

공동주택내 이산화질소(NO₂) 및 휘발성유기화합물(VOCs) 노출에 따른 건강 위해성평가

정순원 · 양원호* · 손부순†

순천향대학교 환경보건학과, *대구가톨릭대학교 산업보건학과
(2007. 4. 13. 접수/2007. 5. 10. 채택)

Health Risk Assessment by Potential Exposure of NO₂ and VOCs in Apartments

Soon-Won Jung · Won-Ho Yang* · Bu-Soon Son†

Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University

*Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu

(Received April 13, 2007/Accepted May 10, 2007)

ABSTRACT

Indoor air quality has become a topic of interest and concern. Especially changes in construction design and the increased use of synthetic products may result in an increasing of complaints and health effects about the quality of indoor air at home. In this study, nitrogen dioxide(NO₂) and volatile organic compounds(VOCs) within new and established apartments on the basis of 4 years of building year were measured every 3 days consecutively during 60 days. We selected each 10 house in Seoul, Asan and Daegu, respectively, and produced risk numbers for hazard quotients, and predicted increases in incidence of cancer. The calculations were made for the adult with default exposure values and also made for a worst case scenario using Monte-Carlo simulation as describing the reasonable exposure(RME). Mean of Monte carlo analysis by benzene, in the construction under 4 years (male: 9.2×10^{-5} , female: 1.0×10^{-4}) and over 4 years (male: 6.8×10^{-5} , female: 8.3×10^{-5}) exceeded 10^{-6} of permitted standards in US EPA, RME of Monte carlo analysis. In construction under 4 years (male: 9.9×10^{-3} , female: 9.6×10^{-3}) and over 4 years (male: 9.8×10^{-3} , female: 7.8×10^{-3}) exceeded 10^{-4} of maximum permitted standards in US EPA. The hazard index of non-carcinogenic pollutants by nitrogen dioxide, toluene, m,p-xylene and o-xylene, both male and female in apartment constructed under 4 years and over 4 years was found less than the permitted standards of hazardous health effects in CTE. Significant cancer risks and non-cancer hazard quotients were predicted in under 4 years of building year.

Keywords: indoor air quality, risk assessment, volatile organic compounds, nitrogen dioxide

I. 서 론

산업화와 도시화가 급진전되면서 도시의 인구집중과 산업시설 증가 및 교통량 팽창은 도시지역 대기환경의 오염을 더욱 악화시켰으며, 경제적 수준의 향상과 더불어 도시인의 생활양식과 직장인의 근무양식에도 큰 변화를 가져왔다.¹⁾ 특히, 실내환경 중에서도 주택은 가장 많이 시간을 보내는 공간으로 대략 하루 중 50% 이상 체류하는 것으로 보고되고 있다.²⁾ 실내공기질(Indoor

Air Quality, IAQ)에 대한 문제의 발생 배경은 각종 산업분야에서 에너지 절약 및 효율을 높이기 위한 노력으로 건물의 단열을 위한 밀폐화와 에너지 절감 장치를 설치하는 건물의 증가로 인하여 실내공기의 질이 악화되었다. 또한 그 건물에서 생활하는 사람이 그 건물의 특성을 충분히 이해하지 못하여 건축자재, 공조 시스템 등의 특성이 복잡하고 민감한 실내 환경 조건을 변형시킴으로 인하여 실내 공기 질을 악화시켜 발생된 것이다. 실제로 에너지 절약형 건물은 외부로부터의 공기 침투를 막는 것에 초점을 맞추어 건축되었고, 에너지 절약형의 산업용 건물에서는 건물의 유지 관리비를 줄이기 위해 의도적으로 환기량을 감소시키기도 하여 공기의 유입과 환기량이 감소되어 자연히 실내공

†Corresponding author : Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University
Tel: 82-41-530-1270, Fax: 82-41-530-1272
E-mail : sonbss@sch.ac.kr

기가 오염되고 있다.³⁾

실내오염은 각종 실내공간에서 공기오염, 생활쓰레기, 소음, 악취 등의 각종 환경오염에 이르기까지 다양한 형태로 발생할 수 있으며 이 중에서도 실내공기오염은 대표적으로 인간의 건강까지 위협하고 있다.⁴⁾ 그러나 대부분의 사람들은 실내공기오염(Indoor Air Pollution, IAP)이 인체에 미치는 영향은 실외 대기오염보다 더욱 중요하다는 사실을 대부분 인식하지 못하고 있다.⁵⁾ 더불어 실내공기오염은 주택, 학교, 사무실, 공공건물, 병원, 지하 시설물, 교통수단 등의 다양한 실내공간이 공기가 오염된 상태를 말하며 매우 복합적인 원인들에 의해서 야기될 수 있는데 그 영향은 실내 거주자들의 생명을 위협할 정도는 아닐지라도 장기적으로 볼 때 건강에 나쁜 영향을 미치고 있는 것으로 보고되고 있다.⁶⁾

