

석유화학단지의 휘발성 유기화합물로 인한 인체 위해도 평가

A Health Risk Assessment of VOCs in a Petrochemical Complex

류영태, 유인석, 이진홍, *김윤신

충남대학교 환경공학과, *한양대학교 의과대학

1. 서론

위해도 평가는 크게 인체 위해의 확인(hazard identification) 및 위해의 정량화(hazard quantification)라는 두 단계 평가로 이루어진다. 위해의 확인 평가는 오염물질이 인체에 암 또는 그 밖의 만성적인 영향을 끼칠 가능성을 평가하는 과정인데, 기존의 위해도 평가 연구에서 이 과정은 두 번째 단계인 위해의 정량적인 평가만큼 강조되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 대상 오염물질의 발암 등급이 강조될 것이며, 발암물질의 발암성은 인체의 피폭 경로와 관련이 있다는 점이 고려될 것이다. 그리고 본 연구는 기존의 독성 데이터에 근거하여 인체의 발암성(cancer potency)을 평가하는 제반 선량-반응 모델을 분석, 평가하여 최적 모델을 선정, 발암 위해도를 평가하게 될 것이며, 최종적으로 위해도의 불확실성을 분석하는 방법을 논의하게 될 것이다.

2. 위해도 평가 방법

위해도 평가방법은 미국 NAS(National Academy of Sciences)가 1983년, 위해도 평가 과정을 1) 위해의 확인(hazard identification), 2) 피폭량 평가(exposure assessment), 3) 선량-반응 평가(dose-response assessment) 및 4) 위해도 결정(risk characterization)의 4단계로 정의하면서 보다 뚜렷하게 정립되었다고 할 수 있다.

위해의 확인 평가는 특정 오염물질이 인체에 암 또는 그 밖의 만성적인 악영향을 유발하는지를 평가하는 과정인데, 개개의 오염물질에 대한 방대한 양의 동물 실험자료 및 역학 조사자료에 근거하여 적절히 평가한다. 피폭량 평가는 특정 오염물질의 환경내 농도를 인체의 피폭 경로와 연결시켜 지역 주민의 피폭량을 산출하는 과정이다. 세 번째 단계는 피폭량과 이로 인하여 인체에 암 또는 그밖의 만성적인 악영향을 미칠 확률을 평가하는 단계인데, 이를 위한 모델은 여러가지가 있다. 인체에 미치는 오염물질의 발암성(cancer potency)을 평가할 경우, 발단선량을 갖지 않는 선형 모델(linear non-threshold model)이 주로 이용되는데, 이는 보수적인 평가를 하기 위함이다. 그리고 오염물질의 발암성을 평가하는데 사용되는 자료는 동물실험에서 나온 자료보다 기존의 역학조사에서 나온 자료가 선호된다. 위해도 정량화의 최종 단계는 불확실성 분석을 포함한 위해도의 결정인데, 발암물질인 경우 발암 위해도를 평가하고, 비발암 물질인 경우 일일 노출량을 평가하여 기준 선량(RfD : Reference Dose)과의 비교치인 위해 지표(Hazard Index)로 비발암 위해도를 평가한다.

3. 결과 및 고찰

휘발성 유기화합물로 인한 발암 위해도는 지역내 평균 농도 데이터를 이용하여 산출되었고, 그 결과는 표 1에 정리되어 있다. 인체 발암물질인 Benzene으로 인한 발암 위해도가 4.2×10^{-5} 이고, 유력한 발암물질인 1,3-Butadiene, Carbon tetrachloride 및 Chloroform으로 인한 위해도는 2.2×10^{-4} 정도이다. 석유화학단지의 총 발암 위해도는 2.6×10^{-4} 으로 허용 위해도 기준치인 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ (U.S. EPA, 1987)을 초과할 우려가 있는 것으로 사료된다. 그리고 인체 발암물질인 Benzene에 의한 발암 위해도는 총 발암 위해도의 20% 이하지만, 인체 발암물질이라는 점에서 기타 유력한 발암물질보다 더 주의가 요청된다.

휘발성 유기화합물로 인한 비발암 위해도는 표 2에 나타나 있는데, 발암물질중 Benzene과 1,3-Butadiene은 기준 선량에 대한 자료가 없기 때문에 위해 지표를 산출할 수 없었다. Carbon tetrachloride의 위해 지표가 0.63으로 1에 가깝지만 1 이하이고 Chloroform 및 기타 비발암 휘발성 유기

화합물의 위해 지표는 모두 0.03 이하로 상당히 작다. 그러나 이러한 비발암 위해도 평가 역시 발암 위해도 평가와 마찬가지로 제한된 데이터를 바탕으로 평가되었고 이러한 제한된 데이터는 석유화학단지에 대한 연평균 또는 장기 평균 농도에 바탕하여 수행되어야 하는 위해도 평가의 불확실성을 크게 가중시킨다.

Table 1. Average carcinogenic risk of VOCs from inhalation exposure

Pollutant	Carcinogenic group	Geometric mean ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Unit risk ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ⁻¹	Carcinogenic risk
Benzene	A	5.119	8.3×10^{-6}	4.2×10^{-5}
1,3-Butadiene	B2	0.684	2.8×10^{-4}	1.9×10^{-4}
Carbon tetrachloride	B2	1.524	1.5×10^{-5}	2.3×10^{-5}
Chloroform	B2	0.082	2.3×10^{-5}	1.9×10^{-6}
Total carcinogenic risk				2.6×10^{-4}

Table 2. Hazard index of VOCs from inhalation exposure

Pollutant	LADE (mg/kg/day)	Chronic RfD (mg/kg/day)	Hazard index
<u>Carcinogenic VOCs</u>			
Benzene	1.5×10^{-3}	NA ^{a)}	
1,3-Butadiene	2.0×10^{-4}	NA ^{a)}	
Carbon tetrachloride	4.4×10^{-4}	7×10^{-4}	6.3×10^{-1}
Chloroform	2.3×10^{-5}	1×10^{-2}	2.3×10^{-3}
Total hazard index			6.3×10^{-1}
<u>Non-carcinogenic VOCs</u>			
Ethylbenzene	3.9×10^{-4}	1×10^{-1}	3.9×10^{-3}
Styrene	6.4×10^{-4}	2×10^{-1}	3.2×10^{-3}
Toluene	4.3×10^{-3}	2×10^{-1}	2.2×10^{-2}
o-Xylene	6.3×10^{-4}	2	3.2×10^{-4}
m-Xylene	4.2×10^{-4}	2	2.1×10^{-4}
p-Xylene	2.2×10^{-4}	2	1.1×10^{-4}
1,1,1-Trichlorethane	2.6×10^{-4}	NA ^{a)}	
Tetrachloroethylene	6.5×10^{-5}	1×10^{-2}	6.5×10^{-3}
Trichloroethylene	7.2×10^{-5}	NA ^{a)}	
Total hazard index			3.6×10^{-2}

a) Not Available