

다매체 노출을 고려한 Perchloroethylene의 인체위해성평가연구

서정관[†] · 김탁수 · 조아름 · 김필제 · 최경희

국립환경과학원

Human Risk Assessment of Perchloroethylene Considering Multi-media Exposure

Jungkwan Seo[†], Taksoo Kim, Areum Jo, Pilje Kim, and Kyunghee Choi

National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

ABSTRACT

Objectives: Perchloroethylene (PCE) is a volatile chemical widely used as a solvent in the dry-cleaning and textile processing industries. It was evaluated as Group 2 “probably carcinogenic to humans” by the Integrated Risk Information System (IRIS) of the United State Environmental Protection Agency (U.S. EPA) in 2012. In order to provide a scientific basis for establishing risk management measures for chemicals on the national priority substances list, aggregate risk assessment was conducted for PCE, included in the top-10 substances.

Methods: We conducted the investigation and monitoring of PCE exposure (e.g., exposure scenario, detection levels, and exposure factors, etc.) and assessed its multi-media (e.g., outdoor air, indoor air, and ground water) exposure risk with a deterministic and probabilistic approach.

Results: In human risk assessment (HRA), the level of human exposure was higher in the younger age group. The exposure level through inhalation at home was the highest among the exposure routes. Outdoor air or uptake of drinking water represented less than 1% of total contributions to PCE exposure. These findings suggested that the level of risk was negligible since the Hazard Index (HI) induced by HRA was below one among all age groups, with a maximum HI value of 0.17 when reasonable maximum exposure was applied.

Conclusion: In conclusion, it was suggested that despite low exposure risk, further studies are needed considering main sources, including occupational exposure.

Keywords: Monte-carlo method, Perchloroethylene, Risk assessment

I. 서 론

PCE(Perchloroethylene)는 금속표면에 부착되어 있는 유지성 오염원을 제거할 뿐만 아니라 불에 타지 않는 특성 때문에 용매로서 탁월한 장점이 있어 그동안 금속탈지, 드라이클리닝 산업 등에서 많이 사용되어 왔다.¹⁾ 그러나 지질 친화성의 유기용매로서 지하수나 토양에서는 수년 동안 잔류할 수 있으므로

인체노출 가능성이 높을 뿐 아니라 인체에 장기간 노출 될 경우에 건강에 심각한 영향을 유발 할 수 있다.²⁾ Perchloroethylene은 휘발성이 강하기 때문에 오염된 토양이나 물로부터 주로 흡입 경로를 통해 노출된다고 알려져 있다.³⁾ 인체에 perchloroethylene 가 노출될 경우 나타날 수 있는 주요 영향들로는 행동조절장애와 같은 중추신경계 이상과 간암, 신장암 유발 등 다양한 연구결과들이 보고 되고 있다.⁴⁻⁶⁾

[†]Corresponding author: National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea, Tel: 82-32-560-7179, Fax 82-32-568-2037, E-mail: jkseo2001@korea.kr

Received: 29 September 2014, Revised: 22 October 2014, Accepted: 2014

2012년 세계보건기구 국제 암 연구소(IARC)⁷⁾에서는 perchloroethylene를 인체에 암을 일으킬 가능성이 있는 물질인 그룹2A로 재 분류하였는데, 이는 perchloroethylene 물질이 인체에 암을 일으킬 증거는 아직 부족하지만, 동물실험결과에서 충분한 발암성 증거를 확인하였음을 의미한다. 이러한 perchloroethylene의 유해성으로 인하여 미국은 자국 주거빌딩에서 perchloroethylene을 사용하는 드라이클리닝 기계의 설치를 2006년에 이미 금지하였고, 2020년까지 주거빌딩에서 드라이 클리닝 기계에서의 perchloroethylene 사용을 전면적으로 금지할 예정으로 있다.⁴⁾ 뿐만 아니라 음용수로 인한 인체노출을 저감하기 위하여 미국은자국내 음용수의 perchloroethylene 최대 오염허용기준(maximum contaminant level)을 5 µg/L로 설정한 바 있다. 또한 뉴욕주의 보건부(NYSDOH; the New York State Department of Health)에서는 민감계층 및 전성에 노출을 모두 고려하여 주거지역에서의 흡입경로에 대한 건강영향기준을 100 µg/m³으로 설정하여 현재 관리 하고 있다.^{8,9)} 국내의 경우에도 perchloroethylene 물질이 「유해화학물질관리법」에 의해 취급제한물질로 지정되어 엄격히 관리되고 있다. 국내 「유해화학물질관리법」에 의하면 ‘perchloroethylene 및 이를 0.1% 이상 함유한 혼합물질’인 경우 가정용 세정제 및 에어로졸 용도로 제조, 수입, 판매, 보관, 운반 및 사용을 금지하고 있다.¹⁰⁾ 일반적으로 세탁에 사용되는 유기용제에는 perchloroethylene과 불소계용제 및 석유계용제가 있는데 유럽에서는 90% 이상이 perchloroethylene을 사용하고 있는데 반해, 국내에서는 약 95% 이상의 세탁소가 석유계용제를 사용하고 있다.¹¹⁾

그 동안 국내에서 수행된 위해성평가의 경우 대부분 단일 자연환경매체 혹은 작업장, 주택실내 등 국소생활환경공간에 국한되어 수행된 경우가 많았고 이러한 경우 유해화학물질의 다매체 거동 특성을 고려하지 않아 다양한 매체들로 인한 인체 건강영향을 통합적으로 평가할 수 없다는 단점이 있다.¹²⁾

따라서 본 연구에서는 perchloroethylene에 대한 인체위해성평가를 수행함에 있어서 노출시나리오를 바탕으로 공기·물 등 다매체 노출평가를 수행하였으며, 매체별 노출기여도 산출 등 perchloroethylene의 인체 위해 관리대책 수립을 위한 보다 정밀한 기초 자료를 확보하고자 하였다.