실내에서 발생하는 오염물질은 비록 저농도라 하더라도 재실자가 실내에서 보내는 시간이 길기 때문에 건강측면에서도 더욱 중요한 의미를 가지게 된다. 일부 실내공기 오염물질은 주로 호흡기와 순환기 계통에 영향을 주며 물질에 따라 발암성을 내포하고 있다. 특히 최근 문제시되고 있는 휘발성 유기화합물(VOCs)의 경우는 호흡기와 순환기뿐만 아니라 신경계에 독성이 강하고, 말초신경계의 감각능력을 저하시키며, 발암성과 유전독성을 내포하여 실내오염물질로 관리할 필요성이 있다고 보고되고 있다.⁷⁾ 또한 호흡기와 기관지 계통에 영향을 주는 이산화질소(NO₂)는 고온연소의 부산물로서 차량, 발전소 및 산업공정에서 주로 발생된다. 실내에서는 가스렌지, 케로센(kerosene) 난방기, 흡연 등과 같은 연소과정에서 발생된다. 또한 실내의 NO₂ 농도는 공기환기량과 실내의 표면반응과 같은 주택특성에 영향을 받는다.⁸⁾

최근에는 실내공기오염의 건강영향을 보다 정확히 분석하기 위하여 개인의 하루 24시간 중 활동 행태에 따른 특정 오염물질에 노출되는 양을 측정하고 있으며, 오염물질별 개인 노출량을 측정하기 위한 기구가 개발되어 실내공기오염에 대한 건강 위해성평가 방법이 시도되고 있다.^{9,10)} 또한 단일화합물질 뿐만 아니라 복합화합물질의 영향에 의한 MCS(multiple chemical sensitivity) 관련 연구도 확대되고 있다.

본 연구는 대다수 국민들이 거주하고 있는 공동주택인 아파트를 대상으로 실내 연소에 의해 발생하는 NO₂와 신축건물에서 발생 가능성이 있는 VOCs의 농도를 일정기간 연속으로 측정하고, Monte-Carlo 모의실험(simulation)을 이용하여 노출평가(exposure assessment)와 위해성평가(risk assessment)를 실시하여, NO₂ 및

VOCs 노출에 따른 인체 유해 영향을 예측하고자 하였다. 또한 본 연구는 실내공기 환경의 개선을 위한 공동주택 실내공기질에 대한 관리방안 및 기초 자료로 활용하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구대상

본 연구는 2004년 7월부터 2004년 9월까지 서울, 아산, 대구 3개 지역의 공동주택을 대상으로 하여 NO₂와 VOCs의 농도를 측정하였다. 각 지역에서 공동주택 건축완공 4년 이내 5주택 및 4년 이후 5주택을 선정하여 실내공간의 대표인 거실 내부 1곳을 선정하여 3일 간격으로 60일 동안 10회씩 NO₂와 VOCs 농도를 측정하였다. 건축완공 4년의 구분은 Brown의 연구보고에서 신축건물의 VOCs 배출이 이중지수(double exponential) 발생모델을 고려한 것이다.¹¹⁾

2. 대상물질의 측정 및 분석방법

1) 이산화질소

NO₂의 농도 측정은 badge type의 수동식 시료채취기(Toyo Roshi Kaisha, Ltd., Japan)를 사용하였다.¹²⁾ NO₂의 분석방법은 Fig. 1과 같이, 분석을 위한 전처리 과정은 실리카겔, 활성탄, Purafil filter(과망간산 칼륨, 활성 알루미늄이나 활성탄으로 합성된 물질)를 연속으로 연결하여 대기 중 공기를 챔버(chamber)로 유입시켜 NO₂가 존재하지 않는 챔버 안에서 실시하였다. NO₂의 정량분석은 photo-spectrometer(Shimadzu UV-1201)를 이용하여 545 nm 파장에서 측정하였다. NO₂ 수동식 시료채취기의 검출한계(Limit of Detection, LOD)는 66 ppb-hr로 3일 간격으로 측정된 본 연구에서는 0.92 ppb이었다.

2) 휘발성 유기화합물

VOCs의 측정은 NO₂와 같은 수동식 시료채취기(OVM 3500, 3M, USA)를 사용하였고, VOCs 중 목

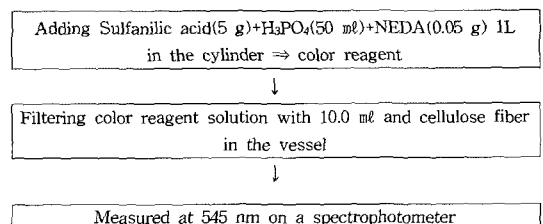


Fig. 1. NO₂ analysis procedure in this study.

