

건강위해성평가에 의한 사무실 실내공기오염물질의 관리항목 확대

노영만¹ · 이철민¹ · 김윤신¹ · 김석원² · 김치년³ · 김현욱⁴ · 조기홍⁵ · 최호춘⁶ · 김정만^{7*}

¹한양대학교 환경 및 산업의학연구소 · ²작업환경측정기관협의회 · ³연세대학교 산업보건연구소
⁴가톨릭대학교 예방의학교실 · ⁵한국노동조합총연맹 · ⁶대한산업보건협회
산업보건환경연구원 · ⁷동아대학교 예방의학교실

Extension Possibility of Indoor Air Standards in Office Building by Health Risk Assessment

Young-Man Roh¹ · Cheol Min Lee¹ · Yoon Shin Kim¹ · Seok Won Kim² · Chi-Nyon Kim³ · Hyun-Wook Kim⁴ ·
Kee Hong Cho⁵ · Ho Chun Choi⁶ · Jung Man Kim^{7*}

¹Institute of Industrial and Environmental Medicine, Hanyang University

²Korean Society of Industrial Hygiene Laboratories ³Institute for Occupational Health, Yonsei University

⁴Department of Preventive Medicine, Catholic University ⁵Federation of Korean Trade Unions

⁶Korean Industrial Health Association, Institute of Occupational Environmental Health

⁷Department of Preventive Medicine, Dong-A University

This study was performed to deduct the extension possibility of the standards establishment for NO₂, O₃, Asbestos, Radon, total volatile organic compounds (TVOC) excluded in the indoor air part of Industrial Safety Acts in Korea. The air pollutants were sampled for 30 office buildings from August to September, 2005 in the metropolitan area. The airborne concentrations of NO₂, O₃, Radon and TVOC were 0.0092 ppm, 0.0035 ppm, 0.57 pCi/L and 423 ug/m³, respectively. The management plan and reduction methods is required in the aspect of indoor air quality (IAQ) because the emission sources of those also exist in indoor as well as outdoor even though those were not exceeded the standards of the Ministry of

Environment in Korea. The standard for TVOC in the new and remodelling office has to be established based on the risk assessment when hazard index exceeded "1" in the worst case scenario. In the state of art, the management of each volatile organic compounds has a difficulty due to not enough data for toxicological reference. Therefore, it is suggested that first of all, the standard for TVOC be established and then expanded to each materials for decision-making of improvement of IAQ in office.

Key Words : IAQ, TVOC, risk assessment, office building, hazard index, unit risk

I. 서론

현대 건물의 대형화와 고층화가 급속하게 진행되고 있는 우리나라 대도시의 변형은 소위 문화의 시대, 쾌적한 환경의

시대라고 일컫는 선진국의 도시환경에 신속히 공감할 수 있는 경향을 보여주고 있다. 공공시설의 새로운 설계, 도로의 변형 등 우리를 둘러싸고 있는 환경이 다양화되어지고 있어 이에 대처한 쾌적한 환경에 관심이 기울어져야만 할 추세이

* 이 연구는 2005년 한국산업안전보건연구원의 연구지원으로 연구된 결과임

접수일 : 2006년 1월 19일, 채택일 : 2006년 3월 28일

† 교신저자 : 김정만 (부산시 서구 동대신동 3가1번지 동아대학교 예방의학교실

Tel : 051-240-2915, E-mail : jmkim2@daunet.donga.ac.kr)

다. 그러나 고층화되고 다양화된 건물의 외형에 비해서 사무실 공간으로 눈을 돌려보면 질적으로 많은 문제점을 내포하고 있는 실정이다. 다시 말해서 우리나라의 사무실 실내환경 수준은 매우 낙후되어 있는 실정이다.

현대인들의 실내생활 증가와 건축자재의 화학물질 사용 및 실내오염 물질 발생원 증가와 함께 환기부족 등으로 실내 공기오염이 심화되어 빌딩증후군 (Sick Building Syndrome: SBS), 복합화학물질과민증 (Multiple Chemical Sensitivity: MCS) 등의 신종 질병이 부각되면서 실내공기의 적정관리에 대한 요구가 급증하고 있다(김만구, 1997).

사무실에서 작업하는 근로자의 경우 사무실 공기오염에 따른 다양한 건강장해가 유발될 수 있다. 사무실 공기오염이 사무실 근로자들의 건강이상 증상에 실제적인 원인으로 작용하지 않는다 하여도 지출되는 의료비용, 빌딩조사비용, 그리고 수입손실이 미국의 경우 대략, 연간 47억불 정도 된다는 보고도 있다(Coultas 등, 1991). 이러한 비용 이외에도 실내환경질 저하가 근로자의 집중과 생산성을 저하시켜 근로자 12인당 하루 평균적으로 14분의 시간 손실을 가져온다는 보고도 있다(Jarnstorm 등 2003). 이 손실 비용을 회사 전체적으로 연간비용으로 계산한다면, 특히 전문적인 경우가 많은 사무직의 경우 우리가 일반적으로 상상하는 금액보다 훨씬 많이 늘어나게 될 것이다. 따라서 쾌적한 사무실 실내환경질 조성은 사무직 근로자의 건강장해를 예방하기 위한 목적도 있지만, 회사 생산성을 높여 경쟁력을 확보한다는 차원에서도 중요하다 할 수 있다. 이에 선진외국에서는 사무실환경의 공기질을 적절하게 유지 및 증진시키기 위한 규정의 필요성을 인식하여 국제노동기구에서는 빌딩(상업용 및 사무용) 위생에 관한 협약을 제정하였고, 일본에서는 노동안전위생법 사무소 위생기준규칙을 제정하였으며, 미국산업안전보건청에서는 실내공기질과 관련된 규정을 제안한 바 있다.

우리나라도 사무실 환경의 공기질 관리의 중요성을 인식하고 산업안전보건법의 개정을 추진하여 2002년 12월 30일에 개정법령(법률 6847호)을 공포하였다. 이에 따라 하위법령으로서 동법 시행령(2003. 6. 30), 시행규칙(2003. 7. 7) 및 산업보건기준에 관한 규칙(2003. 7. 12)의 개정작업을 2003년에 모두 완료함으로써 사무실 근로자의 건강을 위하여 산업보건기준에 관한 규칙에 '사무실 오염으로 인한 건강장해의 예방'을 신설하였고, 4개 물질(호흡성분진, 일산화탄소, 이산화탄소, 포름알데히드)에 대하여 사무실내 공기질 기준을 제시하고 있다.