II. 연구내용 및 방법

1. 인체위해성평가

위해성평가는 크게 자료수집, 유해성확인, 노출량-반응평가, 노출평가 및 위해도 결정의 5단계로 수행하였다. 자료결손분석결과 국내 측정 자료가 없고, 사무실 등 실내 국소환경에 대해서는 직접 모니터링을 수행하여 자료결손부분을 보완하였다.

1) 자료수집

노출수준자료는 대표성과 정확한 노출수준을 확보하기 위해서 유해대기측정망 등의 국가측정망자료 및 환경부 국립환경과학원 등에서 대규모로 수행된 노출실태조사 자료를 우선적으로 확보하였다. 수집된 모든 자료에 대해서 결손분석과 신뢰도 평가를 통하여 국내 실정에 부합하고 노출평가에 적합한 노출시나리오, 노출수준 및 노출계수 자료만을 스크리닝 하여 노출평가에 활용하였다. 유해성확인에 필요한 독성자료는 주로 미국 환경보호청의 통합 위해정보시스템(IRIS; Integrated risk information system)¹³⁾ 자료와 유럽연합의 화학물질 데이터베이스(ESIS; European chemical substances information system)¹⁴⁾ 및 국가기관에서 발간된 공인보고서를 검토하여 사용하였다. perchloroethylene의 노출량-반응평가는 U.S. EPA IRIS의 게재정보를 이용하였다.

2) 노출시나리오 및 노출계수

노출시나리오는 환경 중 배출특성과 생활환경 중 노출특성 등을 검토하여 연령별로 영유아에서 성인까지 5개 그룹으로 나누어 수립하였다. 노출계수도 연령별로 5개 그룹으로 나누어 우선적으로 한국노출계수핸드북¹⁵⁾ 자료를 사용하였다. 그러나 국내자료가 없을 경우에는 미국 노출계수핸드북¹⁶⁾의 자료를 활용하였다.

Perchloroethylene은 대부분 공기호흡을 통해 노출된다고 알려져 있지만 음용수 섭취 또한 노출시나리오에 추가하였다. 샤워에 의한 경피 노출과 음식물 섭취 경로는 국내자료의 제한성과 극히 미량만이 인체에 노출되므로 본 연구의 노출시나리오에서는 제외하였다. 따라서 흡입경로는 주요 이용공간을 중심으로 세밀하게 시나리오를 작성하였다. 음용수 섭취 경로는 상수도 등 먹는 물과 음용이 가능한 지하수

섭취가 노출 시나리오에 포함되었다.

3) 위해도 결정

위해도 결정에 사용되는 일일 평균 노출량 산출 알고리즘은 미국환경청¹⁷⁾에서 제시된 흡입과 경구(섭취)경로의 알고리즘을 사용하였다. 노출량 계산은 결정론적 방법의 경우 조사된 노출계수를 활용하여 중심경향적 노출값(CTE, Central Tendency Exposure)과 합리적 최대노출값(RME, Reasonable Maximum Exposure)을 각각 적용하여 인체 노출량을 산정하였다. CTE와 RME값에 사용된 노출농도는 산술평균값과 95백분위수(95th percentile)를 각각 적용하였다. 인체 위해도는 비발암과 발암위해도를 구분하여 제시하였다. 비발암위해도의 경우 시나리오에 따라 산출된 노출량(CTE와 RME)을 비발암 독성참고치로 나누어 유해지수를 산출하였다. 발암위해도의 경우 매체별로 결정된 단위 위해도를 바탕으로 초과발암위해도를 산출하여 제시하였다.

확률론적 방법은 Crystal ball[®](Oracle, Redwood Shores, CA, USA)의 몬테카를로 시뮬레이션기법을 사용하여 위해분포를 파악하고 평균(mean), 중간값(median)과 95백분위수 등에 대한 노출량을 산정하였다.

$$\text{Inhalation ADD} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{day}} \right) = \frac{CA \times IR_{inh} \times ET \times EF \times ED \times ABS_{air-inh}}{BW \times AT \times 1000 \times 60 \times 24} \quad (1)$$

- ADD: average daily doses (mg/kg/day)
- CA: chemical concentration in air (µg/m³)
- IR_{inh}: inhalation rate (m³/day)
- ET: exposure time (min/day)
- EF: exposure frequency (days/year)
- ED: exposure duration (years)
- ABS_{air-inh}: Absorption rate (0.6*):
- *WHO, air quality guidelines, 2000
- BW: Body weight (kg)
- AT: Average time (9,125 days)

$$\text{Oral ADD} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{day}} \right) = \frac{CW \times IR_w \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (2)$$