Table 1. GC/FID condition for VOCs concentration analysis

GC/FID condition	
Column	HP-FFAP 50 m(length) × 0.32 mm (Column ID) × 0.52 μm(film thickness)
Oven	60°C(3 min) to 90°C at 5°C/min to 250°C at 50°C/min(4min)
Carrier	Helium(5 ml/min)
Detector	FID, 250°C
Injector	1 μl, 200°C

Table 2. Target material's retention time and mass spectrum

Material	Retention time	Qion
Benzene	5.79	78
Toluene	8.10	91
p-Xylene	10.98	91
m-Xylene	11.20	91
o-Xylene	12.84	91

Table 3. Target material's desorption efficiency

Material	Desorption efficiency
Benzene	0.97
Toluene	1.00
p-Xylene	0.97
m-Xylene	0.97
o-Xylene	0.97

적물질은 벤젠(Benzene), 톨루엔(Toluene), 자일렌(Xylene)이었다. 농도분석은 일반 유기용제(활성탄관법)의 분석과 마찬가지로 각 채취기를 이황화탄소(CS₂)로 탈착하여 GC/FID system을 이용하여 분석하였다. GC/FID의 분석조건, 체류시간, 탈착효율은 Table 1~3과 같다. 분석방법의 검출한계는 BTX 표준용액을 희석하여 NIOSH의 지침에 따라 평가했다(NIOSH, 1995). 검출한계는 표준시료 6개를 분석하여 선형회귀식(Y = mX + b)을 구한 후 식 (1)과 같이 산출하였다. BTX 표준용액을 사용하여 산출된 검출한계(LOD)는 benzene 4.11 ng/sample, toluene 4.87 ng/sample, xylene 4.62 ng/sample이었다.

$$LOD(ng/sample) = 3 \times s_y/m$$

여기서, s_y: 표준오차(standard error of regression), m: 선형회귀식의 기울기

3. 위해성 평가

1) 유해성 확인

오염물질의 유해성을 확인하기 위한 자료는 관련 데이터베이스(data base)를 활용하여 검색한다면 많은 시간과 비용을 절약할 수 있다. 본 연구에서는 환경청

(EPA)의 IRIS(integrated risk information system) 자료를 이용하였다.¹³⁾

2) 노출평가

실내공기오염물질의 흡입에 의한 건강위해성을 살펴 보기 위한 필수적인 조건은 인구집단의 다양한 특성을 반영할 수 있는 노출 계수는 체중, 호흡율, 기대수명, 노출기간 및 노출빈도를 활용한 노출량의 산정 및 노출시나리오의 작성이다. 국민의 평균 체중을 조사하기 위한 개별연구자에 의한 연구가 아닌 광범위하고 체계적으로 진행되는 국가조사의 대표적인 것으로 국민체위조사가 있다. 본 연구에서는 한국표준과학연구원에서 2003년 4월부터 2004년 11월까지 대상자를 직접 측정을 통해 21,295명의 0세부터 90세 사이의 국민을 대상으로 한 조사를 이용하여 남녀별 평균체중을 남자 68.8 kg, 여자 56.5 kg으로 사용하였다. 또한 체중의 분포 역시 한국표준과학연구원에서 제공하는 자료를 바탕으로 triangle 분포를 가정하였다. 남녀별 triangle 분포의 최대값은 전체 연령층 조사자료에서 가장 큰 95% 체중값을, 최소값은 0~3개월 된 아이들의 5% 체중값을 그리고 최빈값은 평균체중값으로 가정하였다. 호흡율은 국내 호흡율 관련 조사의 빈약성으로 US EPA의 IRIS에서 건강위해성평가시 규정하고 있는 20 m³/day를 이용하였다. 평균호흡율 CTE(central tendency exposure)일 경우 20 m³/day를, RME(resonable maximum exposure)일 경우 30 m³/day를 본 연구의 호흡율 노출계수 값으로 선정하였다. 또한 확률론적위해성평가를 위해 호흡율의 분포는 Triangle 분포로 가정하였다.

우리나라에서는 여러 연구기관에서 수명과 기대여명에 대한 자료가 발표되고 있지만, 대부분이 통계청의 자료를 인용하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 통계청에서 2002년에 제시한 기대수명 남자 73.38년, 여자 80.44년으로 가정하여 이용하였다. 노출빈도 및 노출기간은 통계청에서 제시한 각 실내공간에서 머무르는 시간의 평균값을 산정하였고 RME 상의 노출빈도 계수의 값은 95% UCL(upper confidence level) 값을 활용하였다. 또한 확률분포는 정규분포를 가정하였다.¹⁴⁾ 노출기간 값은 통계청에서 제공하는 기대수명자료를 대용하여 활용하였으며, 분포는 Triangle 분포로 가정하였다. 일일노출량은 비발암성과 발암성으로 구분하여, 비발암성물질의 경우, 위해도결정에 이용되는 노출량은 일일평균용량(average daily dose, ADD)으로 나타낼 수 있다.

$$ADD(mg/kg \cdot day) = \frac{C \times IR \times ED \times EF}{BW \times AT \times 1000 \times 60 \times 24}$$

여기서, ADDs: average daily doses (mg/kg-day), C: contaminant concentration in inhaled air (μg/m³), IR: inhalation rate (m³/day), ED: exposure duration (year), EF: exposure frequency (min/day), BW: body weight (kg), AT: average time (year), 1000: 단위환산계수(1000 μg/mg), 60: 단위환산계수(60 min/hr), 24: 단위환산계수(24 hr/day)

발암성물질의 경우, 인간이 오염물질에 노출이 평생 동안 일어나지 않더라도 발암작용은 지속될 수 있으므로 노출시간으로 가정한다. 즉, 발암작용이 있는 경우에는 평생노출로 가정하여 평균시간 대신 평생시간(Lifetime, LT)을 사용한다.