그러나 현행 산업안전보건법상의 사무실 공기질 측정은 국내 실내환경질을 관리하고 있는 타법과는 달리 자율적인 측정관리체제로 되어있으며, 또한 실내공기질과 관련한 국내 타법 등에서 규정하고 있는 관리대상 인자가 산업안전보

건법에서는 제외되어 있는 항목이 있는 실정으로 현행 자율적인 사무실환경 측정체계의 측정제도 개선과 관리대상오염물질의 추가선정 등 사무실 공기질 관련 정책의 개선 및 정책 수립에 있어 과학적 자료를 제공하기 위한 체계적이며 종합적인 연구의 수행이 요구되어지고 있다.

환경중의 공기질 기준을 설정하는 방법에는 여러 가지 수단이 있을 수 있으나 최근 들어서는 위해성평가에 의한 방법이 보편적으로 제시되고 있으나 실내공기중의 오염물질에 대한 위해성평가에 대한 자료(이철민 등, 2004; 이철민과 김윤신, 2004; 김예신 등, 2005)가 있으나 위해성평가 자체만으로 연구한 것이 대부분이고 이를 이용하여 기준을 설정하고자 하는 경우는 현재 매우 부족한 실정이다.

본 연구는 노동부의 사무실 실내공기 오염물질 중 미규제 인자, 즉 이산화질소, 오존, 총휘발성유기화합물, 석면, 라돈에 대한 실태조사를 토대로 위해성평가 기법 또는 타당성 조사를 통하여 실내공기 오염물질의 관리항목의 확대에 대한 제안을 하는데 목적이 있다.

II. 연구내용 및 방법

1. 실태조사

실태조사는 2005년 8월부터 9월까지 2개월 동안 대·중·소도시에 위치한 사무실을 대상으로 현 노동부 산업안전보건법에서 규제하고 있는 오염물질(호흡성분진, 일산화탄소, 이산화탄소, 포름알데히드)를 제외한 미 규제오염물질 즉, 이산화질소, 오존, 총휘발성유기화합물, 석면, 라돈을 대상으로 환경부의 실내공기질 공정시험법(환경부, 2004)에 준용하여 실태조사를 수행하였으며, 또한 사무실내의 온열환경 조사를 위해 온도와 습도를 실시간으로 평가할 수 있는 디지털방식의 측정기(TSI, Model 8762, USA)를 사용하여 온열환경을 조사하였다.

다음의 표는 본 연구의 연구대상 사무실을 도시규모별, 건물의 년수별로 구분하여 제시한 것으로 대상사무실을 대도시, 중도시, 소도시 각각 10개씩 총 30개소의 사무실을 대상으로 실태조사를 수행하였으며, 대상 건물의 년수도 1년이하 11개소, 1-3년 사이 9개소, 3년이상 10개소로 구분하여 실태조사를 수행하였다.

2. 위해성평가

연구대상물질의 발암성 및 비발암성 용량-반응평가를 위한 발암성 독성자료인 단위위해도(unit risk)와 비발암성 독

성자료인 참고농도(RfC)의 자료는 US EPA의 IRIS(integrated risk information system)의 데이터베이스를 이용하였다. 각 연구대상물질은 US EPA의 분류 체계인 발암증거의 가중(weighting of evidence)에 따라 발암력을 분류하였으며, 단위위해도, 외삽방법, 암의 형태, NOAEL(no observed adverse effect level) 또는 LOAEL(lowest observed adverse effect level)로부터 유도된 참고농도 및 특정화학물에 이용될 수 있는 자료의 과학적 불확실성과 외삽할 때 발생하는 불확실성을 교정하기 위한 변형계수(MF)와 불확실성계수(UF) 등을 조사

하여 표 2와 표 3에 제시하였다.

실내공기오염물질의 흡입에 의한 건강위해성을 살펴보기 위한 필수적인 조건은 인구집단의 다양한 특성을 반영할 수 있는 노출계수(체중, 호흡율, 기대수명, 노출기간 및 노출빈도)를 활용한 노출량의 산정 및 노출시나리오의 작성이라 할 수 있다. 본 연구에서는 노출계수는 연구대상사무실에 근무하고 있는 사무직 근무자를 대상으로 자기기입식 설문조사를 통해 노출계수를 조사하였으며, 설문조사를 통해 산출할 수 없는 노출계수(호흡률 및 기대수명)은 US EPA 및 환경부

Table 1. The distribution of subject office

Item	Building year (yr)			
	Large city	Middle city	Small city	Total
<1	3	4	4	11
1 - 3	3	3	3	9
>3	4	3	3	10
Total	10	10	10	30

Table 2. The toxicological data of cancer material in VOCs

Material	EPA cancer class	Unit risk	Extrapolation	Type of cancer	Species	Route	Reference
Benzene	A	2.2×10^{-6} to 7.8×10^{-6}	Low-dose linearity utilizing maximum likelihood estimates	Leukemia	Humans	Inhalation	Rinsky et al., 1981, 1987; Paustenbach et al., 1993; Crump and Allen, 1984; Crump, 1992, 1994; U.S. EPA, 1998

Table 3. The toxicological data of non-cancer materials

Pollutant	EPA cancer class	Dose(mg/m ³)		UF	MF	RfC (mg/m ³)
		NOAEL	LOAEL			
Ethylbenzene	D	434	-	300	1	1
Styrene	C	94	94	30	1	1
Toluene	D	-	119	300	1	4×10^{-1}
m+p-Xylene	D	500	-	500	1	2.9×10^{-1}
o-Xylene	D	145	-	500	1	2.9

와 통계청 자료를 활용하였다. 위해성평가분석에서는 노출 변수 즉 입력 변수들의 불확실성과 가변성에 의해 결과 산출에 큰 차이를 나타낼 수 있다. 이에 본 연구에서는 변수의 가변성을 표현하기 위해 결정론적 위해성평가 과정에서는 CTE(central tendency exposure : mean or the 50th percentile) 위해도와 RME(reasonable maximum exposure : high-end) 위해도를 계산하여 제시하였다. 또한 불확실성과 가변성을 모두 고려

하기 위해 몬테카를로 분석을 통한 확률론적 위해성평가를 수행하여 그 평균값, 최대값, 최소값 및 25%, 50%, 75%, 90%, 95%, 100%의 값을 제시하였다.

다음의 표는 본 연구에 사용된 노출시나리오를 나타낸 것으로 각각의 노출계수에 대한 단일 값 및 확률분포를 제시하였다.