- ADD: average daily doses (mg/kg/day)

- CW: chemical concentration in water (mg/L)
- IR_w: ingestion rate of water (L/day)
- EF: exposure frequency (days/year)
- ED: exposure duration (years)
- BW: Body weight (kg)
- AT: Average time (9,125 days)

2. 추가노출모니터링

조사대상은 어린이집, 초등학교, 중고등학교 및 사무실 등 4개 국소공간에 대하여 총 52개 시료(13개 지점×4개 국소 공간)를 직접 채취한 후 분석하였다. 시료채취는 각 측정지점별로 personal air sampler (MP-Σ30N:SIBATA, GilAir5:Gilian)를 사용하여 0.1 L/min의 유속으로 30분 간격 2회 연속 채취하였다. 시료채취는 인접지역에 직접적인 오염물질 발생원이 없고, 시료채취지점의 중앙점에서 바닥 면으로부터 1.2~1.5 m 높이에서 수행하였으며, 이것이 불가능한 경우에는 시료채취지점의 모든 벽으로부터 1 m 이상 떨어지고, 바닥 면에서 1.21.5 m 높이에서 시료를 채취하였다. 채취가 완료된 시료는 고체 흡착관의 마개를 닫고 알루미늄 호일로 밀봉하여, 분석 전까지 4 냉장보관 하였다.

III. 결 과

1. 유해성 확인

Perchloroethylene은 흡입, 경구 및 경피 노출을 통해 쉽게 체내로 흡수된다.¹⁸⁾ 인체 실험에서 흡입과 경피를 통해 동시에 노출시켰을 때, 흡입을 통해서 99% 이상이 체내에 흡수되었다.¹⁹⁾ 체내로 흡수된 perchloroethylene은 높은 지방 친화성을 갖고 있어서 주로 지방 조직에 분포하며, 반감기는 55시간으로 추정된다. 그 밖에도 인간과 동물의 모유, 태반 및 태아에도 분포된다.¹⁸⁾ 체내에 흡수된 perchloroethylene은 대부분 폐를 통해 변화되지 않고 호기 상태에서 배출되며,²⁰⁾ 그 중 1~3% 미만의 perchloroethylene은 간에서 Cytochrome P-450을 통해 산화적 대사산물인 트리클로로초산(TCA; Trichloroacetic acid)으로 대사된다.¹⁸⁾

Perchloroethylene은 미국환경보호청(USEPA IRIS)¹³⁾에서 ‘Likely to be carcinogenic to humans’로 분류한 물질이다. 또한 국제 암 연구센터(IARC)⁷⁾는 ‘2A’

등급으로 분류한 ‘인간 발암성 우려 물질’, 미국 산업 위생사 협회(ACGIH; American Conference of Governmental Industrial Hygienists)²¹⁾는 ‘A3’등급으로 분류한 ‘인간 발암성과 관련성은 알려지지 않았으나 동물 발암이 확인된 물질’로 분류되어 있다. 동물 시험자료에 따르면 perchloroethylene은 발암성 물질로 경구 투여 시 마우스에서 간세포암,²²⁻²⁴⁾ 흡입 투여 시 마우스에 간세포 선종 및 상피성 암,²³⁾ 랫드(rat)에서는 단핵세포 백혈병, 신장 종양, 세뇨관 세포선종 및 선암증이 관찰되었다.^{23,24)} 또한 인체에 perchloroethylene 저농도(370 mg/m³) 급성 노출 시 현기증, 기분변화, 두통 및 메스꺼움의 증상이 유발되며, 고농도(14800 mg/m³ 이상)로 노출될 경우 의식불명, 혼수상태, 발작 및 사망에까지 이르게 될 수 있다.¹⁸⁾ 성인을 대상으로 perchloroethylene 증기를 740 mg/m³과 1480 mg/m³에 흡입 노출 후 림페르크 검사를 실시한 결과에 따르면 1480 mg/m³ 이상에서 30분 이상 노출 후 호흡기 자극과 약간의 두통이 관찰되었다.²⁵⁾ 코호트 연구에 따르면 perchloroethylene 과 식도암 발병이 유의성을 나타내는 것으로 보고되었고, 국제 암 연구센터의 역학조사 결과에 따르면, perchloroethylene은 자궁암 및 비호지킨림프종 발병 위해성간에 상관성이 있다고 보고되었다.²⁶⁻³⁰⁾ IRIS에

게재된 perchloroethylene의 만성 경구 독성참고치 (RfD)를 0.006 mg/kg-day이었으며 만성 흡입 독성참고치(RfC)값은 0.04 mg/m³이었다. 또한 먹는 물과 흡입 단위위해도는 각각 6.1×10⁻⁸ per µg/L와 2.6×10⁻⁷ per µg/m³이었다(Table 1).