$$LADDs(mg/kg \cdot day) = \frac{C \times IR \times ED \times EF}{BW \times LT \times 1000 \times 60 \times 24}$$

여기서, LADDs: lifetime average doses (mg/kg-day), LT: lifetime (year)

3) 용량-반응평가

본 연구에서는 US EPA에서 제공하는 IRIS의 데이터베이스를 이용하여 발암성 및 비발암성 용량-반응평가를 위한 발암성 독성자료인 단위위해도(unit risk)와 비발암성 독성자료인 RfD(Reference Dose)의 자료를 사용하였다. US EPA의 분류체계인 발암증거의 가중(weighting of evidence)에 따라 발암력을 분류하였고, 단위위해도, 외삽방법, 암의 형태 및 동물 독성 실험으로부터 생물이 어떠한 독성 영향도 나타나지 않는 준위인 최대무영향용량(no observed adverse : NOAEL)과 건강상에 독성 영향을 나타내는 한계치인 최소영향용량(lowest observed adverse effect level : LOAEL) 값을 조사하였다. 또한 특정화학물질에 이용될 수 있는

자료의 과학적 불확실성과 외삽할 때 발생하는 불확실성을 교정하기위한 변형계수(Modifying Factor, MF)와 불확실성계수(Uncertainty Factor, UF) 등을 조사하였다 (Table 4).

4) 위해도결정(risk characterization)

발암성물질의 경우, US EPA의 IRIS 자료들을 이용한 용량-반응평가를 통해 산출된 발암잠재력(Cancer Potency Factor, CPF)을 한국인의 평균 체중 및 평균 호흡량으로 보정하여 남녀 각각의 단일 발암잠재력을 구하여 노출평가를 통해 산출된 LADDs(lifetime average doses) 값과 곱하여 발암위해도를 산출하였다. 산출된 남녀 각각의 발암위해도는 EPA(1990)에서 제시하고 있는 인체를 보호하기 위한 위해도 허용 기준치(risk criteria)인 10⁻⁶~10⁻⁴과 서로 비교하였다. 비발암성 물질의 경우, 노출평가를 통해 얻어진 ADDs와 용량-반응평가를 통해 산출된 참고치(RfD)의 비를 통해 비발암위해도지수(Hazard Quotient, HQ)를 산출하였다. 산출된 각각의 남녀별 위해도지수는 “1”을 기준으로 1을 초과하는 경우에는 건강상 위해 영향이 발생할 가능성을 제시해 주며, 1이하인 경우에는 안전역에 속해 있음을 제시해 준다. 그러나, 위해도지수의 크고 작음에 따라 위해도의 정도를 고려하지는 않는다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 주택특성

본 연구의 대상은 서울에서 10주택, 아산 10주택, 대구 10주택 총 30주택에서 수행되었다. 그리고 각 지역에서 5주택은 4년 이내의 주택이었으며, 5주택은 4년 이후의 주택이었다. NO₂ 및 VOCs 농도측정은 30주택 중에서 단독 2주택이 중도에서 불참하였고, 1주택은 측

Table 4. Quantitative estimate of carcinogenic and non-carcinogenic risk from inhalation exposure

Pollutant	EPA classification	UR ((mg/m ³) ⁻¹)	Extrapolation method	Route	Tumor type	RfC (mg/m ³)	Noael loaer (mg/m ³)	UF	MF
Benzene	A	2.2 × 10 ⁻⁶ to 7.8 × 10 ⁻⁶	Low-dose utilizing likelihood	inhalation	Leukemia	-	-	-	-
Toluene	D	-	-	-	-	0.4	N : 119 L : 119	300	1
m-p-Xylenc	D	-	-	-	-	0.29	N : 500	500	1
o-Xylene	D	-	-	-	-	2.9	N : 145	500	1
Nitrogen dioxide	C	-	-	-	-	0.1	N : 4	30	1

UR : unit risk, RfC : reference concentration, N : NOAEL, L : LOAEL, UF : uncertainty factor, MF : modify factor
A : human carcinogens, B : probable human carcinogen, C : possible human carcinogen, D : not classifiable as to human carcinogen, E : no evidence of non-carcinogen for human(US EPA IRIS, 2005)

정과정 중 측정기의 보관 상태가 불량하여 주택 총 27 주택에서 농도분석을 하였다. 설문조사된 가족의 평균 수는 3.7명이었고, 단독주택 2주택, 연립주택 3주택, 아파트는 25주택이었다. 실내벽의 주요 물질은 시멘트(30주택)였으며, 30주택 모두에서 벽면에 벽지를 하였다. 30주택 모두 취사용으로 가스레인지리를 사용했으며, 1주택(성냥 또는 라이타 사용) 제외하고 가스 점화장치는 가스레인지 자체의 불꽃 점화장치를 사용하였다. 난방장치는 27주택에서 가스, 2주택은 석유, 1주택은 전기를 사용한다고 응답하였다(Table 5).

