



생활 공기오염물질 노출 시나리오를 통한 재실자 인체 위해성 평가

Health risk assessment of occupants through exposure scenarios of daily indoor air pollutants

김힘찬* · 나후승** · 김형근*** · 김래연****

Kim, Himchan * · Na, Hooseung ** · Kim, Hyungkeun *** · Kim, Taeyeon ****

* Researcher, Window Research & Development Preoject, Division of Window product, LG Hausys, South Korea (dionysos@lghausys.com)

** Dept. of Architectural Engineering, Yonsei Univ., South Korea (hool3000@hanmail.net)

*** Coauthor, Dept. of Architectural Engineering, Yonsei Univ., South Korea (vickim@yonsei.ac.kr)

**** Corresponding author, Dept. of Architectural Engineering, Yonsei Univ., South Korea (tkim@yonsei.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: Recently, indoor air quality (IAQ) is becoming more important to building occupants. World Health Organization (WHO) reported approximately 2.8 million people died in a year by exposure of indoor air pollutant. Besides, The United States Environmental Protection Agency (USEPA) reported that indoor air pollution is more hazardous than global warming and ozone depletion. Generally, it is regarded that pollutant on initial construction phase can easily effect on health of occupant. However, many researchers report that pollutant of long-term period can be more critical to occupants recently. Especially, the chemicals from pollution sources like spray and dry cleaned clothes are more critical to the indoor pollutant. **Method:** This study suggest pollutant exposure scenarios based on occupant behavior and ventilation pattern. This scenarios include long-term indoor pollutant concentration and health risk of occupants. This scenarios limited the pollutant sources as toluene and benzene from spray and tetrachloroethylene from dry cleaned clothes. **Results:** By using these scenarios, we assessed long-term indoor pollutant concentration and health risk of occupants.

KEYWORD

인체 위해성평가
실내공기질
노출 시나리오
톨루엔
벤젠
사염화에틸렌

Health Risk Assessment
Indoor Air Quality
Exposure Scenarios
Toluene
Benzene
Tetrachloroethylene

ACCEPTANCE INFO

Received Nov 17, 2017

Final revision received Dec 12, 2017

Accepted Dec 17, 2017

© 2017 KIEAE Journal

1. 서론

실내 공기질에 대한 관심과 사회적 인식수준이 점점 증가하고 있다[1]. 특히, 지난 2012년 143명의 사망과 약 350만 명 이상의 피해를 입힌 가습기 살균제 사건은 사회적으로 큰 파장을 불러일으키며, 실내 공기질 뿐 아니라 생활 제품의 인체 위해성에 대한 관심 또한 크게 증폭 되었다[2].

실내 공기질에 영향을 미치는 오염원은 시기에 따라 준공 초기단계와 거주단계로 구분할 수 있다. 현재까지 대부분의 연구는 고농도로 방출되어 즉각적인 인체반응을 야기 시키는 준공 초기단계에 집중적으로 수행되어 왔다[3]. 그러나 근래 연구에 따르면 거주단계에서 발생하는 생활 오염물질의 심각성 또한 대두되고 있다[4]. 거주단계에서 발생하는 오염 물질로는 새로 구입한 가구류, 드라이클리닝, 생활 스프레이, 리모델링 등과 같은 재실자의 행위에 의해 발생하는 것이 상당 부분 차지한다. 상기 단계에서 발생하는 오염물질들은 비교적 저농도인 경우가 많은데 시공 및 마감단계의 고농도 오염물질과 비교하여 상대적으로 중요성이 인지되지 않고 있었다. 그러나 저

농도라 할지라도 장기적으로 노출되면 암 발생, 불임과 같은 중환이 발생 할 수 있고, 수면장애, 기억력 감퇴 등 과 같은 만성질환 증상 또한 나타날 수 있다. 이렇듯 기준 농도 이하의 노출임에도 불구하고 장기적인 경우 심각한 영향을 받는 것은 오염물질이 인체에 흡수되는 양이 노출 기간에 비례하여 적산되기 때문이다[5]. 따라서 거주단계 즉, 실생활 오염물질 노출에 대한 연구가 중요해졌다.

거주단계에서의 오염물질에 대한 연구는 중장기적이기 때문에 단기 연구에 비해 비용이 많이 들고, 고려사항 들이 무수히 많다. 특히, 장기적 관점에서는 재실자의 행동이 오염물질 농도에 크게 영향을 미치기 때문에 재실자라는 변수를 반드시 고려하여야 한다. 재실자는 환기패턴, 오염물질 사용빈도, 드라이클리닝 사용빈도, 조리환경 등 다양한 변수를 야기시킨다.

본 연구에서는 상기된 문제점들을 고려하여, 실내 오염물질이 인체에 미치는 영향을 평가하기 위해 실내 오염물질 발생에 대한 시나리오를 작성하였다. 또한, 대한민국 일반 가정 집단과 상위 25%의 오염물질노출이 많은 집단으로 나누어 인체 위해성 평가를 수행하였다.

2. 오염물질 노출 시나리오와 인체 위해성 평가

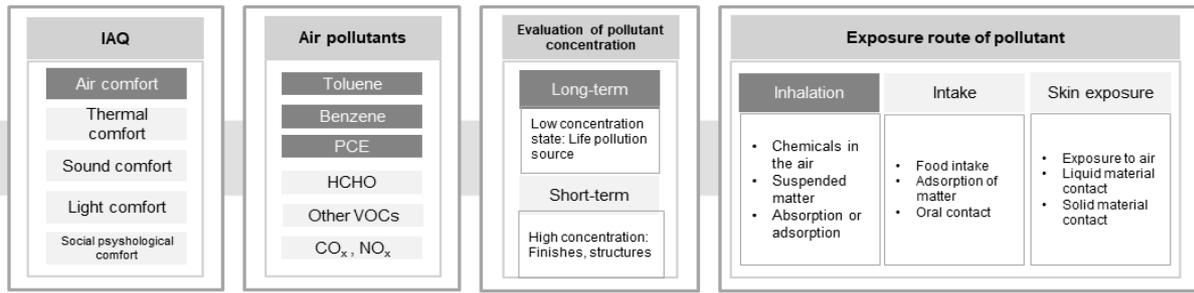


Fig 1. Research Scope and Process.