2. 매체별 농도수준

실외대기의 경우 최근 3년간 환경부 유해대기측정망(‘08-10’)³¹⁾에서 측정된 전국 592개 지점 자료를 활용하였으며, 세부적으로 도로변, 주거단지 및 산업 단지로 구분하였다. 전국의 경우 perchloroethylene 평균농도는 0.027 µg/m³이었으며, 95백분위수 값은 0.126 µg/m³을 나타내었다. 실외공간 중 도로변에서의 perchloroethylene 검출수준은 평균 0.051 µg/m³이었다. 산업단지에서 측정된 perchloroethylene의 평균농도는 0.032 µg/m³, 불검출 값을 제외한 평균농도는 0.062 µg/m³로 검출되었고, 실외배경농도는 0.004 µg/m³이었다. 실내 아파트 중 perchloroethylene 농도는 0.34 µg/m³으로 검출농도는 실내 아파트>산단지역>도로변>주거지역 순으로 높게 나타났다. 지하수의 오염우려지역 내의 perchloroethylene 농도는 0.007 µg/m³이었고, 일반지역은 0.001 µg/m³이었다. 수돗물에서 perchloroethylene은 검출되지 않았다

Table 1. Effect of perchloroethylene for oral and inhalation exposure

Subject	Effect	Exposure route/Duration	Toxicity value (mg/m ³)	Reference
Human	Dizziness, emotion dysregulation, headache, and disgust	Acute inhalation/-	740 ^a	NICNAS, 2001
	Awareness of ambiguity, coma, seizure, and death	Acute inhalation/-	14800 ^a	NICNAS, 2001
	Uterine cancer and non-hodgkin's lymphomacorrelated with exposure to perchloroethylene	-	-	IARC, 1995
	Increase in serum immunoglobulin E in nonsmoking and smoking perchloroethylene exposed dry-cleaning workers.	Cohort study	-	Emara et al., 2010
	Respiratory stimulus, slight light-headedness	Inhalation/83 or 187 min	1554 ^a	Stewart et al., 1970
Rat	Mononuclear cell leukemia, significant increases in both sex of F344N/N	Chronic inhalation/ 6 hours/day, 5 day/week, for 103 weeks	-	NTP, 1986
Mouse	Hepatocellular tumors, significant increases in both sexes of B6C3F1	Chronic inhalation/ 6 hours/day, 5 day/week, for 103 weeks	-	NTP, 1986

^aindicate effect concentrations in the study.

Table 2. Exposure level of perchloroethylene in outdoor, indoor air and drinking water (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Pollutant sources	Sampling site	N	Median	Mean (S.D)	95 th percentile	Max	Min	Reference
Outdoor	Nationwide	592(325)	0.002	0.027(0.088)	0.126	1.216	0.000	
	Road-side	94(64)	0.010	0.036(0.065)	0.178	0.318	0.000	
	Residential	300(156)	0.001	0.020(0.003)	0.108	0.532	0.000	ME, 2008-2010
	Industrial	198(103)	0.001	0.032(0.125)	0.133	1.216	0.000	NIER, 2009
	Background	78	0.000	0.004(0.015)	0.013	0.093	0.000	ME, 2008-2010
Indoor	Apartment	400	0.070	0.340(0.130)	-	11.070	0.070	Water service management agency, 2009-2011
Ground water	Area of concern	1015(26)	0.000	0.000(0.002)	0.000	0.040	0.000	
	General area	1613(9)	0.000	0.000(0.000)	0.000	0.007	0.000	
	Tap water	1404	ND	ND	ND	ND	ND	

(Table 2). 그 외 사무실 등 다중이용시설의 경우 국내 측정 자료가 없어 직접 추가모니터링을 수행하여 측정된 값을 사용하였다. 조사대상은 연령별 어린이 집, 초등학교, 중고등학교 및 사무실 등 4개 국소공간에 대하여 총 52개 시료(13개 지점×4개 국소공간)를 분석하였으나, 조사된 전 지점에 대해서 perchloroethylene은 검출되지 않았다. 지하수의 경우 최근 3년간 지하수 측정망 2,628개 가운데 35개 지점에서만 perchloroethylene가 검출되었고,³²⁾ 수도물은 1,404개 모두에서 불검출로 나타났다.³³⁾

3. 노출시나리오 및 노출계수

1) 노출시나리오

Perchloroethylene이 인체에 노출되는 주요 경로는 대부분 공기호흡을 통한 경로이며, 흡입경로를 제외

한 다른 노출경로로서 음용수 섭취를 노출시나리오에 추가하였다. 샤워에 의한 경피 노출과 음식물 섭취 경로는 국내자료의 제한성과 극히 미량만이 인체에 노출되므로 본 노출시나리오에서 제외하였다. 따라서 흡입경로는 주요 이용공간을 중심으로 세밀하게 시나리오를 작성하였다. 실내의 경우 모든 연령대에 공통으로 해당하는 집안과 연령대별로 이용률이 다른 학교와 사무실 등 주요 다중이용시설을 선정하였다. 음용수 섭취 경로는 상수도 등 먹는 물과 음용이 가능한 지하수 섭취를 노출 시나리오에 포함하였다(Table 3).