Table 5. House characteristics of participants

	Area			Total
	Seoul (n= 10)	Asan (n= 10)	Daegu (n= 10)	
Type of house				
Single house	0	1	1	2
Apartment	10	9	9	28
Attached garage	10	10	10	30
Inside smoker	0	1	3	4
Gas range	10	10	10	30
Gas water heater	10	10	10	30
Kerosene heater	0	0	0	0

Table 6. Classification by means of building year

Building year	Number			Total
	Seoul (n=10)	Asan (n=10)	Daegu (n=10)	
1 year	0	4	1	5
2 years	1	1	0	2
3 years	3	0	2	2
4 years	1	0	2	3
Over 4 years	5	5	5	15

Table 7. Measured NO₂ and VOCs concentrations (μg/m³) according to house year

Building year	Pollutant	N	Mean	S.D.	Max	Min
	Nitrogen dioxide	254	48.01	28.65	175.61	2.98
Under 4 years n=14	Benzene	138	11.97	13.80	102.97	0.51
	Toluene	249	183.67	196.33	802.26	12.37
	m,p-Xylene	152	107.36	117.66	679.44	5.33
	o-Xylene	89	60.78	45.34	206.43	7.08
Over 4 years n=13	Nitrogen dioxide	240	46.54	21.31	124.69	7.74
	Benzene	114	8.82	7.37	44.97	0.18
	Toluene	191	74.02	61.38	572.55	7.51
	m,p-Xylene	88	52.79	54.07	387.95	4.89
	o-Xylene	82	29.11	14.73	66.10	16.00

참여자의 주택특성 중 건축연도는 1년 이내 5주택, 2년 이내 2주택, 3년 이내 5주택, 4년 3주택이었고, 10년, 11년 및 25년 전에 건축된 주택도 포함되어있었다 (Table 6).

2. NO₂ 및 VOCs의 농도

서울, 아산, 대구에서 60일 동안 3일 간격으로 측정된 준공 4년 이하(14주택) 및 4년 이상 공동주택(13주택) 실내의 NO₂ 및 VOCs의 농도를 Table 7에 나타내었다. 대상 오염물질의 각 농도는 검출한계 이상의 농도값을 나타내는 농도를 이용하여 나타내었다. 4년 이하 공동주택에서의 평균농도는 NO₂ 48.01±28.65 μg/m³, benzene 11.97±13.80 μg/m³, toluene 183.67±196.33 μg/m³, m,p-xylene 107.36±117.66 μg/m³, o-xylene 60.78±45.34 μg/m³로 나타났고, 4년 이상 공동주택은 NO₂ 46.54±21.31 μg/m³, benzene 8.82±7.37 μg/m³, toluene 74.02±61.38 μg/m³, m,p-xylene 52.79±54.07 μg/m³, o-xylene 29.11±14.73 μg/m³로 나타났다. NO₂와 benzene는 4년 이하 주택과 4년 이상 주택에서 유의한 통계적 차이를 보이지 않았지만, toluene, m,p-xylene과 o-xylene은 유의하게 4년 이하 공동주택에서 높았다(p<0.05). 연구기간이 7~9월인 여름철임을 고려할 때 VOCs의 경우 휘발에 따른 고농도 배출 가능성을 생각할 수 있다. 따라서 겨울철과 비교하는 것이 차후 연구되어야 할 것이다.

3. 발암성물질의 위해성평가

Benzene의 호흡으로 인한 발암위해도를 건축 4년 이하 및 4년 이상 공동주택에서의 노출에 의한 위해성평가와 수용체를 남성과 여성으로 분류하여 각각 건강위해성평가를 실시하였다. 발암위해도의 결과는 중심경향 노출 및 최대노출농도 상태로 나누어 단일평가치 분석

Table 8. Cancer risk of male and female by exposure simulation to benzene in indoor environment

Site	Sex	Pollutant	Cancer risk										
			Fixed point					Monte-Carlo simulation					
			CTE	RME	Mean	Max	Min	Percentiles					
					25	50	75	90	95	100			
Under 4 year	Male	Benzene	3.7E-05	3.8E-04	9.2E-05	9.9E-03	1.2E-07	2.0E-05	4.4E-05	9.9E-05	2.1E-04	3.2E-04	9.9E-03
	Female		5.2E-05	4.6E-04	1.0E-04	9.6E-03	5.8E-09	2.1E-05	5.0E-05	1.1E-04	2.4E-04	3.7E-04	9.6E-03
Over 4 year	Male	Benzene	2.7E-05	2.8E-04	6.8E-05	9.8E-03	1.6E-09	1.8E-05	3.9E-05	7.9E-05	1.5E-04	2.2E-04	9.8E-03
	Female		3.8E-05	3.3E-04	8.3E-05	7.8E-03	8.1E-09	2.2E-05	4.6E-05	9.5E-05	1.9E-04	2.7E-04	7.8E-03