2.1. 연구 범위

재실 환경 요소에는 공기환경, 음 환경, 열 환경, 빛 환경 등이 있으나, 해당 연구에서는 생활 오염원으로 인해 인체에 만성적 영향을 줄 수 있는 공기환경을 고려요소로 한정하였다. 또한 실내 오염원 중 가장 일반적이고 대표적인 오염물질인 톨루엔, 벤젠, 그리고 국내에서는 주택 대상 농도 규제가 존재하지 않지만 해외에서 위험물질로 규제되어 있는 사염화에틸렌(perchloroethylene, PCE)을 대상 오염물질로 선정하였다[6][7]. 오염물질에 대한 평가기간은 한 달 이상의 중장기로 선정하였으며, 노출 경로로는 섭취, 피부노출, 호흡 등의 여러 경로 중 호흡을 통한 노출경로만을 고려하였다. 본 연구의 방법 및 연구 절차는 <그림1>로 표현 하였다.

2.2. 오염물질 노출 시나리오

생활 오염물질 노출 시나리오 작성은 설문조사를 기반으로 수행하였으며, 해당 오염물질과 위해성 평가에 필요한 정보는 기존 문헌 고찰을 통해 구체화하였다. 설문조사 결과와 기존 문헌 및 통계자료를 총 망라하여 시간에 따른 오염물질 노출 시나리오를 작성하였다.

Table 1. Details on spray products.

	Sweat suppression spray	Mosquito spray	Pesticide	Pain relief spray
Toluene concentration (mg/L)	124.5	73.6	92.4	93
Benzene concentration (mg/L)	48.1	28.6	54.1	46.2
Injection speed (mL/s)	0.26	0.47	0.47	0.47
	Hair spray	Mist	Deodorant	Air freshener
Toluene concentration (mg/L)	38.9	90.5	64.2	51.1
Benzene concentration (mg/L)	30.9	39.5	58.7	38.9
Injection speed (mL/s)	0.47	0.47	0.26	0.26

$$R = R_0 \cdot e^{-kt}$$

R :오염물질방출률(mg/m^2h) R_0 :초기 방출률(mg/m^2h)
 k :1차 반응속도상수(h^{-1}) t :반감기(h)

Table 2. Emmision of perchloroethylene from dry cleaned fabrics.

Clothing component	R0 (mg/m2/h)	K(h-1)	R0/k (mg/m2)	t (h)
Cotton	0.44	0.14	3.1	5
Polyester, Wool blend	1.2	0.033	36	21
Wool	0.99	0.08	12	8.7
Polyester, Rayon blend	0.22	0.03	7.3	23

오염물질의 발생은 실내 중장기 오염물질 농도에 영향을 주기 쉬운 스프레이 제품과 드라이클리닝 한 옷으로 선정하였으며[8], 스프레이 제품과 드라이클리닝 서비스 이용 빈도를 설문조사하여 시나리오로 구성 하였다. 스프레이 제품의 경우, 기존 문헌을 통해 위해성이 증명된 것에 한정하였고, 각 제품마다 유해물질의 오염 농도와 분사 속도를 조사하여 <표1>과 같이 정리 하였다. 드라이클리닝 의류의 경우 기존 문헌을 통해 오염물질 방출량 자료를 수집하였으며, 옷감에 따른 시간당 오염물질 방출률 함수를 확보하여[9] <표2>와 같이 정리하였다. 추가로 설문조사에서는 드라이클리닝 서비스 이용 빈도 뿐만 아니라 계절별 이용 시 어떤 종류의 의류를 맡기는지와 어떤 옷감의 옷을 주로 맡기는지를 조사하였다.

오염물질 제거에 대한 하위 요소로는 자연환기, 후드를 통한 환기, 침기를 선정하였으며 기존 문헌과 통계자료를 이용하여 1차적인 데이터를 수집하고 설문조사 결과를 참고하여 자연환기 빈도, 자연환기 실시하는 시간대, 계절별 환기량과 침기량 등을 시나리오에 적용 하였다[10]. 계절별 환기량과 침기량의 경우 기존 문헌을 참고하였으며[11], 춘계와 추계의 침기량의 경우 기존 문헌 자료가 존재하지 않아 계절별 자연환기 가능시간 자료를 기반으로 비례식을 통해 계산하여 시나리오에 적용하였다[12]<표3><표4>. 재실자 노출정도는 재실 패턴과 개인특성을 선정하였으며, 재실 패턴의 경우 기존 문헌 내 설문 결과를 기반으로 설문조사 결과를 일부 반영하여 주중, 주말의 재실률을 <그림2>과 같이 구성하였다[13]. 개인특성의 경우 위해성을 평가하고자 하는 대상의 체중, 호흡률 등으로 구성되어 있으며, 해당 수치는 한국 노출 계수 핸드북의 값을 차용하였다[14]. 이는 <그림3>와 같은 과정으로 정리하였다.

Table 3. Seasonal ventilation time and frequency.

Indoor ventilation	Exhaust through the kitchen hood	Summer air leakage	Winter air leakage	Spring&Fall all air leakage
Ventilation time	1.5 time/Day, 1 time=30 min	All time	All time	All time
Number of ventilation	1.16ACH	0.3 ACH	0.5 ACH	0.3 ACH
Indoor ventilation	Summer natural ventilation	Winter natural ventilation	Spring & Fall natural ventilation	
Ventilation time	2.7time/Day, 1 time = 2~3hours	1.5time/Day, 1time= 30 min	2.7time/Day, 1time= 1~2hours	
Number of ventilation	1.09 ACH	1.09 ACH	1.09 ACH	

Table 4. Available time of natural ventilation.