2) 노출계수

노출계수는 한국노출계수핸드북¹⁶⁾에서 제시하고 있는 값을 주로 적용하였다. 예를 들어 20세 이상 성

Table 3. Exposure scenarios by age-groups

Exposure route	Media	Pollutant sources	Location	Infants (0-2 yr)	Young children (3-7 yr)	Children (8-13 yr)	Adolescent (14-19 yr)	Adults (<20 yr)
Inhalation	Air	Outdoor	Road-side		○	○	○	○
			Residential	○	○	○	○	
			Industrial					○
		Indoor	Home	○	○	○	○	○
			Office					○
			School			○	○	
			Child care Facility				○	
Oral	Water	Drinking water		○	○	○	○	○
		Ground water		○	○	○	○	○

Table 4. Exposure parameter according to age-groups

Parameters	Pollutant sources	Location	Infants (0-2 yr)	Young children (3-7 yr)	Children (8-13 yr)	Adolescent (14-19 yr)	Adults (<20 yr)
Body weight (kg)			9.12	18.99	37.83	58	62.8
Ingestion rate (L/day)			0.5	0.6	0.8	1.3	1.5
Inhalation rate (m ³ /day)			6.7	10.1	12	16.3	1
Exposure time (min/day)	Outdoor	Overall	14	43	18	12	12
		Street	-	-	25	20	31
	Indoor	Home	1426	876	911	783	901
		Child care facility-		564	-	-	-
		School	-	-	215	346	-
		Office	-	-	-	-	213

인호흡률의 경우 집안에서는 남녀 평균값인 14.25 m³/day를 적용하였으며, 사무실은 활동양상별 평균 호흡률 표에서 제시하고 있는 중분류 “일”에 해당하는 남녀 평균 호흡률 16.0 m³/day을 대표값으로 하였다. 음용수 섭취량의 경우 2세미만 영유아는 하루 0.5 L, 성인은 1.5 L 등 연령대별로 음용수 섭취량을 달리 적용하였다. 그러나 영유아, 어린이 및 청소년

호흡률의 경우 국내 노출계수자료가 없어, 미국 환경청의 최신 노출계수자료를 이용하였다¹⁷⁾(Table 4). 연령별 주요활동공간별 생활시간양상은 2010년 통계청 자료³⁶⁾를 활용하였으며, 어린이와 청소년이 학교에서 생활하는 시간은 일 평균 각각 215분과 346분인 것으로 나타났다. 노출알고리즘은 흡입 및 경구(섭취)경로에 대한 노출모형을 활용하였다.

Table 5. Results of exposure assessment of perchloroethylene by deterministic approach (unit: mg/kg/day)

Exposure route	Media	Pollutant sources	Location		Infants (0-2 yr)	Young children (3-7 yr)	Children (8-13 yr)	Adolescent (14-19 yr)	Adults (<20 yr)		
Inhalation	Air	Outdoor	Overall	CTE	0	0	1.1895E-07	8.4310E-08	5.9331E-08		
				RME	0	0	5.8816E-07	4.1687E-07	2.9346E-07		
			Road-side	CTE	8.5709E-08	1.9058E-07	4.7581E-08	2.8103E-08	1.4900E-07		
				RME	4.6283E-07	1.0291E-06	2.5694E-07	1.5176E-07	6.1823E-07		
			Indoor	Home	CTE	1.4841E-04	6.6004E-05	4.0938E-05	3.1174E-05	2.8963E-05	
					RME	4.8321E-03	2.1490E-03	1.3329E-03	1.0149E-03	9.4301E-04	
			Child care facility	CTE	0	3.3746E-07	0	0	0		
				RME	4.8321E-03	2.1490E-03	1.3329E-03	1.0150E-03	9.4301E-04		
			School	CTE	0	-	7.6725E-08	1.0939E-07	-		
				RME	-	3.3746E-07	7.6725E-08	-	-		
			Office	CTE	0	0	0	0	6.1051E-08		
				RME	0	0	0	0	1.0934E-07		
			Ingestion	Water	Drinking water	CTE	2.1930E-05	1.2638E-05	8.4589E-06	8.9655E-06	9.5541E-06
						RME	2.1930E-05	1.2638E-05	8.4589E-06	8.9655E-06	9.5541E-06
Total exposure			CTE	1.7043E-04	7.9170E-05	4.9641E-05	4.0249E-05	3.8579E-05			
			RME	4.8540E-03	2.1620E-03	1.3414E-03	1.0241E-03	9.5263E-04			

Table 6. Risk characterization of perchloroethylene exposure by age groups

Media		Infants (0-2 yr)	Young children (3-7 yr)	Children (8-13 yr)	Adolescent (14-19 yr)	Adults (<20 yr)	
Non cancer risk	CTE	0.00878	0.00527	0.00458	0.00434	0.00423	
	RME	0.17028	0.10446	0.10395	0.09378	0.08733	
Cancer risk	Air	CTE	4.0E-11	2.0E-11	1.0E-11	8.0E-12	8.0E-12
		RME	1.0E-9	6.0E-10	3.0E-10	3.0E-10	2.0E-10
	Water	CTE	2.0E-8	2.0E-8	2.0E-8	2.0E-8	2.0E-8
		RME	2.0E-8	2.0E-8	2.0E-8	2.0E-8	2.0E-8

4. 노출량 평가

결정론적 방법에 의해 도출된 연령별로 구분된 집단노출 평가결과 2세미만의 영유아 집단에서 RME 값 적용 시 총 노출량이 0.00485 mg/kg-day로 가장 많은 노출량을 보였으며, 성인이 0.00095 mg/kg-day로 연령별 집단 중에서 가장 적은 노출량을 보였다. 그 외 미취학아동은 0.00216 mg/kg-day, 취학아동은 0.00134 mg/kg-day, 청소년은 0.00102 mg/kg-day의 노출량 분포를 나타내었다. 연령별로 CTE값 적용시 영유아(0.00017 mg/kg-day), 미취학아동(0.00008 mg/kg-day), 취학아동(0.00005 mg/kg-day), 청소년(0.00004 mg/kg-day), 성인(0.00004 mg/kg-day) 순서의 노출량 분포를 나타내었다.