(point estimate analysis)을 실시하고 각각의 노출계수에 자료의 특성을 고려하여 적용된 확률분포를 이용하여 확률론적 발암위해도의 평균값, 최대값, 최소값과 25%, 50%, 75%, 90%, 95%, 100% 값을 몬테카를로 분석(Monte-Carlo analysis)으로 제시하였다. Table 8은 Benzene에 의한 발암위해도를 남성과 여성으로 구분하여 제시하였다. 4년 이하 공동주택에서 단일평가치 분석 결과는 남성과 여성 모두 변수들의 평균값을 이용한 중심경향노출인 CTE 하에서는 US EPA에서 제시하는 허용기준치인 10⁻⁶을 초과하는 3.7×10⁻⁵ 및 5.2×10⁻⁵의 결과값을 보이고 있다. 최대노출농도인 RME 상태에서는 3.8×10⁻⁴ 및 4.6×10⁻⁴으로 최고허용기준치는 초과하지 않는 것으로 나타났다. 확률론적 위해성평가를 실시한 몬테카를로 분석에서는 남성과 여성의 경우 평균값이 9.2×10⁻⁵ 및 1.0×10⁻⁴로 허용기준치를 초과하고 있으며 최대값에서 9.9×10⁻³ 및 9.6×10⁻³으로 최고허용기준치인 10⁻⁴을 초과하는 결과값을 보였다. Benzene의 4년 이상의 공동주택에서의 단일 평가치 분석결과는 4년 이하의 공동주택과 마찬가지로 남성과 여성에게서 발암위해도의 결과값이 2.7×10⁻³과 3.8×10⁻³로 허용기준치를 초과하는 결과값을 보였다. 또한,

몬테카를로 분석에서도 허용기준치를 초과하는 6.8×10⁻⁵ 및 8.3×10⁻⁵의 발암위해도를 나타냈다. 발암위해도를 비교해 보면 남성의 경우, 4년 이하 공동주택의 Benzene의 발암위해도가 4년 이상 공동주택의 발암위해도보다 높게 나타났으며, 여성의 경우도 남성의 경우와 같이 4년 이하 공동주택이 높은 결과를 나타내었다.

4. 비발암성물질의 위해성 평가

4년 이하 및 4년 이상 공동주택에서의 실내 환경 중 분포하는 NO₂와 Toluene, m,p-Xylene, o-Xylene의 호흡에 의한 비발암위해도를 4년 이하 및 4년 이상에서의 노출에 의한 위해성평가를 수행하고, 수용체를 남성과 여성으로 분류하여 각각 건강위해성평가를 실시하였다. 비발암위해도의 결과는 중심경향노출 및 최대노출농도 상태로 나누어 단일평가치 분석을 실시하고 각각의 노출계수에 자료의 특성을 고려하여 적용된 확률분포를 이용하여 확률론적 발암위해도의 평균값, 최대값, 최소값과 25%, 50%, 75%, 90%, 95%, 100% 값을 몬테카를로 분석으로 제시하였다.

4년 이하 공동주택의 NO₂ 및 Toluene, m,p-Xylene,

Table 9. Hazard index for non-carcinogenic indoor air pollutants under 4 years of house age

Site	Sex	Pollutant	Hazard index										
			Fixed point					Monte-Carlo					
			CTE	RME	Mean	Max	Min	Percentiles					
					25	50	75	90	95	100			
Under 4 year	Male	Nitrogen dioxide	2.2E-01	1.7E+00	4.5E-01	1.9E+01	6.9E-06	1.4E-01	2.9E-01	5.4E-01	9.6E-01	1.4E+00	1.9E+01
		Toluene	2.1E-01	2.5E+00	4.2E-01	4.0E+01	2.4E-04	9.7E-02	2.1E-01	4.7E-01	9.4E-01	1.5E+00	4.0E+01
		m,p-Xylene	1.8E-01	1.7E+00	3.2E-01	4.6E+01	4.7E-06	7.4E-02	1.7E-01	3.8E-01	7.7E-01	1.2E+00	4.6E+01
	Female	o-Xylene	9.7E-03	9.0E-02	1.9E-02	1.0E+00	6.3E-07	5.6E-03	1.2E-02	2.3E-02	4.2E-02	6.2E-02	1.0E+00
		Nitrogen dioxide	3.2E-01	2.3E+00	5.7E-01	3.2E+01	6.1E-02	1.9E-01	3.6E-01	6.9E-01	1.2E+00	1.8E+00	3.2E+01
	Female	Toluene	3.0E-01	3.1E+00	5.5E-01	7.5E+01	6.0E-05	1.2E-01	2.7E-01	6.1E-01	1.2E+00	1.9E+00	7.5E+01
		m,p-Xylene	2.5E-01	2.4E+00	4.5E-01	5.2E+01	1.3E-05	9.5E-02	2.2E-01	4.9E-01	1.0E+00	1.6E+00	5.2E+01
		o-Xylene	1.4E-02	1.2E-01	2.5E-02	1.5E+00	7.3E-07	7.2E-03	1.5E-02	3.0E-02	5.5E-02	8.0E-02	1.5E+00

o-Xylene에 의한 비발암 위해도지수를 남성과 여성으로 구분하여 나타냈다(Table 9). 단일평가지 분석결과 남성의 경우는 변수들의 평균값을 이용한 CTE 상태에서는 비발암 오염물질에 의한 인체 유해영향의 유무를 판단하는 기준인 "1"을 모두 초과하지 않는 것으로 나타났다. 최대노출농도인 RME 상황에서는 o-Xylene을 제외한 NO₂ 1.7, Toluene 2.5, m,p-Xylene 1.7로 1을 초과하고 있다. 여성의 경우, CTE 상태에서는 NO₂, Toluene, m,p-Xylene, o-Xylene 모두 1을 초과하지 않았다. 최대노출농도인 RME 상황에서는 남성의 경우와 같이 NO₂ 2.3, Toluene 3.1, m,p-Xylene 2.4로 1을 초과하여 건강상 비발암 인체 영향이 있는 것으로 나타났다.

