (THI)	7.46×10^3	2.17×10^5	6.31×10^4

GW : ground water samples

되어 있음을 알 수 있었다.

조사대상 지역 지하수의 toluene 오염에 대한 위해성을 평가한 결과 Table 6에서 보는 바와 같이 3개 시료(GW1, GW2 및 GW3)에서 모두 매우 높은 위해도를 나타내었다. Toluene의 이 지역 지하수에 대한 사전복원목표(THI=1)를 식 5에 따라 구한 결과 953 $\mu\text{g/l}$ 로 산출되었다. 따라서 지하수 중의 toluene은 사전복원목표보다 $7 \times 10^3 \sim 2 \times 10^5$ 배 높게 오염되어 있음을 알 수 있었다(Table 6).

2) Bis(2-ethylhexyl) phthalate에 대한 위해성 평가 및 사전복원목표 산정

Bis(2-ethylhexyl) phthalate는 대부분 호흡을 통해 발암 및 기형을 유발시키고 남성생식기에 손상을 줄 수 있는 인간에 있어 발암유발가능 물질로 분류되어 있으며 동물실험에서 간암 유도 사례가

Table 7. Cancer risk assessment of bis(2-ethylhexyl) phthalate in ground water

	GW1	GW2	GW3
Concentration (mg/l)	2.60	55.60	0.21
TR*	4.64×10^{-3}	9.93×10^{-2}	3.71×10^{-4}

*TR : target excess individual lifetime cancer risk

GW : ground water samples

있다. 급성 독성은 노출 즉시 눈, 코, 그리고 기관지에 자극을 준다. 만성 노출의 경우에는 수달 혹은 수년 내에 그 증상이 나타나게 된다.

미국 EPA에서 경구 RfD와 흡입 RfC는 각각 0.02 mg/kg/day, 0.022 mg/kg/day이고 발암성에 대한 경구 CSF와 흡입 CSF 0.014 mg/kg/day, 0.014 mg/kg/day로 제시하고 있다. Bis(2-ethylhexyl) phthalate에 대한 발암등급은 B2 group으로 인체 발암 가능 물질로 분류되어 있다(U.S. EPA, 1998).

이 지역에서의 bis(2-ethylhexyl) phthalate의 인체 노출 경로로는 이 지역에 있어서 물의 섭취 및 사용에 따른 노출에 의한 것으로 추정할 수 있다. 기타 다른 인자의 수치는 toluene에 제시한 것과 동일하게 적용하였다.

조사대상 지역 지하수의 bis(2-ethylhexyl) phthalate 오염에 대한 위해성을 식 6에 따라 평가한 결과 Table 7에서 보는 바와 같이 3개 시료 모두 TR이 10^{-6} 이상으로서 발암 위해성이 있는 것으로 나타났다. 이들 지점의 사전복원목표($TR = 10^{-6}$)를 미국 EPA의 RAGS 가이드라인에 따라 구한 결과(식 7), 5.61×10^{-4} mg/l로 산출되어 시료에서 검출된 농도가 모두 이보다 높은 것으로 나타났다. 미국 EPA에서 제시한 산업지역 지하수의 bis(2-ethylhexyl) phthalate의 사전복원목표치로서 9.6×10^{-4} mg/l를 제시한 바 있어(EPA, 1998) 이와 비교할 때 낮게 산출되었다.

결 론

경기도 소재의 페인트 제조 회사의 유류 저장탱크에서 유출된 유류로 인하여 오염된 토양 및 지하수에 대하여 미국 EPA의 RAGS (Risk Assessment Guidance for Superfund) 가이드라인에 의해 발암 및 비발암 위해성을 평가하고 사전복원목표

를 산정하였다. 오염지역의 주요 오염성분은 톨루엔(toluene), 등유(kerosene)이며 유류저장시설 주변에는 경유(diesel)가 혼재되어 검출되는 것으로 분석되었으며 BTEX의 오염농도가 1,000 ppm 정도로서 우리나라 기준의 대책지역에 해당하였다. 오염면적은 43,000 m² 정도이며 공장지역 내에 부분적으로 넓게 오염이 확산되어 있음이 관찰되었다. Ames test에 의한 변이원성 평가시험 결과 오염된 지역의 물과 토양은 *Salmonella typhimurium* TA98과 TA100 2종의 균주에서 S-9 혼합물을 적용하거나 적용하지 않은 경우 모두에서 돌연변이 유발성을 가지지 않는 것으로 나타났다.