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hour	0	0	0	102	494	599	228	181	489	274	1	0

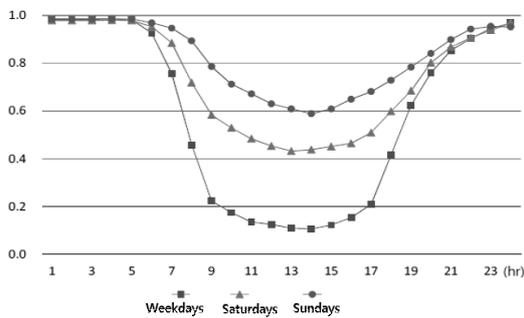


Fig. 2. Occupancy rate of residents.

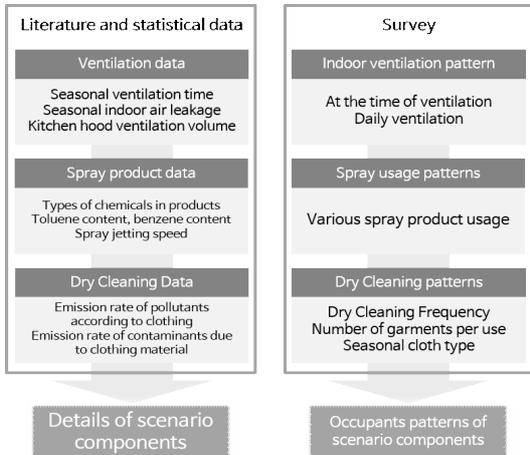


Fig. 3. Process for exposure scenarios of living pollutants.

2.3. 인체 위해성 평가

인체 위해성 평가는 비발암 위해도와 발암 위해도로 나뉜다. 비발암 위해도 (Hazard Quotient, HQ)는 염증 혹은 신경계 질환 등 암을 제외한 질병에서 발병 가능성을 나타내는 지표이며, 비발암 위해도 값이 1 이상이면 암을 제외한 질병들의 발병 가능성이 있다고 간주한다. 발암 위해도(Excess Cancer Risk, ECR)는 발암 확률을 나타내는 지표이며, 미 환경청 EPA (Environmental Protection Agency)는 발암 위해도 값을 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 범위를 권고하고 있다. 발암 위해도 값은

통상 10^{-6} 위해수준(100,000명 중 1명이상이 암 발생)을 기준으로 삼는다.

인체 위해성 평가 방법은 위험성 확인, 용량·반응 평가, 노출 평가, 위해성 결정 총 4단계로 이루어지며 다음 <그림 4>과 같다[15]. 위해성 평가의 첫 번째 단계, 위험성 확인은 참고문헌으로부터 대상 물질이 발생시키거나 기여할 수 있는 질병이나 증상을 확인하는 단계이다. 두 번째 단계인 용량·반응 평가는 용량에 따른 반응이 나타나는 정도를 평가하는 단계이다. 비 발암성 물질은 인체유해반응을 나타내지 않는 최저 한계농도인 노출 참고치(Reference Concentration, RfC)로 결정하게 되고, 발암 물질은 용량·반응 그래프의 Slope Factor를 위해성 평가에 반영하게 된다. 각 물질별 용량·반응평가 데이터는 EPA IRIS(Integrated Risk Information System)를 참고할 수 있다. 세 번째 단계는 노출 평가 단계로서 재실자의 입장에서 유해물질 노출 시간과 농도를 고려하는 단계이다.



Fig. 4. Health risk assessment process.

노출 평가는 식 (1)을 이용하여 생애 평균 일일 노출량(Lifetime Average Daily Dose, LADD)으로 계산되며, 이는 몸무게 1kg 당 하루에 노출되는 오염 물질의 양을 말한다. 평균 일일 노출량은 실내 오염 물질 농도(CA), 호흡율(IR), 노출빈도(EF), 체중(BW), 노출기간(ED), 평균시간(AT) 등 이용하여 산출한다. 이 때 비발암 독성 물질이나 급성영향일 경우의 평균 시간은 노출 기간(ED) 값을 사용한다. 발암 물질이나 만성영향일 경우에는 70년을 대입한다. 마지막 단계인 위해성 결정 단계에서는 도출된 평균 일일 노출량 값과 용량·반응평가 값을 식(2), 식(3)에 대입하여 각각 비발암 위해도와 발암 위해도를 구한다.[16]

$$LADD = \frac{CA \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \dots\dots\dots(1)$$

$$ECR = SF \times LADD \dots\dots\dots(2)$$

$$HQ = \frac{LADD \times BW}{RfC \times IR} \dots\dots\dots(3)$$

- LADD : 생애 평균 일일 노출량 [mg /kg /day]
- CA : 농도 [mg/m³] ED : 노출 기간 [day]
- IR : 호흡률 [m³/hr] BW : 체중 [kg]
- EF : 노출 빈도 [hr/day] AT : 평균 시간 [day]
- HQ : 비발암 위해도 [-] SF : Slope Factor [(mg /kg /day)⁻¹]
- ECR : 발암 위해도 [-] RfC : 노출 참고치 [mg/m³]

본 연구에서는 EPA가 제시하는 위해성 평가 방법으로 생활 오염 물질에 대한 중장기적인 재실자 인체 위해성을 파악하고자 하였으며, EPA의 위해성 평가방식을 일부 수정하여 차용하였다. 이는 실내 오염물질이 빠르게 제거되지 않고 천천히 낮은 농도로 유지되는 중

장기 실내 농도를 평균 농도로 계산할 경우 오차가 크게 나타날 우려가 있기 때문이다[17]. 이를 방지하고자 노출시간을 10초로 짧게 잡아 10초간의 평균농도를 계산하여 총 노출 정도를 계산하였으며, 이외의 계산방법은 상기의 방법과 같은 방식을 차용하였다.

3. 시나리오에 따른 오염물질 농도 변화

3.1. 시나리오 설정

작성된 스케줄을 적용하여 특정 세대 내 농도 변화를 알아보려고 하였다. 타겟 세대는 30평형 아파트로 선정하였다. 분석 대상 세대의 평면은 <그림 5>와 같고[18], 해당 세대의 실 체적은 188m³이다. 이외 분석 조건으로 초기 오염물질 농도와 스프레이 분사 시간 등을 다음 <표 5>과 같이 가정하였다. 분석기간은 스프레이 사용에 의한 실내 오염의 경우 4계절 중 평일, 토요일, 공휴일 각각 하루에 대해 분석하였으며, 드라이클리닝의 경우 4계절 중 각 1주일간에 대한 분석을 수행하였다. 드라이클리닝 한 의류의 경우 세탁소에서 3일 간 보관된 뒤 돌려 받아 해당 세대에서 보관하는 것으로 가정하였다.



