

위해성평가에 기초한 일부 유류오염지역의 Remedial Design

이효민, 최시내, 윤은경, 홍지연, 김길생, 광무영*, 조성룡**

식품의약품안전청 위해도평가실

*대조바이오텍(주), **한국과학기술연구원 환경복원연구센터

I. 개요

위해성평가는 위험성을 지닌 유해화학물질의 확인된 노출로부터 나타날 수 있는 유해영향발생확률을 평가하는 작업이다. 토양복원 계획 설정시 위해성평가의 적용은 토양중 오염물질의 모니터링자료, 미래토지이용 계획, 오염물질의 독성자료, 인체노출자료등을 토대로 해당오염물질에 대한 인체위해도치를 구할 수 있고, 산출된 위해도와 허용위해도치를 비교하여 복원목표를 설정할 수 있다(U.S.EPA, 1989).

본 연구에서는 일부유류오염지역을 대상으로 측정된 TPH(Total Petroleum Hydrocarbon)값에 근거하여 상업지역으로의 미래토지용도를 고려한 인체건강위해성평가를 실시하고, 구해진 인체위해도치와 복원목표치를 비교하여 복원계획을 설정하여 토양복원작업에 쓰여지는 위해성평가방법의 적용예를 설명코자 하였다. 이와 같은 목적을 위하여 첫째, TPH오염도자료를 비롯한 지역정보자료를 조사하였으며, 둘째, TPH화합물의 독성평가를 할 수 있는 대표물질을 선정하여 독성값을 구하였고, 셋째, 유류오염지역을 상업지역으로 사용할 경우 상업지역에 대한 노출변수 및 시나리오를 설정하여 인체노출평가를 실시하였고, 넷째, 상업지역으로의 토지사용에 대한 위해도치를 계산하였으며 다섯째, 최종적으로 도출된 인체위해도치와 복원목표치를 비교하므로 복원기술적용시 현오염도수준을 낮추는 복원계획을 세우고자 하였다.

II. 연구내용 및 방법

1. 측정방법

유류오염지역의 TPH측정은 root-zone soil(1cm-지하 1m)을 대상으로 EPA method 418.1 에 의해 수행되어졌다. TPH 분석은 토양중 petroleum product 혹은 crude oil평가에 쓰여지는 일반적인 방법이다.

2. TPH 대표물질선정

TPH에 대한 위해성평가를 위하여 “Surrogate” 접근방법을 선택하였다.

Surrogate 접근방법은 단일대표물질(single surrogate compound)을 써서 인체위해성을 평가하는 방법으로 대부분 benzene과 같은 발암물질을 써서 평가하는데 benzene은 방향족 화합물에 대한 대표물질로 쓰여진다.

본 연구에서도 benzene을 대표물질로 선정하여 위해성평가에 적용하였다.

3. 인체노출평가

인체노출평가는 오염지역을 상업지역으로 활용할 경우 노출가능한 경로 (실외에서 호흡을 통한 노출, 실내에서 호흡을 통한 노출, 토양의 직접섭취를 통한 노출, 토양에 대한 피부노출)를 고려하여 평가하였으며, 평가시 표1과 같은 노출변수를 활용하였다.

Root-zone soil로부터 인체노출평가를 위하여 CalTOX[®] program을 활용하였다.

표 1. 상업지역의 토지활용시 인체노출평가에 쓰여진 주요인체노출변수

인체노출변수		설정값
체중		62 kg(California EPA)
노출기간		25 yr(U.S.EPA, 1989)
노출빈도		250 day/yr(U.S.EPA, 1989)
호흡을 통한 노출	호흡률	20m ³ /day(California EPA)
섭취를 통한 노출	일일토양섭취율	0.35 mg/kg bw/day (California EPA)
피부흡수를 통한 노출	체표면적 (Cal.EPA)	0.026m ² /kg bw (California EPA)
	피부침투계수	0.0466 cm/hr (California EPA)
	피부-물 분배계수	13.9 (unitless) (California EPA)

Ⅲ. 연구결과

1. TPH 오염도 결과

유류오염지역 513m³지역규모의 토양시료 9개를 대상으로 분석된 TPH 오염도 수준은 94~1982 ppm, 평균 477.33 ppm 이었다.

2. TPH의 독성값

TPH의 대표물질 benzene에 대한 역학자료를 활용하여 발암력 $2.9 \times 10^{-2}(\text{mg/kg/day})^{-1}$ 을 위해도치 계산을 위한 독성값으로 선택하였다(표2).

표 2. Benzen의 발암력 유도에 사용된 역학자료들 (IRIS,1998)과 발암력

Source	Exposure		Cancer type	Risk
	rout	dose		
Rinsky et al., 1981	Inhalation (occupational)	< 40ppm/year >200ppm/year	Leukemia	SMR* = 109 SMR = 2339
Ott et al., 1978	Inhalation (occupational)	2ppm~25ppm/8hrs (23년이상노출)	Leukemia	SMR = 194
Wong, 1983	Inhalation (occupational)	720ppm/month (6개월이상노출)	Lymphatic and hematopoietic cancer	Relative risk = 3.93

· Extrapolation Method = One-hit model
· Oral Slope Factor = $2.9 \times 10^{-2} (\text{mg/kg/day})^{-1}$

* SMR = Standard Mortality Ratio (real death/expected death)

3. 토지활용시 인체노출량

Root-zone soil중에 benzene농도가 평균 477.33 mg/kg 일 때 CalTOX[®]를 이용한 다른 환경매체내 농도는 표 3과 같이 계산되어졌으며, 성인을 대상으로 상업지역의 토지활용시 계산된 인체노출경로별 만성일일노출량은 표 4와 같았다.

표 3 .CalTOX를 이용한 매체내 오염물질농도 예측

환경매체	매체내 농도
Air(mg/m ³)	2.6×10^{-4}
Plants(mg/kg)	0.48
Ground-surface soil(mg/kg)	1.2×10^{-3}
Root-zone soil(mg/kg)	4.4×10^{-1}

표 4. 인체노출경로별 만성일일노출량(체중당 노출량)

노출경로	노출형태	노출량(mg/kg/day)
섭취노출	토양의 직접섭취	3.5×10^{-1}
호흡노출	실내공기(활동시) 호흡	0.52
	실내공기(휴식시) 호흡	0.05
	실외공기(활동시) 호흡	0.005
피부노출	토양의 피부침착	1.46×10^{-5}
총 인체노출량		0.575

4. 인체위해도결과

성인을 대상으로 벤젠의 실내·외 공기호흡, 토양섭취, 피부노출을 고려하여 계산한 만성일일노출량과 벤젠의 백혈병에 대한 발암력 $2.9 \times 10^{-2} \text{ (mg/kg/day)}^{-1}$ 를 토대로 구한 최종인체위해도결과는 1.67×10^{-2} 였다.

5. 복원목표설정

TPH의 오염도 94~1982 ppm (평균 477.33 ppm)과 대표물질 benzene을 고려하여 구한 백혈병에 대한 위해도 결과는 1.67×10^{-2} 이어서 안전한 수준이라고 판단할 수 없었다, 따라서, 복원목표를 1.0×10^{-5} , 1.0×10^{-6} 으로 설정할 경우의 TPH 복원목표 농도를 역추적하므로써 각각 4.2ppm, 0.42ppm에 해당하는 복원목표치를 구할 수 있었다.