Table 4. Fixed assumptions and probability densities used as inputs to risk estimates in offices parameter

parameter		Unit	CTE	RME	Distribution type	Distribution parameters	Source
Body weight	Male	Kg	69	92	TR	Max : 95.8 Min : 53.5 Likeliest : 60.0	Questionnaire
	Female	Kg	52	60	TR	Max : 62.5 Min : 43.5 Likeliest : 49.0	Questionnaire
Exposure frequency	Male	min/day	452	660	TR	Max : 679.66 Min : 64.40 Likeliest : 600.00	Questionnaire
	Female	min/day	518	660	LN	Mean : 524.55 S.D. : 165.30	Questionnaire
Exposure duration	Male	year	30.5	50	TR	Max : 50 Min : 0 Likeliest : 30.5	Smith, 1994, NSO, 2001. Judgement
	Female	year	30.5	50	TR	Max : 50 Min : 0 Likeliest : 30.5	Smith, 1994, NSO, 2001. Judgement
Lifetime	Male	year	70	70	Point	70	EPA, 1997, MOE, 2001.
	Female	year	80	80	Point	80	EPA, 1997, MOE, 2001.
Inhalation rate	Male	m ³ /day	20	30	TR	Max : 46.32 Min : 12.96 Likeliest : 34.80	MOE, 2001. Adams.W.S., 1993 Judgement
	Female	m ³ /day	20	30	TR	Max : 66.24 Min : 10.32 Likeliest : 31.92	MOE, 2001. Adams.W.S., 1993 Judgement

TR : triangle distribution, LN : Lognormal distribtuion, S.D. : Standard deviation.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 사무실 실태조사 결과

1) 온열환경

실내환경의 기본적인 물리적 인자인 온도와 습도 수준을 파악함으로써 사무실 실내에서 여러 오염물질의 방출특성 및 거동을 파악하는 것은 중요하다고 할 수 있다. 특히, 휘발성유기화합물 및 포름알데히드의 방출과 관련성이 보고되고 있다.

사무실내 온열환경분포 중 온도는 26.5℃로 조사되었으며, 이는 보건복지부의 공중위생법에 명시된 공중이용시설의 실내환경기준 중 기온의 기준인 17 - 28℃를 초과하지 않는 것으로 조사되었다. 그러나, 최대값은 29.7℃으로 일부 사무실의 경우 기준을 초과하는 것으로 조사되었다.

조사된 습도 수준은 평균 54.4%로 보건복지부의 공중위생법의 기준인 상대습도에 관한 40 - 70%를 초과하지 않는 것으로 조사되었다. 그러나 일부 사무실에서는 72.0%로 실내

환경기준을 초과하였으며, 최저값은 27.4%로 일부 사무실에서는 실내환경기준에 미치지 못하는 습도 수준을 보이는 것으로 조사되었다. 또한 ASHRAE(1992)의 여름철 기준인 온도 23-26℃, 습도 50-60%을 적정하거나 일부 초과되는 양상을 보였다. 송세욱(2004)의 연구에 의하면 사무실 실내온도 분포는 23.9℃, 습도 35.8%로 본 연구보다 낮은 것으로 나타났다. 본 연구는 여름에 조사되었고 송세욱의 연구는 3월에서 6월사이에 실시하였으므로 계절별로 인한 차이로 해석할 수 있다.

2) 사무실 실내공기 중 가스상 오염물질의 농도분포

사무실 실내 공기중 일산화 질소의 평균농도는 0.0044 ppm로 조사되었다. 또한, 최대값의 경우에도 0.0130 ppm로 조사되었다. 실외 일산화질소의 경우, 평균0.0096 ppm로 조사되었으며, 실내외 농도비가 0.5로 실외의 일산화질소 농도가 실내의 일산화질소 농도보다 높게 조사되었다. 이는 실외의 자동차 배기가스등으로 인한 배출원으로부터 기인한 것으로 여겨진다.

Table 5. The characteristics of thermal environment in office building

	N	Mean	SD	Max.	Min.
Temperature(℃)	28	26.5	2.0	29.7	22.5
Relative Humidity(%)	28	54.4	10.9	72.0	27.4

n: number of data, SD: standard deviation, Max.: maximum Min.: minimum

Table 6. The concentration of gaseous pollutants in office indoor and outdoor air

unit: ppm

Pollutants	N	Mean	SD	Max	Min	p-Value	I/O ratio	
NO	Indoor	30	0.0044	0.0029	0.0130	0.0011	0.157	0.5
	Outdoor	4	0.0096	0.0065	0.0180	0.0026		
NO ₂	Indoor	30	0.0092	0.0048	0.0194	0.0021	0.266	0.6
	Outdoor	4	0.0145	0.0055	0.0220	0.0087		
NO _x	Indoor	30	0.0136	0.0065	0.0290	0.0038	0.206	0.6
	Outdoor	4	0.0245	0.0124	0.0410	0.0114		
O ₃	Indoor	30	0.0035	0.0025	0.0107	0.0005	0.006	0.6
	Outdoor	4	0.0059	0.0013	0.0068	0.0041		

I/O ratio: Indoor concentration / Outdoor concentration

이산화질소의 경우, 사무실내 평균농도는 0.0092 ppm로 조사되었으며 최대값이 0.0194 ppm로 환경부 “다중이용시설등의 실내공기질 관리법”의 이산화질소 기준인 0.05 ppm를 초과하지 않는 것으로 조사되었다(환경부 2004). 이는 가스렌지, 보일러, 흡연등의 이산화질소의 발생원이 사무실내에서 존재하지 않았기 때문인 것으로 판단되어진다. 실외 이산화질소의 평균 농도는 0.0145 ppm로 사무실내의 평균농도보다 높게 조사되었으며, 실내외 농도비는 0.6으로 조사되었다. 일산화질소의 경우와 같이 자동차배기가스등의 실외 배출원의 기여로 인한 결과로 여겨진다.

사무실내의 오존의 평균농도는 0.0035 ppm으로 환경부 “다중이용시설등의 실내공기질 관리법”의 오존 기준치인 0.06 ppm에 비해 낮은 농도 수준을 보이는 것으로 조사되었다. 실내외의 오존의 주 발생원으로 인쇄기 및 복사기 등의 고전원의 가전 및 사무제품으로부터 발생어지는 것으로 보고(한국실내공기산소연구회, 2004a)되고 있어 사무실의 실내

공기중 높은 오존농도분포를 나타낼 것으로 여겨지나 조사 결과 낮은 농도를 나타내 향후 조사대상 사무실의 물리적 기초자료 및 특성자료와의 연계분석을 통한 원인분석의 수행이 요구된다. 실내외 농도비가 0.6으로 실외의 오존 농도가 실내보다 높게 조사되었으며 실외 오존의 평균농도는 0.0059 ppm으로 조사되었다.

