

휘발성 유기 화합물의 호흡으로 인한
발암 위험도의 확률론적 분석

A Probabilistic Analysis of Cancer Risk from
the Inhalation Exposure to Volatile Organic Compounds

이 진홍 · 남 병현 · *김 윤신

충남대학교 환경공학과 · *한양대학교 의과대학

1. 서 론

유해 대기 오염 물질에 대한 이제까지의 국내 대부분의 인체 위험도 평가는 위험도에 대한 단일 평가치(point estimate)를 결정하는 방법을 사용해 왔다. 이러한 위험도 평가 방법(point-estimate analysis)은 3 가지 큰 제한점을 갖는다. 첫째, 입력 변수에 따라 평균 값, 보수적인 값 및 최악의 가정들을 결합하여 위험도를 평가함으로써 위험도 평가자나 관리자 모두 평가에 내재된 보수적인 정도(the degree of conservatism)를 알 수가 없으며 일반적으로 충분한 불확실성 분석을 결하고 있기 때문에 단일 평가치에 대하여 전망을 가지기 어려운 실정이다. 둘째, 많은 변수들 각각의 불확실성을 압도할 정도로 높은 편향(bias)을 설정함으로써 위험도 평가는 실제 거의 발생하기 어려운 시나리오에 대한 것이 된다. 마지막으로, 단일 평가치 방법은 많은 입력 변수들에 대하여 거의 최대값을 사용하여 평가하기 때문에 최종 단일 평가치의 불확실성을 결정하기 위하여 수행되는 전통적인 민감도 분석 즉, 각 입력 변수 값의 $\pm 10\%$ 또는 $\pm 25\%$ 에서 계산하는 민감도 분석의 의미가 근본적으로 없어진다.

확률론적 위험도 평가방법(probabilistic risk analysis)은 이러한 단일 평가치 방법(point-estimate analysis)의 제한점을 해결할 수 있는 방법이며 단일 평가치에 내재된 불확성을 뚜렷한 방식으로 제공하기 때문에 위험도 관리자나 공중은 평가된 위험도의 실체(reality)에 더 가까이 다가갈 수 있다. 따라서 본 연구는 대기중 휘발성 유기화합물의 호흡으로 인한 발암 위험도를 확률론적으로 평가하고자 한다.

2. 평가 방법

공단지역의 휘발성 유기화합물의 호흡으로 인한 발암 위험도는 아래 식을 이용하여 산출하였다.

$$\text{Risk} = \left(\frac{C_w \cdot IR_w \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT} \right) \cdot \text{CPS} \quad (1)$$

여기서, C_w = 대기내 오염물의 농도 (mg/l)

IR_w = 일일 호흡량(L/day)

EF = 노출빈도 (days/year)

ED = 노출기간 (years)

BW = 노출된 개인의 몸부께(kg)

AT = 평균시간 (발암물질인 경우 25,550 days)

CPS = 발암인자(mg/kg/day)¹

3. 결과

위해도 평가 모델과 표 1의 자료를 사용하여 단일 위해도 평가와 Monte-Carlo simulation을 수행한 결과가 표 2에 정리되어 있다. 단일 위해도 평가 결과, 남성과 여성의 발암 위해도가 각각 1.45×10^{-3} 과 1.29×10^{-3} 으로 이 값은 모두 Monte-Carlo simulation 결과의 75~80% 사이에 있다. 확률론적 분석을 적용하여 평가한 발암 위해도는 5th~95th percentiles가 남성의 경우 $4.60 \times 10^{-5} \sim 8.74 \times 10^{-3}$, 여성의 경우 $3.80 \times 10^{-5} \sim 7.74 \times 10^{-3}$ 으로 나타났다. 이러한 결과는 제한된 농도 데이터를 바탕으로 평가한 것이고 따라서 그 결과의 의미가 현재로서는 제한적이나 확률론적 위해도 평가 방법이 단일 평가치 방법을 이용하여 평가한 위해도에 내재된 불확성을 뚜렷한 방식으로 제공하여 위해도 관리자나 공중이 평가된 위해도의 실제(reality)에 더 가까이 다가갈 수 있는 진보적인 평가 방법임을 보여주고 있다.

Table 1. Fixed assumptions and PDFs used to risk estimates Table 2. Risk estimates

Parameter	ME	Distribution type	Distribution parameters
Benzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	17.87	LN	M=16.75 SD=33.04
1,3-Butadiene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	7.93	LN	M=13.01 SD=121.38
Carbon tetrachloride ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.24	LN	M=1.22 SD=0.62
Chloroform ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.074	LN	M=0.075 SD=0.064
Men inhalation rate(m^3/day)	15.15	LN	M=15.30 SD=2.65
Women inhalation rate(m^3/day)	11.24	LN	M=11.88 SD=4.37
Exposure frequency (days/yr)	273	TR	Min=180 Best=345 Max=365
Men body weight(kg)	65.42	LN	M=65.42 SD=7.82
Women body weight(kg)	54.66	LN	M=54.66 SD=6.48
Cancer potency factor ($\text{mg}/\text{kg}/\text{day}$)	Value from IRIS	Point value	

Type of risk estimate	Cancer risk	
	Men	Women
Mean point value risk	1.45×10^{-3}	1.29×10^{-3}
Monte-Carlo risk		
Average	3.07×10^{-4}	2.57×10^{-4}
5%	4.60×10^{-5}	3.80×10^{-5}
10%	6.75×10^{-5}	5.87×10^{-5}
25%	1.40×10^{-4}	1.23×10^{-4}
50%	3.81×10^{-4}	3.37×10^{-4}
75%	1.21×10^{-3}	1.08×10^{-3}
90%	4.12×10^{-3}	3.75×10^{-3}
95%	8.74×10^{-3}	7.74×10^{-3}