활동공간별로 perchloroethylene이 인체에 가장 많이 노출 되는 곳은 집안 실내 공간 이었으며 흡입 노출 시 영유아 집단에서 RME값 적용 시 0.00483 mg/kg-day, 미취학아동은 0.00214 mg/kg-day였다. 취학아동의 RME 노출량은 0.00133 mg/kg-day, 청소년은 0.00101 mg/kg-day, 성인은 0.00094 mg/kg-day로 영유아나 미취학아동에 비해 상대적으로 노출량이 작았다. 또한 CTE값을 영유아를 대상으로 하였을 때 0.00014 mg/kg-day였고, 미취학아동은 0.00006 mg/kg-day였다. 또한 취학아동의 CTE는 0.00004 mg/kg-day, 청소년은 0.00003 mg/kg-day이었고, 성인에게 노출시 노출량은 0.00002 mg/kg-day였다(Table 5). 연령 집단별로 집안 실내 노출은 총 노출량의 99%(CTE 적용시 75.1%~87.1%) 이상을 차지하였다. 도로변과 운동장, 놀이터 등 실외에서 공기 호흡을 통한 perchloroethylene 노출기여도는 모든 연령층에서 0.1%(CTE 적용시 0.1~0.4%)의 범위로 노출기여도가 매우 작게 나타났다.

5. 위해도 결정

Perchloroethylene에 대한 인체위해도를 결정하기 위해 CTE와 RME 값 각각에 대해 얻어진 노출량을 가지고 비발암위해도(유해지수)를 산정한 결과 모든 연령층에서 유해지수가 1이하로서 위해우려가 없는 것으로 나타났다. CTE값이 적용된 경우에는 영유아 연령층을 포함한 5개 연령층의 유해지수 값이 0.004~0.009 범위였으며 영유아 연령층이 0.009로 가장 높았고 성인 연령층이 0.004로 가장 낮았다. RME 값이 적용된 경우에는 유해지수가 연령층별로 0.087~0.170의 범위를 나타내었고 영유아 연령층이 0.170를 나타내어 가장 높은 값을 보여주었다.

CTE와 RME 값 각각에 대해 얻어진 노출량을 가지고 초과발암위해도를 산정한 결과 perchloroethylene에 대해 도출된 발암위해도는 모든 연령층에서 8×10^{-12} - 2×10^{-8} 범위를 보여주어 위해 우려가 없는 것으로 나타났다(Table 6).

IV. 고 찰

본 연구 주요결과 중 활동공간별 인체 노출량을 산정한 결과, 집안 실내에서 호흡을 통한 인체 노출량이 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 그 이유는 다른 공간에 비해 집안 실내의 평균 perchloroethylene 농도가 상대적으로 높았으며(Table 2), 시간 활동 양상에서도 도로변, 사무실 등 다른 실내·외 공간 들에 비해서도 집안에 체류하는 시간이 평균적으로 길었기 때문이다. 실외공간에 비하여 실내공간에서 perchloroethylene가 더 높게 나타나는 경향은 다른 조사에서도 동일하게 나타나고 있다. 국외조사 사례를 살펴보면, 이탈리아(밀라노), 체코(프라하), 영

국(옥스퍼드)의 집안 실내공간에서 각각 측정된 perchloroethylene의 농도(median)는 각각 $7.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $8.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으나 실외공기중의 perchloroethylene 농도는 $4.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $5.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 일반적으로 실외보다 실내거주공간에서의 perchloroethylene의 농도가 더 높게 검출되었다.^{35,36}

Perchloroethylene의 인체 노출량을 연령별로 평가한 결과는 연령이 낮을수록 인체에 노출되는 perchloroethylene 노출량도 증가되는 것으로 나타났다. 이것은 연령별로 평균체중과 밀접한 관련이 있는 것으로 여겨진다. 연령이 어릴수록 성인에 비해 하루 중 실외 활동보다는 실내에 머무르는 시간이 상대적으로 길며, 평균체중도 성인에 비해 적기 때문이다.³⁷ 일반적으로 독성물질에 노출되었을 때 연령에 따른 감수성의 차이는 어린이 특히 영유아가 생물학적으로 가장 민감하다. 그 이유는 영유아는 어른에 비해 체중 당 식품, 음료 섭취량이 많고 체표면적이 커서 유해물질에 보다 많이 노출될 수 있으며 해독능력이나 유해물질 배설능력은 어른보다 떨어지는 경향이 있기 때문이다.³⁸