Fig. 5. Floor plan of target house

자연환기 시와 후드 가동 시에는 실내 기류와 침기가 매우 복잡하게 변화하므로, 이 두 경우에는 침기량을 고려하지 않고 각각의 값만을 적용하였다. 단, 자연환기와 후드 가동을 동시에 하는 경우에는 두 환기량 값을 합산하여 적용하였다.

Table 5. Indoor pollutant concentration analysis conditions

Contents	Conditions
Room size	188m ³
Initial pollutant concentration	0μg/m ³
Natural ventilation	1.09ACH
Air leakage	Spring, Summer, Fall - 0.30ACH, Winter - 0.50ACH
Kitchen hood	220CMH/h, 1.16ACH
Spray injection time	1 sec
Analysis period (Spray)	4 seasons Weekday, saturday, Sunday(Holiday) each 1day
Analysis period (Dry cleaning)	4 seasons, 1 week

3.2. 동절기

동절기의 경우 자연 환기량은 시간 당 1.09회, 침기량은 시간 당 0.5회로 다른 계절에 비해 침기량이 많으나 환기시간이 주 당 4.5 시간으로 매우 적다. 평일은 재실 패턴에 의해 실내에 머무는 재실자의 수가 적어 소량의 생활 오염물질이 발생하며 평균 집단의 경우 톨루엔 농도가 최고 68μg/m³, 상위 집단의 경우 138μg/m³이 발생했다. 벤젠의 경우 각각 54μg/m³, 111μg/m³로 계산되었다. 톨루엔의 경우, 권고 기준인 1,000μg/m³을 넘지 않았으나, 해당 기준수치는 장기적인 영향을 고려하지 않고 단기적인 신축공동주택 실내 공기 기준이므로 장기적으로 보면 낮은 수치라 할 수 없다. 벤젠의 경우 권고기준 30μg/m³을 순간적으로 상회하였다. 토요일과 일요일의 경우 실내 활동이 잦아 많은 양의 톨루엔과 벤젠이 발생하였고, 벤젠의 경우 일 평균 농도가 권고기준의 2배를 초과하였다.<표6> <그림6>

Table 6. Results of analysis of indoor toluene and benzene concentration in winter.

Winter	Toluene concentration	
	Daily average (μg/m ³)	Maximum (μg/m ³)
Weekday - Top 25% group	30	138
Weekday - Average group	10	68
Saturday - Top 25% group	164	662
Saturday - Average group	92	346
Sunday - Top 25% group	137	570
Sunday - Average group	76	419
Winter	Benzene concentration	
	Daily average (μg/m ³)	Maximum (μg/m ³)
Weekday - Top 25% group	21	111
Weekday - Average group	8	54
Saturday - Top 25% group	97	429
Saturday - Average group	47	181
Sunday - Top 25% group	72	324
Sunday - Average group	36	187

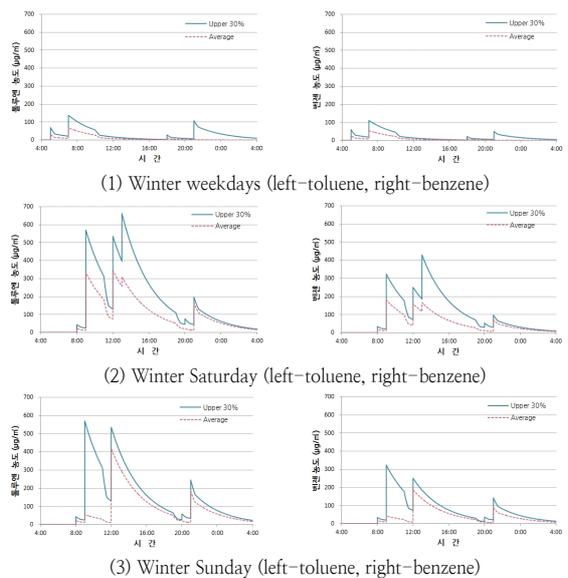


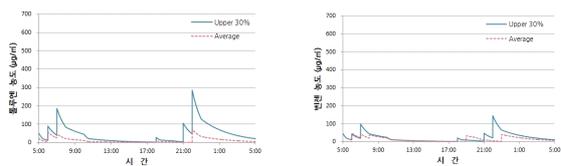
Fig. 6. Changes in indoor toluene and benzene concentrations by spray products (winter season)

3.3. 하절기

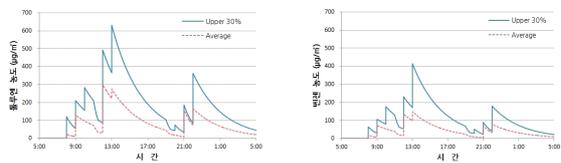
하절기의 경우 자연 환기량은 시간 당 1.09회, 침기량은 시간 당 0.3회로 동절기에 비해 침기량은 적지만 환기시간이 길다. 하절기에는 살충제, 모기약, 땀 억제제 등의 하절기용 스프레이 제품을 추가로 사용하기 때문에 실내 공기 오염이 높을 것으로 예상된다. 분석 결과 동절기에 비해 환기시간이 38시간으로 매우 긴 편이지만 스프레이 제품의 사용량이 많아 겨울철과 거의 비슷한 수준의 톨루엔, 벤젠 농도를 나타내었다. 토요일과 일요일의 경우 마찬가지로 벤젠의 평균 일일 농도가 기준치 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하였다.<표7><그림7>

Table 7. Results of analysis of indoor toluene and benzene concentration in summer.