몬테카를로 분석 결과에서 남성의 경우, 평균값에서는 모든 대상물질이 1을 초과하지 않는 결과를 보였으나, 최대값의 경우에는 1.9×10¹, Toluene 4.0×10¹, m,p-Xylene 4.6×10¹, o-Xylene 1.01로 모두 1을 초과하는 결과를 나타냈다. 여성의 경우도 평균값에서는 모든 대상물질이 1을 초과하지 않는 결과를 보였으나 최대값의 경우에는 모두 1을 초과하는 것으로 나타났다. 단일평가지 분석과 몬테카를로 분석 결과에서 모두 여성의 비발암 위해도지수가 남성보다 높은 결과를 나타냈다.

4년 이상 공동주택에서 NO₂, Toluene, m,p-Xylene, o-Xylene에 의한 비발암 위해도지수를 보여주고 있다(Table 10). 4년 이상 공동주택의 단일평가지 분석에서 남성의 경우, 중심경향노출인 CTE상태에서는 모두 1을 초과하지 않는 것으로 나타났다. 최대노출농도인 RME 상태에서는 NO₂ 1.4로 1을 초과하는 것으로 나타났다. 여성의 경우에서도 CTE 상태에서는 모두 1을 초과하지 않는 것으로 나타났고 RME 상태에서는 NO₂ 1.8,

m,p-Xylene 1.2로 "1"을 초과하여 건강상 인체 영향이 있는 것으로 나타났다. 몬테카를로 분석결과 남성의 경우, 대상물질의 평균값에서는 모두 1을 초과하지 않았으나 최대값에서는 o-Xylene을 제외한 NO₂에서는 2.1×10¹, Toluene은 7.6, m,p-Xylene은 1.5×10¹로 1을 초과하는 결과를 나타냈다.

여성의 경우도 대상물질의 평균값에서는 모두 1을 초과하지 않았고 최대값에서는 o-Xylene을 제외한 NO₂에서는 2.5×10¹, Toluene은 1.7×10¹, m,p-Xylene은 1.6×10¹로 1을 초과하는 결과를 나타냈다. 단일평가지 분석의 CTE와 RME상태 및 몬테카를로 분석의 평균값과 최대값 등에서 여성의 비발암 위해도지수가 남성보다 높은 것으로 나타났다. 이 결과는 임 등이 입주전 신축 공동주택의 건강 위해성평가 연구에서 Toluene, Xylene의 위해도지수 보다 낮았으며, 이것은 본 연구는 4년을 기준으로 했기 때문으로 생각한다.¹⁵⁾

IV. 결 론

본 연구에서는 서울, 아산, 대구지역의 공동주택을 대상으로 하여 실내 오염물질인 NO₂ 및 VOCs의 농도를 60일간 3일 간격으로 연속 측정하고 평균값을 이용하여 실제 거주로 인한 위해도를 예측 평가하였다. 신축 4년 이하의 공동주택의 대상 공기오염물질의 평균 농도는 모두 4년 이상의 공동주택에서 높았으며, 특히 Toluene, m,p-Xylene과 o-Xylene은 4년 이하 공동주택에서 통계적으로 높게 나타났다(p<0.05). 이 결과는 신축 공동주택의 내장재 및 마감재 등에서 발생된 유기 화합물이 거주자 입주 후에서 장기간 노출에 따른 건강영향 가능성을 제시할 수 있었다. 또한 건강 위해성 평가에서도 4년 이하의 주택에서 4년 이상의 주택보다

Table 10. Hazard index for non-carcinogenic indoor air pollutants over 4 years of house age

Site	Sex	Pollutant	Hazard index										
			Fixed point				Monte-Carlo						
			CTE	RME	Mean	Max	Min	Percentiles					
					25	50	75	90	95	100			
Over 4 year	Male	Nitrogen dioxide	2.2E-01	1.4E+00	4.3E-01	2.1E+01	3.3E-05	1.6E-01	2.9E-01	5.3E-01	9.0E-01	1.3E+00	2.1E+01
		Toluene	8.5E-02	7.1E-01	1.7E-01	7.6E+00	1.5E-05	5.0E-02	9.7E-02	2.0E-01	3.8E-01	5.6E-01	7.6E+00
		m,p-Xylene	8.8E-02	8.4E-01	1.7E-01	1.5E+01	5.7E-07	3.9E-02	8.6E-02	1.9E-01	3.8E-01	5.7E-01	1.5E+01
		o-Xylene	4.7E-03	3.5E-02	9.3E-03	3.7E-01	1.9E-06	3.2E-03	6.1E-03	1.1E-02	2.0E-02	2.8E-02	3.7E-01
	Female	Nitrogen dioxide	3.1E-01	1.8E+00	5.6E-01	2.5E+01	3.0E-04	2.0E-01	3.7E-01	6.9E-01	1.2E+00	1.6E+00	2.5E+01
		Toluene	1.2E-01	8.6E-01	2.2E-01	1.7E+01	8.7E-06	5.9E-02	1.3E-01	2.6E-01	4.9E-01	7.3E-01	1.7E+01
		m,p-Xylene	1.2E-01	1.2E+00	2.2E-01	1.6E+01	4.8E-05	4.9E-02	1.1E-01	2.4E-01	4.9E-01	7.5E-01	1.6E+01
		o-Xylene	6.6E-03	4.7E-02	1.2E-02	3.4E-01	1.3E-06	4.1E-03	7.9E-03	1.5E-02	2.5E-02	3.6E-02	3.4E-01