조사대상 지역의 오염물질의 인체 노출 경로로는 공기의 흡입, 토양의 직접적 노출에 의한 것으로 추정하였으며 이 지역은 산업지역에 속하기 때문에 성인에 대한 노출을 기준으로 하고 노출기간은 사람의 만성노출에 대한 집단의 위해도를 측정하기 위해 사용되는 30년의 평균세대 간격을 기준으로 하였다. 노출빈도는 월평균 24.5일, 평균체중 60 kg, 음수량 2 l/day를 사용하였고 토양섭취율은 50 mg/day, 흡입율은 20 m³/day로 선정하였으며 기타 여러 인자는 이미 보고되어 있는 자료를 활용하였다. 토양입자의 배출계수(PEF)는 미국 EPA에서 제시한 다음의 식에 의해 계산한 결과 2.898×10^8 m³/kg으로 산출되어 이 값을 사용하였다. 발암 위해성 평가는 발암위해도(TR) 값이 10^{-6} 이상일 경우 위해성이 있는 것으로 판정하였고 비발암 위해성 평가는 총위해도(THI) 값이 1 이상일 경우 위해성이 있는 것으로 판정하였다.

조사대상 지역 toluene 오염에 대한 위해성을 평가한 결과 토양시료 중 2개 시료에서 THI 1이상의 비발암 위해성이 있는 것으로 나타났으며 사전복원목표치(THI = 1)는 148.9 mg/kg으로 산출되었다. 지하수에 대한 평가결과 3개 시료 모두 toluene 오염으로 인한 매우 높은 비발암 위해도를 나타내었으며 사전복원목표치는 953 µg/l로 산출되었고 지하수에서 검출된 Bis(2-ethylhexyl) phthalate 오염에 대한 발암 위해성을 평가한 결과 3개 시료 모두 발암 위해성이 있는 것으로 나타났으며 사전복원목표치($TR = 10^{-6}$)는 5.61×10^{-4} mg/l로 산출되었다. 그러나 노출경로 조사에서 음용수 등으로 사용되지 않아 노출 우려가 없으므로 실제 위해성은 없다고 할 수 있다. 그러므로 이지역의 복원대상은

토양으로 한정할 수 있으며 toluene으로 인한 비발암 위해성을 해소하기 위해 복원목표치 148.9 mg/kg까지 정화복원을 하는 것이 요구되었다.

감사의 글

본 연구는 환경부 환경기술개발연구(G7) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Andelman JB. Total Exposure to Volatile Organic Chemicals in Potable Water. Ram NM, Christman RF, Cantor KP (eds.). 1990. Lewis Publishers.
- Cowherd C, Muleski G, Engelhart P, and Gillete D. Rapid Assessment of Exposure to Particulate Emissions from Surface Contamination. Prepared for EPA Office of Health and Environmental Assessment EPA/600/8-85/002, 1985.
- Maron DM and Ames BN. Revised Methods for the *Salmonella* Mutagenicity Test, Mutation Research 1983; 113: 173-215.
- Hawley JK. Assessment of Health Risk from Exposure to Contaminated Soil, Risk Analysis 1985; 5: 4.
- Loranger S and Zayed, J. Environmental Contamination And Human Exposure Assessment To Manganese In The St-Lawrence River Ecozone (Quebec, Canada) Using An Environmental Fate/Exposure Model: Geotox. SAR and QSAR in Environmental Research 1997, Vol. 6.
- McKone TE. (1993) CalTOX, a multimedia total exposure model for hazardous-waste sites. UCLA-CR-111456 PtI, Department of Toxic Substances Control, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.
- Labieniec PA, Dzombak DA and Siegrist RL. Members, ASCE (1996) Soil Risk: Risk Assessment Model For Organic Contaminants In Soil, Journal Of Environmental Engineering 1996; 122: 5.
- U.S. EPA (1989) Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I Human Health Evaluation Manual. EPA/540/1-89/002, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, D.C.
- U.S. EPA (1997) Guidance on Cumulative Risk Assessment. Part 1. Planning and Scoping.
- U.S. EPA (1998) Preliminary Remediation Goals (PRGs), EPA Region 9.
- 연세대학교 환경공해연구소. (1995) 수질오염물질의 위해성평가 및 관리기술, 환경부 G-7 보고서.
- 이효민, 박송자, 김명수, 윤은경, 최시내, 김신태, 박중새. 특정지역에서 토양 중 PCB의 분석과 인체노출량평가, 환경독성학회지 1997; 13(1,2): 49-54.