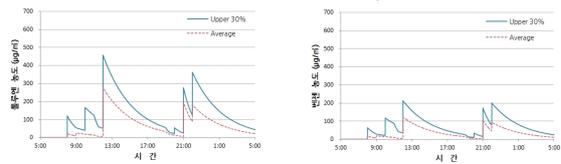
Summer	Toluene concentration	
	Daily average ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Maximum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Weekday - Top 25% group	45	285
Weekday - Average group	12	73
Saturday - Top 25% group	171	631
Saturday - Average group	80	300
Sunday - Top 25% group	125	458
Sunday - Average group	65	277
Summer	Benzene concentration	
	Daily average ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Maximum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Weekday - Top 25% group	23	144
Weekday - Average group	14	49
Saturday - Top 25% group	99	414
Saturday - Average group	40	148
Sunday - Top 25% group	66	214
Sunday - Average group	32	123



(1) Summer weekdays (left-toluene, right-benzene)



(2) Summer Saturday (left-toluene, right-benzene)



(3) Summer Sunday (left-toluene, right-benzene)

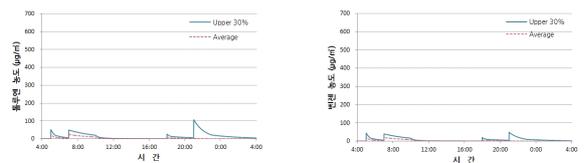
Fig. 7. Changes in indoor toluene and benzene concentrations by spray products (Summer season)

3.4. 중간기

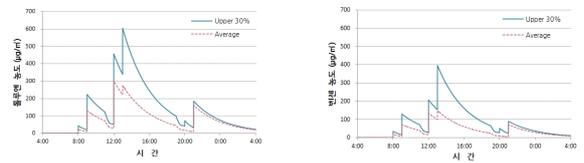
중간기의 경우 자연 환기량은 시간 당 1.09회, 침기량은 시간 당 0.3회로 하절기와 환기횟수가 같고 주 당 환기시간도 38시간으로 하절기와 같은 수준이며, 스프레이 사용량은 하절기보다 적다. 분석결과 하절기, 동절기에 비해 전체적으로 실내 톨루엔과 벤젠의 농도가 낮은 편으로 나타났다. 평균 집단의 경우 토요일, 일요일의 벤젠 일일 평균농도도 38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 기준치와 비슷한 정도로 나타났고, 상위 집단의 경우 일일 평균농도도 78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 다른 계절과 마찬가지로 권고치를 초과하는 것으로 나타났다.<표8> <그림8>

Table 8. Results of analysis of indoor toluene and benzene concentration in spring and fall.

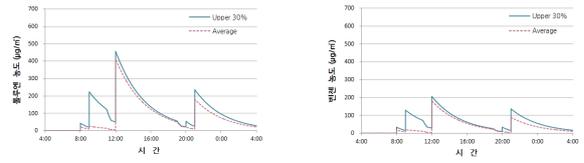
Spring and fall	Toluene concentration	
	Daily average ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Maximum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Weekday - Top 25% group	14	108
Weekday - Average group	4	24
Saturday - Top 25% group	132	604
Saturday - Average group	75	300
Sunday - Top 25% group	106	457
Sunday - Average group	77	412
Spring and fall	Benzene concentration	
	Daily average ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Maximum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Weekday - Top 25% group	9	49
Weekday - Average group	3	20
Saturday - Top 25% group	78	396
Saturday - Average group	38	148
Sunday - Top 25% group	54	207
Sunday - Average group	36	182



(1) Spring and fall weekdays (left-toluene, right-benzene)



(2) Spring and fall Saturday (left-toluene, right-benzene)



(3) Spring and fall Sunday (left-toluene, right-benzene)

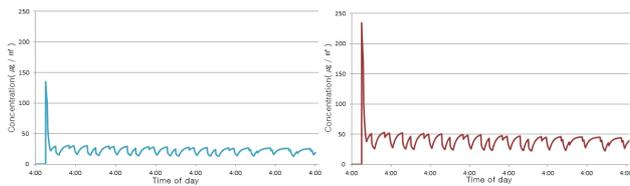
Fig. 8. Changes in indoor toluene and benzene concentrations by spray products (Spring and fall season)

스프레이 제품 사용에 의한 실내 농도를 분석한 결과 톨루엔의 경

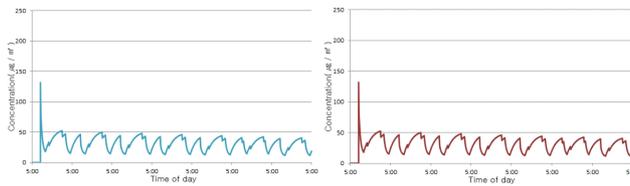
우 권고치 이하의 농도를 나타내었으며, 벤젠의 경우 토요일과 일요일에 권고치를 크게 상회하는 것으로 나타났다. 이는 스프레이 속 벤젠 함유량이 높은 편으로 스프레이 사용만으로도 실내 공기환경이 크게 오염될 수 있다는 것을 의미한다. 스프레이 사용량이 같은 동절기와 중간기를 비교하였을 때는 침기량 보다는 잦은 환기가 실내 오염물질 제거에 큰 도움이 되는 것으로 확인되었다.

3.5. 드라이클리닝에 의한 오염변화

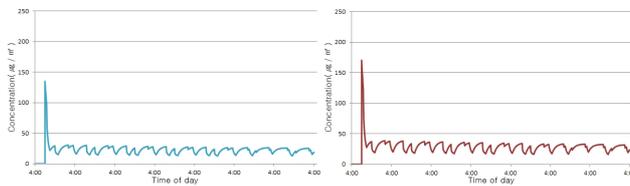
드라이클리닝 의류에서 발생하는 사염화에틸렌의 경우 공동주택 내 권고 기준이 마땅치 않아, EPA의 작업장 권고 기준치인 하루 24시간 평균 약 33ppm(400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 기준으로 데이터를 분석하였다 <그림9>. 분석결과 사계절 간 사염화에틸렌의 최대 농도치는 약 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 미국의 권고 기준치인 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 한참 못 미치는 수준으로 계산되었다. 의류에서 천천히 방출되는 사염화에틸렌은 침기량이 많은 동절기에 안정적으로 제거되는 것으로 나타났지만, 해당 분석은 재실자 1인에 대한 데이터를 적용한 것으로 재실자 4인 가족 모두가 이와 같이 드라이클리닝을 하는 경우 순간 최대 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 사염화에틸렌에 노출될 위험성이 있다고 판단된다.