높은 건강영향 가능성이 예측되었고, 성별에 따른 위해도의 차이는 CTE 상태와 RME 상태 모두 여성이 높은 것으로 나타났으며, 몬테칼로 분석에서도 여성이 높은 결과값을 나타내었다. 이는 위해성 평가시 환경부(2001)에서 조사한 노출빈도가 여성이 남성보다 높은 실내 거주시간을 보내는 것으로 조사되었고, 평균수명 또한 여성이 남성보다 높게 가정되었으며, 체중의 경우 남성보다 여성이 평균체중이 적기 때문에 단위체적당 독성의 영향이 남성보다 여성이 크기 때문에 독성의 영향이 남성보다 여성이 크다. 또한 발암성물질의 경우 오염물질의 독성이 노출시에만 인체에 영향을 주는 것이 아니라 평생을 통해 인체영향을 주는 것으로 가정되기 때문에 노출기간은 발암위해도의 결과에 많은 영향을 주기 때문이라고 생각한다. 본 연구의 위해성 평가시 4년 이내 공동주택과 4년 이후 공동주택의 각각의 노출빈도의 가정에 의한 불확실성이 존재하고 있으며, 특히 노출기간에 있어 건축 4년 이내 공동주택이 오염물질의 농도가 감소되는 비율을 고려하지 않음으로써 전체 위해성평가의 결과가 과대평가 되었을 가능성이 높다. 그러나 위해성평가는 최악의 경우(worst case)를 적용하는 것이 인체에 대한 영향을 평가하는게 일반적 연구방법이므로 본 연구결과를 통해 향후 관련 연구에 도움이 될 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Wade, W.A., Cote, W.A. and Yocom, J.E. : A study of indoor air quality. *Journal of the Air Pollution Control Association*, **25**(9), 933-939. 1975.
2. Ellacott, M.V. and Reed, S. : Development of robust indoor air quality models for the estimation of volatile organic compound concentrations in buildings. *Indoor Built Environment*, **8**, 345-360, 1999.

3. Vincent, D., Annesi, I., Festy, B. and Lambrozo, J. : Ventilation system, indoor air quality, and health outcomes in parisian modern office workers. *Environmental Research*, **75**, 100-112. 1997.
4. Hoddinott, K.B. and Lee, A.P. : The use of environmental risk assessment methodologies for an indoor air quality investigation. *Chemosphere*, **41**, 77-84, 2000.
5. Jones A.P. : Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment*, **33**, 4535-4564, 1999.
6. 김영희, 양원호, 손부순 : 신축 주택의 톨루엔 발생량 모델을 이용한 건강위해성 평가. *한국환경보건학회지*, **32**(5), 398-403, 2006.
7. 환경부 : 실내공간 공기오염특성 및 관리방안 연구용역 결과보고, 2002.
8. 양원호, 손종렬, 손부순 : 구획모델을 이용한 주택에서 이산화질소의 발생강도 및 감소상수 동시 측정. *한국환경보건학회지*, **31**(4), 260-265, 2005.
9. 양원호, 이선화, 백도명 : 시간가중치 평균모델을 이용한 이산화질소 노출평가 및 예측. *한국대기환경학회지*, **17**(3), 251-258, 2001.
10. Sparks, L.E., Molhave, L. and Dueholm, S. : Source testing and data analysis for exposure and risk assessment of indoor pollutant sources. ASTM STP 1287. American Society for Testing and Materials, 367-375, 1996.
11. Brown, S.K. : Volatile organic pollutants in new and established buildings in Melbourne, Australia. *Indoor Air*, **12**, 55-63, 2002.
12. Yanagisawa, Y. and Nishmura, H. : A badge-type personal sampler for measurement of personal exposures to NO₂ and NO in ambient air. *Environment International*, **8**, 235-242, 1982.
13. 미국 환경청 : <http://www.epa.gov/iris/>
14. 통계청 : 생활시간조사보고서, 제 1권 생활시간량편, 1999.
15. 임영욱, 양지연, 김호현, 이윤규, 김윤신, 장성기, 손종렬, 노영만, 신동천 : 신축공동주택 휘발성유기화합물(VOCs)로 인한 건강위해성평가. *한국실내환경학회*, **3**(3), 211-223, 2006.