사무실의 실내공기 중 석면은 검출되지 않았으며, 라돈의 경우 평균 0.5 pCi/L로 조사되었다. 이는 환경부 “다중이용시설등의 실내공기질 관리법”에서 정하는 라돈의 기준농도인 4.0 pCi/L를 초과하지 않는 것으로 조사되었다. 또한, 최대값인 1.94 pCi/L 또한 환경부 기준치를 넘지 않는 수준으로 라돈의 경우 조사대상이었던 모든 사무실에서 기준치를 초과하지 않는 것으로 조사되었다.

- 3) 사무실 실내공기 중 휘발성유기화합물의 농도분포
사무실내 실내공기 중 총휘발성유기화합물의 평균농도는

Table 7. The concentration of nitrogen dioxide by city size and building year

unit: ppm

Building year (yr)	Large city		Middle city		Small city		Total	
	N	M ± SD	N	M ± SD	N	M ± SD	N	M ± SD
<1	3	0.0128 ± 0.0059	4	0.0122 ± 0.0026	4	0.0045 ± 0.0036	11	0.0096 ± 0.0054
1 - 3	3	0.0097 ± 0.0042	3	0.0093 ± 0.0014	3	0.0037 ± 0.0021	9	0.0076 ± 0.0038
>3	4	0.0132 ± 0.0058	3	0.0095 ± 0.0020	3	0.0073 ± 0.0043	10	0.0104 ± 0.0048

M ± SD: mean ± standard deviation

Table 8. The concentration of ozone by city size and building year

unit: ppm

Building year (yr)	Large city		Middle city		Small city		Total	
	N	M ± SD	N	M ± SD	N	M ± SD	N	M ± SD
<1	3	0.0021 ± 0.0011	4	0.0039 ± 0.0041	4	0.0041 ± 0.0045	11	0.0035 ± 0.0035
1 - 3	3	0.0045 ± 0.0019	3	0.0036 ± 0.0028	3	0.0037 ± 0.0029	9	0.0040 ± 0.0023
>3	4	0.0028 ± 0.0022	3	0.0023 ± 0.0009	3	0.0042 ± 0.0007	10	0.0031 ± 0.0016

423.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 환경부의 실내공기질 관리법인 “다중이용시설등의 실내공기질 관리법” 중 총휘발성유기화합물의 기준인 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하지 않는 것으로 조사되었다. 그러나, 사무실내의 중앙에서는 578.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 환경부 기준치를 초과하는 것으로 조사되었다. 이는 사무실내 환기부족으로 인한 실내 사무용품 및 건축자재로부터 방출되는 휘발성유기화합물이 사무실내 체류하기 때문인 것으로 여겨진다. 또한, 일부 연구에서 보고된 바와 같이 레이저프린터, 복사기등 전산사무용품의 사용 시 평상 시 보다 수배에서 수십배 많은 오염물질이 방출되고 있는것에 기인하는 것으로 판단되어진다(이엔에치, 2005).반면, 사무실 입구의 휘발성 유기화합물의 평균농도는 268.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 환경부 기준을 초과하지 않고 있으며 사무실 중앙부의 평균농도보다 낮은 농도 수준을 보이고 있다. 이는 출입구의 개폐에 따른 환기효과에 의한 것으로 여겨진다. 그러나, 사무실 중앙부와 입구의 농도차이는 통계적으로 유의한 차이를 보이지는 않고 있다. 일부사무실에서는 4000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 넘는 높은 수준의 총휘발성유기화합물이 검출되었으며, 이는 건물의 밀폐에 따른 환기부족과 높은 온열수준에 따른 화학물질의 휘발, 전산사무용품등의 과도한 사용으로부터 기인한 것으로 여겨진다(한국실내공기산소연구회, 2004b). 또한 노영만(2004)의 연구에 의하면 사무실 VOC의 농도는 698.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 것으로 조사되어 본연구보다 높은 값을 나타내었다. 조사시기도 동일하고 시료분석기관도 동일한 것으로 비교해 볼 때 본 연구보다 노영만의 연구가 높았던 것은 신축사무실 즉 1년이내의 사무실이 특히 높았던 것에 기인한다고 볼 수 있다. 또한, 개별 휘발성유기화합물의 경우는 일반적인 가정보다 높은 수준의 농도를 보이고 있다. 이에 정기적인 실태조사와 사무실의 물리화학적 특성에 기인하여 농도의 증가가 초래되었는가는 향후 사무실의 물리화학적 기초조사 자료와의 연계분석이 요구되어진다. 또한, 사무실 내 사용되어지는 사무용품 및 생활용품에 대한 방출실험을 통하여 실내환경에 오염물질의 방출특성 및 방출량을 파악하는 연구가 연계되어야 할 것으로 여겨진다.

벤젠의 경우, 중앙부의 평균농도가 7.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 입구의 3.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높게 조사되었다. 그러나, 통계적으로 유의한 차이를 보이지는 않고 있으며, 시료수의 빈약으로 인한 대표성 또한 유의하지 않다고 판단되어진다.

톨루엔의 경우, 평균 농도가 97.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었으나, 사무실 중앙부에서는 115.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 사무실 입구에서 조사된 81.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높은 농도수준을 보이고 있으며 통계적으로 유의한 차이를 보이고 있다. 또한, 일부 사무실에서는 863.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 높은 톨루엔의 농도분포가 조사되었다.

자일렌, m+p-자일렌, o-자일렌의 경우 역시 사무실 중앙부의 평균농도가 29.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 75.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 37.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 사무실 입구의 농도수준인 21.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 57.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 25.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높게 조사되었다. 그러나 세물질 모두에서 중앙부와 입구의 농도수준은 통계적으로 유의하지 않은 것으로 조사되었다.

스틸렌의 경우, 평균 61.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었으나 사무실 중앙부에서는 86.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도수준을 보인 반면 사무실 입구에서는 11.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었다. 그러나, 통계적으로 유의한 차이는 보이지 않고 있다.

에틸벤젠의 경우, 평균 28.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되었으나 사무실 중앙부에서는 34.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 입구의 22.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높게 조사되었다. 그러나, 각 측정지점에서의 결과는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 조사되었다.

핵산의 경우, 사무실내 실내공기 중 평균농도가 48.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되었다. 그러나, 사무실 중앙부의 평균농도가 63.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 사무실 입구의 평균농도수인 16.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높게 조사되었으나 두 결과값간 통계적으로 유의한 결과는 보이지 않고 있다.