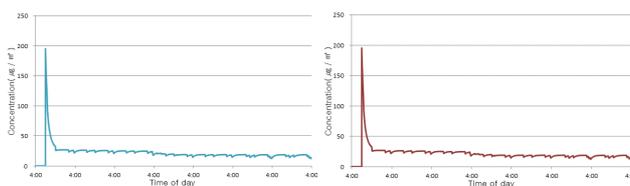
(1) Spring dry cleaning PCE concentration (left-upper 25% group, right-average group)



(2) Summer dry cleaning PCE concentration (left-upper 25% group, right-average group)



(3) Fall Dry cleaning PCE Concentration (left-upper 25% group, right-average group)



(4) Winter dry cleaning PCE concentration (left-upper 25% group, right-average group)

Fig. 9. Change of indoor tetrachlorethylene concentration by dry cleaning clothes

4. 시나리오에 따른 인체 위해성 평가

4.1. 위해성 평가 분석 조건

시나리오에 따른 실내 톨루엔, 벤젠, 사염화에틸렌 농도 분석 결과를 토대로 실내 거주시간이 긴 주부를 대상으로 인체 위해성 평가를 수행하였다. 인체 위해성 평가 중 비발암 위해도에 필요한 노출 참고치와 발암 위해도 계산에 필요한 Slope Factor의 값은 EPA에서 제공하는 값을 사용하였다. 기존 문헌자료 내 주부의 평균 호흡률과 체중을 적용하였으며, 통계 자료 내 주부의 평균 재실시간을 산정하여 다음 <표9>와 같이 위해성 평가분석 조건을 정하였다. EPA의 위해성 평가 방식과 같이 비발암 위해도의 경우 1일 노출로 계산하였으며, 발암 위해도 같은 경우는 70년 노출을 가정하여 평가하였다.

Table 9. Health risk assessment analysis condition

Chemicals	Inhalation rate (m ³ /h)	Weight (kg)	Daily exposure time (h/day)	Slope factor (mg/kg/day) ⁻¹	Exposure reference (mg/m ³)	Number of days exposed (day)
Toluene-HQ	12.80	59.2	15.5	-	5	1
Benzene-ECR				0.0360	-	25,550 (70Years)
Benzene-HQ				-	0.03	1
PCE-HQ				-	0.04	1
PCE-ECR				0.0009	-	25,550 (70Years)

4.2. 스프레이 사용에 따른 인체 위해성 평가

스프레이 사용에 따른 인체 위해성 평가 결과는 다음 <표 10>과 같다. 톨루엔의 경우 4계절 평일, 토요일, 일요일에 대한 비발암 위해도가 낮은 수준으로 평가된다. 반면에 벤젠의 경우 비발암 위해도와 발암 위해도가 높은 경우가 있었는데, 이는 위해성 계수인 노출 참고치가 톨루엔의 경우 매우 높고 벤젠의 경우 매우 낮기 때문에 발생한 차이로 판단된다. 다시 말해 이는 톨루엔에 비해 벤젠이 절대적으로 인체에 더욱 유해하다는 것을 의미한다.

대한민국 일반 가정 집단에 비해 상위 25%의 오염물질노출이 많은 집단의 경우, 오염물질 방출량이 많고 재실시간이 긴 주말에 비발암 위해도가 대부분 기준치 1 이상으로 평가되었다. 평균 집단의 경우 기준치 1을 초과하지는 않았으나 토요일과 일요일에 0.6~0.8 정도의 수준을 보였다. 하루에 대한 비발암 위해도를 1년 단위로 평균 환산하였을 때 상위 집단은 0.627, 평균집단은 0.306으로 약 2배의 차이를 나타내었다. 발암 위해도의 경우 70년에 대한 평가를 수행하였고 상위 집단의 경우 7.57×10^{-6} , 평균 집단은 3.70×10^{-6} 으로 두 집단의 차이가 약 2배 정도 나타났다. 두 집단 모두 발암 위해도 기준인 10^{-6} 을 모두 초과하여, 시나리오에 따라 70년 동안 실내 오염물질에 노출될 경우 각각 100만 명 중 약 8명과 4명 이상의 암 환자가 발생될 수 있다고 예상되었다.

Table 10. Health risk assessment result of using spray

Summer	Toluene		Benzene	
	HQ	ECR	HQ	ECR
Weekdays - Top 25%	0.005	-	0.400	4.83x10 ⁻⁶
Saturday - Top 25%	0.018	-	1.695	2.05x10 ⁻⁵
Sunday - Top 25%	0.013	-	1.135	1.22x10 ⁻⁵
Weekdays - Average group	0.001	-	0.232	2.80x10 ⁻⁶
Saturday - Average group	0.008	-	0.691	8.35x10 ⁻⁶
Sunday - Average group	0.007	-	0.547	5.52x10 ⁻⁶
Winter	Toluene		Benzene	
	HQ	ECR	HQ	ECR
Weekdays - Top 25%	0.003	-	0.354	4.28x10 ⁻⁶
Saturday - Top 25%	0.017	-	1.661	2.01x10 ⁻⁵
Sunday - Top 25%	0.014	-	1.229	1.48x10 ⁻⁵
Weekdays - Average group	0.001	-	0.132	1.60x10 ⁻⁶
Saturday - Average group	0.009	-	0.810	9.78x10 ⁻⁶
Sunday - Average group	0.008	-	0.617	7.45x10 ⁻⁶
Spring and fall	Toluene		Benzene	
	HQ	ECR	HQ	ECR
Weekdays - Top 25%	0.001	-	0.158	1.90x10 ⁻⁶
Saturday - Top 25%	0.014	-	1.336	1.61x10 ⁻⁵
Sunday - Top 25%	0.011	-	0.928	1.12x10 ⁻⁵
Weekdays - Average group	0.000	-	0.050	5.99x10 ⁻⁷
Saturday - Average group	0.008	-	0.641	7.75x10 ⁻⁶
Sunday - Average group	0.008	-	0.612	7.39x10 ⁻⁶
Top 25% total conversion	0.007	-	0.627	7.57x10 ⁻⁶
Average group total conversion	0.003	-	0.306	3.70x10 ⁻⁶