본 연구에서 perchloroethylene에 대해 수행된 물, 공기, 토양 주요 매체를 모두 고려한 위해성평가결과 일반국민들에 대한 인체 위해 우려 가능성은 낮다고 볼 수 있다. 그러므로 유독물 지정 및 취급제한물질 지정관리제도 등 현행 위해 저감관리제도 이외 추가적인 위해 저감을 위한 규제대책은 필요치 않은 것으로 판단된다. 왜냐하면 취급제한물질 지정 등으로 인해 2010년도 환경 중 국내 총 배출량이 2002년에 비해 1/5 이하로 급감하는 등 지속적으로 감소하고 있고, 환경 중 농도도 점차 낮아지고 있기 때문이다. 그러나 perchloroethylene은 발암 잠재력이 있는 물질이고 국내에서 지속적으로 사용되는 물질이므로, 본 연구에서 상대적으로 노출량이 높게 나타난 집안 실내공간에서의 모니터링 등 발암물질에 대한 지속적인 추적조사는 필요할 것으로 사료된다. 또한 본 연구범위에서 제외된 군 기지 내 토양 및 지하수는 별도 조사 및 연구가 필요할 것으로 여겨진다.

V. 결 론

국가우선관리대상물질 위해관리방안 수립에 있어서 과학적 근거제공을 위한 목적으로 상위 10개 물

질에 속하는 perchloroethylene에 대하여 매체통합위해성평가를 수행하였다. 조사연구를 통해 얻어진 결론은 perchloroethylene의 인체노출량은 연령이 낮을수록 노출량이 증가하는 경향을 보여주었으며, 활동공간별로는 집안 실내공간에서 호흡을 통해 가장 많은 양이 인체에 노출되는 것으로 나타났다. 집밖 실외에서의 호흡 및 음용수 섭취를 통한 노출기여도는 1% 미만으로 낮게 나타났다. 또한, 인체위해도는 모든 연령층에서 유해지수 1 이하로서 위해 우려가 없었으며, RME 값을 적용할 경우에도 최대 0.17의 값을 나타내었다. 본 연구결과는 향후 perchloroethylene의 위해성을 관리하고 위해 관리방안에 대해 정책적으로 활용하는데 기초자료로 활용 될 수 있을 것이다.

References

1. Rastkari N, Yunesian M, Ahmadkhaniha, R. Exposure assessment to trichloroethylene and perchloroethylene for workers in the dry cleaning industry. *Bull Environ Contam Toxicol*. 2011; 86: 363-367.
2. Labreche FP and Goldberg MS. Exposure to organic solvents and breast cancer in women: a hypothesis. *Am J Ind Med*. 1997; 32:1-14.
3. Guyton KZ, Hogan KA, Scott CS, Cooper GS, Bale AS, Kopylev L, et al. Human health effects of tetrachloroethylene: Key findings and scientific issues. *Environ Health Perspect*. 2014; 122(4): 325-334.
4. Raaschou-Nielsen O, Hansen J, Christensen JM, Blot WJ, McLaughlin JK, Olsen JH. Urinary concentrations of trichloroacetic acid in Danish workers exposed to trichloroethylene. 1947-1985. *Am J Ind Med*. 2001; 39: 320-327.
5. Mundt KA, Birk T, Burch MT. Critical review of the epidemiological literature on occupational exposure to perchloroethylene and cancer. *Int Arch Occup Environ Health*. 2003; 76: 473-491.
6. Aschengrau A, Weinberg JM, Janulewicz PA, Romano ME, Gallagher LG, Winter MR, et al. Affinity for risky behaviors following prenatal and early childhood exposure to tetrachloroethylene (pce)-contaminated drinking water: A retrospective cohort study. *Environ Health*. 2011; 10: 1-13.
7. International Agency for Research on Cancer, tetrachloroethylene. 1995; Available: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Publications/techrep42/TR42-15.pdf> [accessed 22 November 2012].
8. New York State Department of Health. Tetrachloroethylene ambient air criteria document. New York