기타 사무실의 물리화학적 특성에 기인하여 농도의 증가가 초래되었는가는 향후 사무실의 물리화학적 기초조사 자료와의 연계분석을 통한 규명이 요구된다.

2. 건강위해성 평가

Table 9. The concentration of radon by city size and building year

unit: ppm

Building year (yr)	Large city		Middle city		Small city		Total	
	N	M ± SD	N	M ± SD	N	M ± SD	N	M ± SD
<1	1	1.0	2	0.4 ± 0.4	2	0.3 ± 0.3	5	0.5 ± 0.4
1 - 3	1	0.2	2	0.3 ± 0.0	3	0.7 ± 0.2	6	0.5 ± 0.2
>3	2	0.6 ± 0.6	2	0.1 ± 0.0	1	1.9	5	0.7 ± 0.8

Table 10. The concentration of volatile organic compounds in office indoor air

unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$

VOCs	Sampling Point	N	Mean	SD	Max	Min	p-Value
TVOCs	Center	30	578.8	944.8	4258.4	7.3	0.006
	Enterence	30	268.4	300.7	1472.9	13.9	
	Total	60	423.6	712.5	4258.4	7.3	
Benzene	Center	5	7.4	5.1	16.0	3.2	
	Enterence	1	3.6	-	-	-	
	Total	6	6.8	4.8	16.0	3.2	
Toluene	Center	29	115.3	168.7	863.1	8.9	0.005
	Enterence	30	81.2	119.0	634.9	4.8	
	Total	59	97.9	145.3	863.1	4.8	
Xylene	Center	16	29.5	59.1	242.3	1.5	0.179
	Enterence	16	21.5	41.6	173.2	1.1	
	Total	32	25.5	50.4	242.3	1.1	
m+p-Xylene	Center	8	75.6	82.1	253.8	15.8	0.249
	Enterence	4	57.1	56.8	140.8	15.8	
	Total	4	94.1	107.6	253.8	26.1	
o-Xylene	Center	4	37.1	44.7	103.8	11.3	0.229
	Enterence	4	25.1	29.4	68.9	5.1	
	Total	8	31.1	35.6	103.8	5.1	
Styrene	Center	8	86.9	143.3	408.7	6.5	0.671
	Enterence	4	11.7	5.5	17.2	5.1	
	Total	12	61.8	120.2	408.7	5.1	
Ethyl benzene	Center	16	34.9	66.3	268.0	4.2	0.108
	Enterence	17	22.0	37.7	156.2	2.0	
	Total	33	28.3	53.0	268.0	2.0	
Hexane	Center	11	63.2	106.4	291.1	7.6	0.329
	Enterence	5	16.5	3.2	21.5	12.8	
	Total	16	48.6	89.7	291.1	7.6	

Table 11. The concentration of total volatile organic compounds by city size and building year

unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Building year (yr)	Large city		Middle city		Small city		Total	
	N	M \pm SD	N	M \pm SD	N	M \pm SD	N	M \pm SD
<1	6	157.2 \pm 157.2	8	865.8 \pm 698.3	8	464.7 \pm 922.6	22	526.7 \pm 734.5
1 - 3	6	817.7 \pm 1686.2	6	220.3 \pm 122.1	6	432.0 \pm 421.1	18	490.0 \pm 978.6
>3	8	441.0 \pm 348.3	6	124.5 \pm 110.8	6	122.1 \pm 86.0	20	250.4 \pm 274.5

1) 발암성 물질의 위해성평가

사무실내 실내공기중에서 검출된 물질 중 발암독성자료가 존재하는 벤젠을 대상으로 건강위해성평가를 수행하였다.

단일값을 이용한 결정론적 위해성평가 결과 중 노출계수의 평균값을 이용한 CTE 하에서는 남성과 여성의 경우 발암위해도가 각각 5.19×10^{-7} 과 8.69×10^{-7} 으로 산출되었다. 이 결과는 천만명에 5.19명과 8.69명이 암에 걸리수 있는 가능성을 제시하고 있으며, 이는 미국 환경보호청에서 제시하는 허용기준치인 1×10^{-6} 을 초과하지 않고 있다. 그러나, worst case 적용을 위한 95percentile 값을 이용한 RME하에서는 남성의 경우 4.86×10^{-6} , 여성의 경우 7.63×10^{-6} 으로 각각 미국 환경보호청의 기준을 초과하고 있는 것으로 조사되었다. 이철민등(2004)의 연구에 의하면 남성과 여성의 경우 발암위해도가 각각 8.9×10^{-6} 과 6.1×10^{-6} 으로 산출되어 본 연구결과와 유사한 결과를 보여주고 있고 이철민등의 연구는 사무실 실내환경에 대한 여러결과를 취합하여 산출한 결과이므로 본 연구의 결과보다는 신뢰도가 높다고 볼 수 있다. 그러나 서울시민을 대상으로 한 김예신등(2005)의 연구에서는 발암위해도가 5.54×10^{-7} 으로 본 연구보다 발암위해도가 낮은 것으로 나타나 사무실근무자에 대한 발암위해도가 높은 것을 알 수 있었다.

몬테카를로 분석을 이용한 확률론적 위해성평가 결과 중 남성의 발암위해도 평균은 7.45×10^{-7} 으로 허용기준치인 1×10^{-6} 을 초과하지 않고 있으나 여성의 발암위해도의 경우 3.10×10^{-6} 으로 기준치를 초과하고 있다. 이는 결정론적 위해성평가 결과에서도 CTE와 RME 상태하에서 모두 여성의 발암위해도가 높게 산출되고 있다. 그 이유는 같은 독성물질에 노출되었을때 노출되어지는 평생시간이 여성이 더 길며, 설문조사 결과 사무실에 거주하는 시간이 여성이 경우가 더 길게 조사되었다. 또한, 단위체중당 독성물질의 기여수준을 보면 평균체중이 작은 여성이 같은 농도에 노출되었을시 더 큰

위해도를 가지게 된다. 따라서, 최대값을 살펴보면, 여성의 경우 3.02×10^{-6} 이라는 높은 발암위해도가 산출되고 있다. 또한, percentile에 따른 발암위해도를 살펴보면 남성의 경우 90 percentile 이상에서 허용기준치를 초과하고 있는 것으로 조사되었으나, 여성의 경우 25 percentile 범위에서 이미 허용기준치를 초과하고 있다. 이 의미는 남성의 경우 약 10%정도가 발암위해영향에 노출이 되고있지만 여성의 경우 약 75% 이상이 발암위해영향에 노출되고 있는 것으로 여겨진다.