4.3. 드라이클리닝에 의한 인체 위해성 평가

드라이클리닝의 경우 비발암 위해도는 일일 노출로 분석하였으며 발암 위해도는 70년 노출을 가정하여 평가하였으며 평가 결과를 다음 <표11>과 같이 정리하였다. 상위 집단의 경우 비발암 위해도가 0.504, 평균 집단의 경우 0.120으로 스프레이 제품 내 톨루엔에 의한 위해도 보다는 높았으며, 벤젠에 의한 비발암 위해도 보다는 다소 낮게 평가되었다. 발암 위해도의 경우 상위 집단은 약 9.24×10^{-7} , 평균 집단은 2.6×10^{-7} 으로 평가되었다. 이 수치는 발암 위해도 기준인 10^{-6} 을 초과하지 않는 수치이지만, 상위 집단의 경우 거의 기준치에 근접한 수준으로 발암 위해성이 있다고 판단된다. 각 집단의 평가 결과 상위 집단은 1000만명 당 약 9명, 평균 집단은 1000만명 당 약 3명의 암 환자가 발생할 수 있는 것으로 예상된다.

Table 11. Health risk assessment result of tetrachloroethylene from dry cleaned clothes

Spring	PCE	
	HQ	ECR
Top 25% group	0.111	2.61*10 ⁻⁷
Average group	0.049	1.15*10 ⁻⁷
Summer	PCE	
	HQ	ECR
Top 25% group	0.114	2.36*10 ⁻⁷
Average group	0.022	3.63*10 ⁻⁸
Fall	PCE	
	HQ	ECR
Top 25% group	0.111	2.94*10 ⁻⁷
Average group	0.036	9.65*10 ⁻⁸
Winter	PCE	
	HQ	ECR
Top 25% group	0.138	1.33*10 ⁻⁷
Average group	0.013	1.21*10 ⁻⁸
Top 25% group Total	0.504	9.24*10⁻⁷
Average group total	0.120	2.60*10⁻⁷

4.4. 시나리오에 따른 위해성 결과 분석

상위 25% 집단과 평균 집단으로 구분하여 오염물질 농도 평가와 인체 위해성을 발암·비발암 위해도로 평가하였다. 평가 대상은 30평형 아파트 공간에서 거주하는 4인 가족 중 채실 시간이 가장 긴 주부로 선정하였다. 평가 기간은 4계절 내 평일, 토요일, 일요일 각각 하루로 설정하여 연 단위의 결과로 취합할 수 있도록 하였다.

물질 평형식을 이용하여 스프레이 제품에서 발생하는 톨루엔과 벤젠에 의한 실내 오염물질 농도를 계산하였다. 평가결과 하절기와 동절기에 실내 톨루엔과 벤젠농도가 높았으며, 채실 시간이 길어 스프레이 제품 사용이 잦은 토요일과 일요일의 농도가 더욱 높게 나타났다. 중간기의 경우 오염물질 발생량이 하절기에 비해 낮고, 환기시간이 길어 실내 오염 정도가 타 계절에 비해 낮게 나타났다. 동절기의 경우 침기량이 다른 계절에 비해 약 2배 정도 높았지만 자연환기시간이 중간기에 비해 약 8배 정도 적어 발생된 오염물질이 효과적으로 제거되지 못했다. 특히 벤젠의 경우 국내 기준치인 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 기간이 많이 나타나 제품 내 함유된 벤젠이 생각 외로 많다는 것을 알 수 있었다. 드라이클리닝의 경우 EPA 기준 $1,400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 훨씬 못 미치는 수준의 사염화에틸렌이 발생하였으며 2~3주 후 0에 수렴하는 것으로 나타났다.

실내 오염물질 농도 평가 결과를 통해 인체 위해성 평가를 수행하였으며, 인체 위해성은 비발암 위해도와 발암 위해도를 기반으로 평가하였다. 스프레이에서 발생된 톨루엔의 경우 비발암 위해도가 낮아 인체 위해성이 거의 없는 것으로 나타난 반면 벤젠은 비발암 위해도가 1이 넘어 각종 질병 유발 가능성이 높은 것으로 평가 되었다. 실내 벤젠에 70년 간 노출될 경우 발암 위해도 역시 높게 평가되어 상위 집단의 경우 100만명 당 약 8명 이상의 암 환자가 발생할 수 있다는 결과를 얻었다. 드라이클리닝에서 발생한 사염화에틸렌의 경우 비발

암 위해도는 톨루엔 보다 높았으며, 벤젠 보다는 약간 낮게 평가되었다. 발암 위해도는 위해도 기준을 초과하지는 않았으나 상위집단의 경우 거의 기준치와 비슷한 정도로 평가되어 100만 명 당 약 1명의 암 환자가 발생할 수 있다는 결과가 도출되었다.

5. 결론

1. 본 연구에서는 생활 오염 물질 노출로 인한 인체 위해성을 평가하기 위해 오염물질 노출 시나리오를 제안하였다.

2. 생활 오염제품 사용이 많은 상위 25%의 집단과 평균 집단의 인체 위해성을 정량적으로 평가하였다.

3. 시나리오 결과의 실질적 오차를 줄이기 위해 오염물질의 사용량, 환기를 통한 제거, 재실 스케줄에 따른 노출량들을 설문을 통해 통계적으로 접근하였다.

4. 평균집단과 상위 집단의 시나리오를 통하여 중장기 실내 오염물질 농도와 인체 위해성을 평가해봄으로써 생활 오염원에서 발생하는 화학물질이 일반적으로 인식되고 있는 정도보다 더 유해할 수 있다는 점을 제시하였다.

5. 추가적으로 본 연구는 시나리오 재실 및 환기 스케줄 조절을 통하여 실내 환경 제어나 냉난방 에너지 최적화가 가능할 것이며, 인체 위해성 평가를 통한 사회 경제적 손실평가 또한 가능할 것으로 판단된다.