- State Department of Health. Available: http://www.health.state.ny.us/nysdoh/enviro/btsa/fs_perc.htm [assessed 13 November 2012].
9. New York State Department of Health. Fact Sheet: Tetrachloroethylene (Perc) indoor and outdoor air. New York State Department of Health. Available: http://www.health.state.ny.us/nysdoh/enviro/btsa/fs_perc.pdf [assessed 13 November 2012].
 10. Ministry of Environment. Regulation of hazardous chemicals law. Sejong: Ministry of Environment Press; 2013.
 11. National Institute of Environment Research. A study on the contribution of petroleum solvent to air pollution. Available: http://www.webbook.me.go.kr/DL-File/F000/086/8635_62206.pdf [assessed 27 August 2012].
 12. Kim YH, Yang WH and Son BS. Estimation of total exposure to benzene, toluene and xylene by micro-environmental measurements for iron mill workers. *J Environ Health Sci.* 2007; 33(5): 359-364.
 13. US Environmental Protection Agency. Integrated risk information system. Available: <http://www.epa.gov/IRIS> [accessed 27 November 2012].
 14. European chemical substances information system. Available: <http://www.esis.jrc.ec.europa.eu> [accessed 25 September 2012].
 15. Jang JY, Jo SN, Kim SY, Kim SJ, Jung HK. Korean exposure factors handbook. Ministry of Environment Press; 2007.
 16. US Environmental Protection Agency. Exposure factors handbook. 2011. Available: <http://www.epa.gov/ncea/efh/pdfs/efh-complete.pdf> [accessed 25 September 2012].
 17. US Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund volume: Human health evaluation manual (Part A) Available: http://www.epa.gov/oswer/riskassessment/ragsa/pdf/rags_a.pdf [assessed 17 October 2012].
 18. National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme. Tetrachloroethylene: Priority Existing Chemical Assessment Report No. 15. Available: http://www.nicnas.gov.au/_data/assets/pdf_file/0020/4376/PEC_15_Tetrachloroethylene_Full_Report_PDF.pdf [assessed 12 November 2012].
 19. Riihimäki V and Pfüffli P. Percutaneous absorption of solvent vapours in man. *Scand J Work Environ Health.* 1978; 4:73-85.
 20. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological Profile for Tetrachloroethylene, U.S Department of Health and Human Services Public Health Service. Available: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp18.pdf> [accessed 26 November 2012].
 21. American Conference of Industrial Hygienists. Available: <http://www.acgih.org> [accessed 25 September 2012].
 22. National Cancer Institute. Bioassay of tetrachloroethylene for possible carcinogenicity. CAS No. 127-18-4. NCI-CGTR-13; DHEW Publication No. (NIH) 77-813. Bethesda, Md. Available: http://ntp.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/LT_rpts/tr013.pdf [accessed 30 July 2014].
 23. National Toxicology Program. Toxicology and carcinogenesis studies of tetrachloroethylene (perchloroethylene) CAS No. 127-18-4 in F344/N rats and B6C3F₁ mice (Inhalation studies). TR 311. Research triangle park, NC: Available: http://www.ntp.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/lt_rptss/tr300.pdf [accessed 30 July 2014].
 24. Japan Industrial Safety and Health Association. Carcinogenicity study of tetrachloroethylene by inhalation in rats and mice. Available: <http://www.epa.gov/iris/supdocs/0106index.html> [accessed 31 July 2014].
 25. Stewart RD, Baretta ED, Dodd HC, Torkelson TR. Experimental human exposure to tetrachloroethylene. *Arch Environ Health.* 1970; 20: 224-229.
 26. Anttila A, Pukkala E, Sallmen M, Hernberg S, Hemminki K. Cancer incidence among Finnish workers exposed to halogenated hydrocarbons. *J Occup Environ Med.* 1995; 37: 797-806.
 27. Boice JD, Marano D, Fryzek J, Sadler C, MaLaughlin JK. Mortality among aircraft manufacturing workers. *Occup Environ Med.* 1999; 56: 581-597.
 28. Calvert GM, Ruder AM, Petersen MR. Mortality and endstage renal disease incidence among dry cleaning workers. *Occup Environ Med.* 2011; 68: 709-716.
 29. Radican L, Blair A, Stewart P, Wartenberg D. Mortality of aircraft maintenance workers exposed to trichloroethylene and other hydrocarbons and chemicals: extended follow-up. *J Occup Environ Med.* 2008; 50: 1306-1319.
 30. Selden AI and Ahlborg G. Cancer morbidity in Swedish dry cleaners and laundry workers: historically prospective cohort study. *Int Arch Occup Environ Health.* 2011; 84: 435-443.
 31. Operation results of hazardous air quality monitoring system. Ministry of Environment press; 2008-2010^a.
 32. Operation results of water quality monitoring system in groundwater. Ministry of Environment press; 2008-2010^b.
 33. Tap water quality reports by 6 metropolitan cities. Water service management agency press; 2009-2011.
 34. Statistics Korea. Time use survey. Available: <http://www.kseh.org/>

- www.kostat.go.kr/survey/lifestyle [assessed 15 October].
35. World Health Organization. WHO guidelines for indoor air quality: Selected pollutants. Tetrachloroethylene. Available: http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf [assessed 19 August 2014].
 36. Jantunen MJ, Katsouyanni K, Kunzli N, Lebret E, Maroni M, Saarela K, et al. Air pollution exposure in European cities: the EXPOLIS study. Kuopio: National Public Health Institute; 1999. Available: http://www.thl.fi/expolis/files/final_report.pdf [assessed 16 October].
 37. Seo JK, Kim TS, Kim PJ. Aggregate risk assessment on xylene and ethylbenzene. *J Environ Sci Inter.* 2013; 22(2): 163-171.
 38. Scheuplein R, Charnley G, Dourson M. Differential sensitivity of children and adults to chemical toxicity: I. Biological basis. *Regul Toxicol Pharmacol.* 2002; 35(3): 429-447.
 39. International Agency for Research on Cancer, tetrachloroethylene. 1995; Available: <http://www.inchem.org/documents/iarc/vol63/tetrachloroethylene.html> [accessed 27 November 2012].
 40. Emara AM, EI-Noor MMA, Hassan NA, Wagih AA. Immunotoxicity and hematotoxicity induced by tetrachloroethylene in egyptiandry cleaning workers. *Inhal Toxicol.* 2010; 22(2): 117-124.
 41. Kwon MH, Jang SK, Ryu JM, Seo SY, Won SR, Jung SJ et al. A study on management of major indoor air pollutants by house type in Korea(I): Indoor air pollution and health effects in residential apartment. National Institute of Environmental Research Press; 2009.