2) 비발암성 물질의 위해성평가

측정분석된 사무실 실내공기의 오염물질 중 인체 위해 영향을 평가할 수 있는 용량-반응 평가 자료가 존재하는 5개 물질을 대상으로 건강 위해성평가를 수행하였다. 비발암성 물질의 경우 위해도지수(HI)를 산출하여 기준치인 "1"의 초과여부를 파악함으로써 초과하였을 시 독성물질 고유의 유해인체 영향이 있는 것으로 판단한다.

비발암성물질의 위해성평가 결과, 각 노출변수의 평균값을 이용하여 위해도지수를 산정한 CTE하에서는 톨루엔, 에틸벤젠, m+p-자일렌, o-자일렌, 스틸렌의 위해도 지수가 남성의 경우 각각 0.024, 0.0028, 0.031, 0.001, 0.0055으로 조사되었으며 여성의 경우 각각 0.034, 0.004, 0.036, 0.0012, 0.0069으로 조사되어 각각의 비발암성물질에 의한 인체유해영향은 없는 것으로 판단되어진다. 또한, worst case 산출을 위해 95 percentile 값을 이용한 RME하에서도 모든 물질에서 위해도 지수의 인체유해영향의 판단기준인 "1"을 초과하지 않는 것으로 조사되었다.

몬테카를로 분석을 이용한 확률론적 위해성평가의 평균 위해도지수 또한 모든 물질에서 기준인 1을 초과하지 않는 것으로 조사되었다. 그러나, 위해성평가 결과의 톨루엔 최대값에 있어 남성의 경우 1.1과 여성의 경우 6.3으로 1을 초과하고 있으며 스틸렌의 위해도 지수중 여성의 위해도지수가

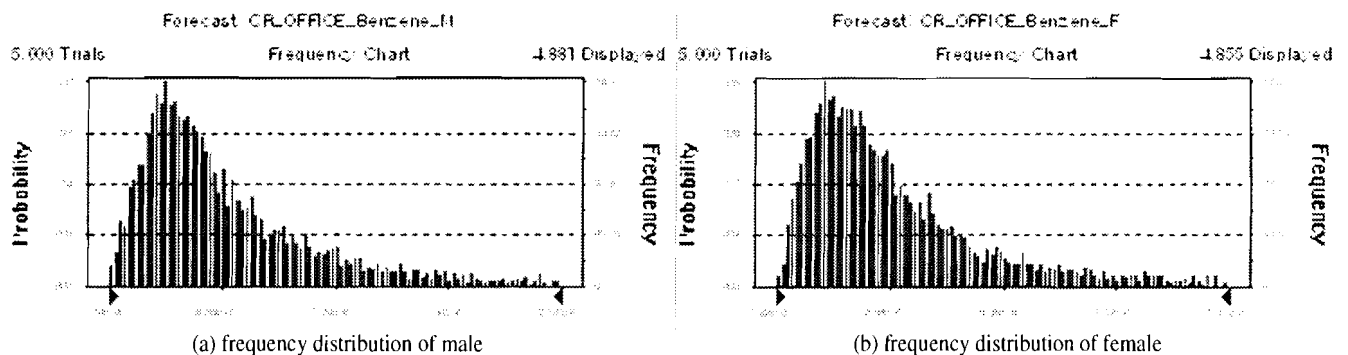


Fig. 1. The frequency distribution of cancer risk of benzene.

2.3으로 1을 초과하고 있다. 이는 최악의 경우 남성과 여성 모두 톨루엔에 의하여, 여성의 경우 스틸렌에 의하여 인체유해 영향을 받을수 있다.

톨루엔과 스틸렌의 경우를 제외하고 percentile 값에서도 위해도지수가 1을 초과하는 물질이 없는 것을 알 수 있다. 이는 톨루엔과 스틸렌을 제외하고 나머지 물질에 의한 인체유해 영향 가능성이 적다고 볼 수 있다.

3. 관리 확대항목 제안

1) 이산화질소 및 오존

이산화질소 및 오존은 환경부의 다중이용시설등의 실내공기질관리법에서 권고기준으로 제시되어 있는 물질로 각각의 기준치는 0.05 ppm이하와 0.06 ppm이하로 규정하고 있으나 산업보건기준에 관한 규칙에서는 이들 오염물질에 대해 규제하고 있지 않다. 본 연구의 실태조사 결과 이산화질소의 평균농도는 0.0092 ppm이었으며, 최대농도값은 0.0194 ppm으로 조사되어 환경부에서 제시하고 있는 이산화질소의 기준 값을 초과하지 않는 것으로 조사되었다. 오존의 경우는 실태조사 결과 평균농도가 0.0035 ppm, 최대농도값은 0.0107 ppm으로 기준치인 0.06 ppm을 초과하지 않는 것으로 조사되었다. 이와 같은 결과는 사무실 실내공기중의 이산화질소 및 오존의 농도가 낮은 농도로 존재하고 있음을 시사하는 결과라 할 수 있다.

그러나 오존의 실내 주 발생원으로는 인쇄기 및 복사기 등의 고전원의 가전 및 사무제품으로부터 발생되어지는 것으로 보고되고 있다. 사무실의 경우 인쇄기 및 복사기의 이용이 다른 시설에 비해 빈번한 시설이라는 특성을 고려할 때 이에 대한 기준치의 설정 및 관리가 요구되어진다. 고가의 복사기 또는 프린터의 신제품 사용시는 복사기 및 프린터에 오존 저감 활성탄장치가 제대로 작동되나 활성탄 장치를 교체하지 않을 경우 오존의 저감효과 떨어지게 되어 실내공기를 오염시키는 요인이 되기도 한다. 또한 이산화질소의 경우 오존의 전구물질이며 인체 독성이 이 역시 환경부에서 정하

는 기준치 이하의 농도를 나타냈으나 이에 대한 관리 역시 고려되어야 할 것으로 사료된다.

2) 석면 및 라돈

석면의 경우 본 연구의 연구대상 사무실 전체에서 검출되지 않았으며, 라돈의 경우는 0.5 pCi/L로 조사되었다. 이는 환경부에서 정하고 있는 석면 및 라돈의 기준치에 크게 미치지 못하는 농도로 사무실 실내공기중의 석면 및 라돈의 경우 크게 문제가 되지 않고 있음을 간접적으로 시사하는 결과라 할 수 있다.