6. 그러나, 다양한 실내 환경이나 특별한 상황은 고려하지 않아 연구의 범용적 한계가 있다. 따라서 후속 연구로 다양한 실내 환경에 대한 중장기 농도 평가와 인체 위해성 평가를 통해 생활 오염원인 스프레이, 드라이클리닝 등의 오염제품 적정 사용량과 이용 빈도를 제시하는 연구를 하고자 한다.

Acknowledgements

본 연구는 국토교통부 주거환경연구사업의 연구비지원(17RERP-B082204-04)에 의해 수행되었습니다.

Reference

[1] Lee, Ji-Weon, Chin, Kyung-Il and Kim, Se-Hwan, "An Analysis of Human Reaction & IAQ Analysis by Changing the Floor Temperature & Ventilation," The International Journal of The Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, Vol. 15, No. 1, pp. 97~102, Feb, 2015.

[2] 정남순, "가습기 살균제를 통해 본 화학물질관리제도의 현황과 문제점에 대한 고찰", 환경법과 정책, 2013 (201311), 35-56. // Jeong Nam-Soon, "The Review on status of chemical safety management policies and limits through humidifier disinfectants accident," Environmental Law and Policy, Vol. 11, pp. 35~56, Nov, 2013.

[3] 유영재, 이철원, 김만구. "건축자재의 오염물질 방출 데이터베이스 개발." 분 석과학, 22.1 (2009.2): 57-64. // (Young-Jae Yu, Chul-Won Lee and Man-Goo Kim, "Development of a building materials database; Volatile organic compounds, formaldehyde emission rates and chemical compositions," Analytical Science & Technology, Vol. 22, No. 1, pp. 57~64, Feb, 2009.)

[4] 정수연 등 3명, "HB마크 건축자재 마감에 따른 공동주택에서의 폼 알 데하이드와 VOCs 장기농도 변화에 관한 연구", 대한건축학회, 2007 // (Jung Su-Yun, Yoon Chang-Hyun and Park Jun-Seok, "Long Term Variations of Formaldehyde and VOCs' Concentrations in a Apartment finished by HB Mark Labelling Building Materials", JOURNAL OF THE ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA Planning & Design,

Vol. 23, No. 7, pp. 277~286, Jul, 2007)

[5] 김다영, 김희찬, 김형근, 김태연, "수치 예측 모델을 이용한 공동주택 실내공기질 위해성 평가 방법." 한국건축환경설비학회 논문집, 10.1 (2016.2): 7-14. // Kim, Da-young, Kim, Him-chan, Kim, Hyung-keun and Kim, Tae-yeon, "Health Risk Assessment by a Numerical Estimation Model for Indoor Air Quality Evaluation of Residential Buildings," Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, Vol. 10, No. 1, pp. 7~14, Feb, 2016.

[6] 건강친화형 주택건설 기준, 국토교통부 // (Health-friendly housing construction standards, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs)

[7] 미국 환경부 EPA IRIS database, 대한민국 환경부 다중이용 시설 등의 실내 공기질 관리법 // (US Environmental Protection Agency EPA IRIS database, Korea Ministry of Environment)

[8] Rahman M.M and K.H Kim, Potential hazard of volatile organic compounds contained in household spray products, Atmospheric environment, 2014

[9] Zhishi Guo et all, Emissions of perchloroethylene from dry cleaned fabrics, Atmospheric environment, 1990

[10] 최유진 고경진, "서울시민의 주택 실내공기질 인식과 관리행태에 관한 연구", 서울도시연구원, 2013 // (Yu-Jin Choi and Kyung-Jin Ko, "A Study on Seoul Citizens' Perception and Management Behavior of Indoor Air Quality in Homes," Seoul Studies, Vol. 14, No. 2, pp. 131~144, Jun, 2013)

[11] 김영희 외 2명, "신축 주택의 톨루엔 발생량 모델을 이용한 건강위해성 평가", 한국환경보건학회지, 2006 // (Young-Hee Kim, Won-Ho Yang and Bu-Soon Son, "Risk Assessment by Toluene Source Emission Model in Indoor Environments of New Houses," Korean Journal of Environmental Health, Vol. 32, No. 5, pp. 398~403, Oct, 2006)

[12] 서정민, "자연환기와 냉난방을 병용한 하이브리드 공조시스템 적용에 관한 연구", 성균관대학교 대학원 석사학위논문, 2008 // (Jung-Min Seo, Young-Jin Choi and Doo-Sam Song, "A Study on Hybrid AC System Coupled with Natural Ventilation and Cooling System," 대한설비공학회 학술발표대회논문집, pp. 351~358, Nov, 2006)

[13] 박소희 이정재, "공동주택의 채실, 조명, 기타 발열기기 이용 스케줄 작성에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 2014 // (Park, So-Hee and Yee, Jurng-Jae, "A Study on Making Occupancy, Lights and Equipments Schedule of Apartment Housing," JOURNAL OF THE ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA Planning & Design, Vol. 30, No. 8, pp. 57~64, Aug, 2014)

[14] Jang J.Y. et al, General factors of the Korean exposure factors handbook, J Prev Med public Health, 2014

[15] USEPA, Risk Assessment Guidance for Superfund Vol.1. 1989, U.S. Environmental Protection Agency: Washington D.C.

[16] 미국 환경부 EPA 홈페이지 (<https://www.epa.gov/risk>, Risk assessment guide line)

[17] Park H.S T. Hong, Methodology for assessing human health risk impacts due to pollutants emitted from building materials, Building and Environment, 2016

[18] 이성재 외 3명, "패시브 플럭스법을 이용한 가구의 오염물질 방출량 평가", 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 2005 // (Lee Sueng-Jae, Sung Min-Ki, Lee Seung-Min and Lee Eun-Taek, "Emission rate of contaminants from Furniture with Passive Flux Method," 대한건축학회 학술발표대회 논문집 - 계획계, Vol. 25, No. 1, pp. 75~78, Oct, 2005)