석면의 경우 법적인 규제를 통해 최근 건축된 건물내 실내 공기중 큰 문제를 야기하지 않는 것으로 알려져 있으나 과거 건축된 건물의 노후화 등에 의해 실내공기중에 발생되어 거주자들이 이의 호흡으로 인한 건강상의 악영향을 야기하고 있는 것으로 알려져 있다. 특히 석면의 건강상의 악영향으로는 흡입으로 인한 폐암을 유발하는 발암물질로 잘 알려져 있다. 국내 사무실 건물의 특성을 고려할 때 노후화된 건축물이 다수 존재하고 있으므로 우선적으로 석면의 존재유무를 파악하고 석면이 존재한다면 주기적 관리방안이 제안되어야 한다.

미국 환경청에서는 라돈을 흡연 다음으로 제2의 폐암의 주요 원인으로 규정하고 있으며, 이에 대한 많은 홍보 책자 및 관리방안을 설정하고 있다. 그러나 우리나라의 경우는 이에 대한 인식이 매우 미약한 수준이며, 사무실의 실태조사결과 역시 미국 권고치 및 환경부의 권고기준인 4 pCi/L에 매우 미치지 못하는 농도를 나타낸 결과를 나타냈다. 그러나 라돈의 경우 토양에서 발생하는 자연방사능으로 반감기가 길어 실내에 잔류하며 그 농도가 증가할 가능성이 매우 높은 물질로 현대 건물의 단열화 및 밀폐화로 인한 그 중요성이 크게 증가되고 있는 물질임을 고려할 때 이에 대한 예방 차원의 관리기준 설정이 이루어지는 것 역시 고려되어야 할 것으로 사료된다.

3) 휘발성유기화합물

Table 12. Health risk assessment of benzene

Gender	Cancer risk											
	Point estimate					Probabilistic						
	CTE	RME	Mean	Max	Min	Percentiles						
					25	50	75	90	95	100		
Male	5.19E-07	4.80E-06	7.45E-07	1.05E-05	4.78E-09	3.28E-07	5.36E-07	9.27E-07	1.51E-06	2.01E-06	1.05E-05	
Female	8.69E-07	7.63E-06	3.10E-06	3.02E-05	1.22E-08	1.30E-06	2.21E-06	3.76E-06	6.44E-06	8.81E-06	3.02E-05	

CTE : central tendency exposure, RME : resonable maximum exposure

Table 13. Health Risk assessment of non-cancer materials

Gender	Pollutants	Hazard Index										
		Point estimate					Probabilistic					
		CTE	RME	Mean	Max	Min	25	50	75	90	95	100
Male	Toluene	2.4E-02	3.1E-01	3.5E-02	1.1E+00	1.3E-04	6.1E-03	1.4E-02	3.5E-02	8.3E-02	1.3E-01	1.1E+00
	Ethylbenzene	2.8E-03	3.1E-02	1.6E-03	6.9E-02	1.4E-06	2.7E-04	6.9E-04	1.7E-03	3.8E-03	6.1E-03	6.9E-02
	m/p-Xylene	3.1E-02	2.9E-01	1.1E-02	5.6E-01	2.8E-05	2.1E-03	5.1E-03	1.2E-02	2.6E-02	4.2E-02	5.6E-01
	o-Xylene	1.0E-03	1.2E-02	1.5E-03	2.0E-02	6.0E-06	3.2E-04	7.7E-04	1.8E-03	3.5E-03	5.2E-03	2.0E-02
	Styrene	5.5E-03	7.2E-02	7.3E-03	5.1E-01	1.1E-05	8.5E-04	2.4E-03	6.6E-03	1.7E-02	2.9E-02	5.1E-01
Female	Toluene	3.4E-02	4.2E-01	1.3E-01	6.3E+00	2.2E-04	2.1E-02	5.2E-02	1.3E-01	3.0E-01	4.9E-01	6.3E+00
	Ethylbenzene	4.0E-03	4.2E-02	1.1E-02	7.9E-01	3.7E-05	2.1E-03	5.1E-03	1.2E-02	2.6E-02	3.9E-02	7.9E-01
	m/p-Xylene	3.6E-02	3.2E-01	1.1E-01	2.5E+00	1.4E-03	2.6E-02	5.6E-02	1.3E-01	2.5E-01	3.7E-01	2.5E+00
	o-Xylene	1.2E-03	1.4E-02	7.3E-02	1.5E-05	9.3E-04	2.3E-03	5.3E-03	5.3E-03	1.5E-02	1.5E-02	7.3E-02
	Styrene	6.9E-03	8.8E-02	2.4E-02	2.3E+00	9.3E-06	2.6E-03	7.5E-03	2.1E-02	5.4E-02	9.7E-02	2.3E+00

CTE : central tendency exposure, RME : resonable maximum exposure

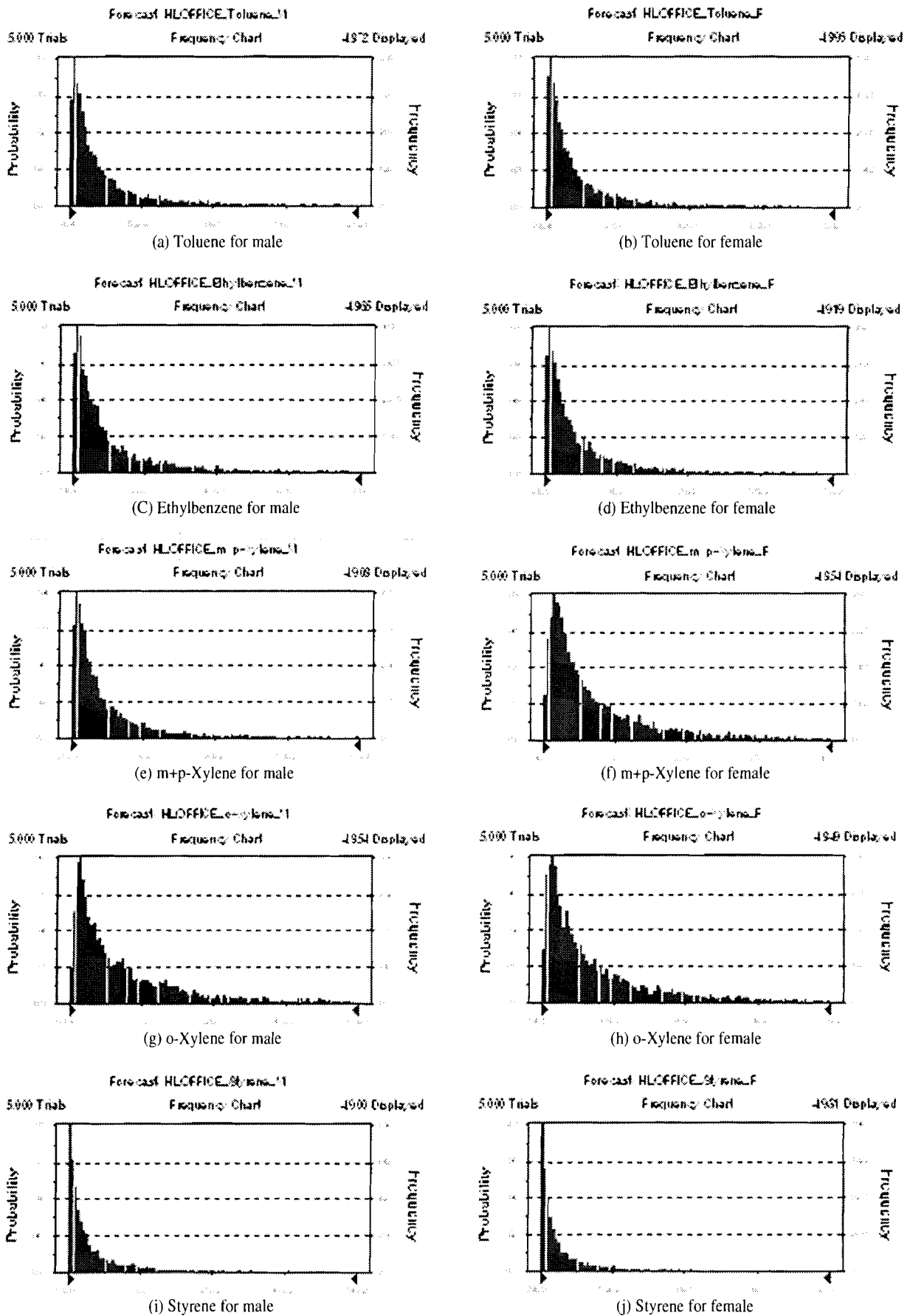


Fig. 2. Frequency distribution of risk in non-cancer materials.

최근 들어 새집증후군 및 복합화학물질 과민증 등의 원인 물질로 잘 알려진 휘발성유기화합물의 경우 다수의 발암물질이 존재하고 있어 인체에 유독한 물질로 그 중요성이 부각되고 있으며, 또한 비발암성물질의 경우 역시 호흡기 등을 자극하며, 피부질환을 유발하는 등의 건강상의 악영향을 유발하는 것으로 알려져 있다.

현재 실내에서 발견된 휘발성유기화합물의 종류만도 900여종 이상이고, 이중 250여종은 1 ppb 이상 검출되는 것으로 알려져 있으나 이들 개별 물질별로 측정하여 정량분석하는 것은 사실상 불가능하며 또한 인체 영향평가 역시 불가능하기 때문에 발견되어지는 모든 휘발성유기화합물 중 정성 및 정량이 가능한 물질 만을 개별 물질별로 정량하고 나머지 물질은 톨루엔 같은 기준물질로 농도를 환산한 후 이들 값을 합산하여 평가하는 개념의 총휘발성유기화합물의 평가방법을 사용하고 있다. 환경부에서는 이와 같은 개념을 도입하여 현재 다중이용시설의 실내공기질 관리에 있어 개별휘발성유기화합물의 관리보다는 총휘발성유기화합물의 관리를 수행하고 있다. 또한 동법에서 신축공동주택의 경우는 총휘발성유기화합물에 관한 관리뿐만 아니라 건강상 유해한 것으로 알려져 있는 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 1,4-디클로로벤젠, 스틸렌의 6종에 대해 관리기준을 설정하여 관리하고 있다.

본 연구의 실태조사 결과 사무실 실내공기질의 평균 총휘발성유기화합물의 농도는 $423.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 환경부의 관리기준인 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하지 않고 있으나 사무실 중앙부의 평균 총휘발성유기화합물의 농도는 $578.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 또한 신축1년 이내의 사무실에서는 총휘발성유기화합물의 농도가 환경부의 기준치를 초과하는 것으로 조사되었다.

또한 개별휘발성유기화합물의 경우 각 오염물질별로 조사된 자료를 바탕으로 건강위해성평가를 수행한 결과 발암물질인 벤젠의 경우 미국 환경청의 허용기준치인 1×10^{-6} 을 초과하지 않는 것으로 조사되었으며, 총휘발성유기화합물의 농도를 톨루엔으로 가정하여 비발암성 위해성평가를 수행한 결과 수용체를 남성으로 할 경우 사무실 중앙, 입구, 평균농도에서 모두 비발암성 건강위해도의 기준인 "1"을 초과하지 않는 것으로 조사되었다. 그러나, 최악의 경우를 모사하기 위하여 95 percentile 자료를 이용한 결과에서는 사무실 중앙에서 2.3, 평균에서 1.6으로 1을 초과하고 있으며, 이는 총휘발성유기화합물에 의하여 사무실 근로자의 건강유해 영향이 나타날 수 있는 가능성을 제시하고 있다.

반면, 여성 근로자의 경우 역시 일반 상황하에서는 총휘발성유기화합물에 의한 건강상 영향이 없는 것으로 조사되었으나, 95 percentile 자료를 이용한 최악의 시나리오 상황에서

는 사무실 평균이 2.2, 중앙 3.1, 입구 1.1로 모두 1을 초과하고 있으며 이로 인한 건강유해영향을 시사하고 있다.

개별휘발성유기화합물의 건강위해성평가 결과는 인체에 유해한 영향이 없는 것으로 조사되었으나 전체 휘발성유기화합물의 경우 유해성이 있음이 입증되었다.

이의 결과를 바탕으로 수백종의 휘발성유기화합물이 실내에 존재하고 있으며, 이중 인체 건강상 영향이 밝혀진 오염물질은 수중에 불과하다는 사실과 또한 정량 및 정성분석이 불가능한 물질 역시 존재하고 있음을 감안할 때 휘발성유기화합물의 관리가 요구되어진다. 또한 휘발성유기화합물의 경우 사무용품 및 건축자재로부터 방출되며 레이저프린터 및 복사기 등의 전산사무용품의 사용시 평상 시보다 수배에서 수백배 그 농도가 증가하는 것으로 알려져 있다. 이는 앞의 오존에서 언급한 것과 같이 프린터 및 복사기의 이용이 다른 시설에 비해 그 빈도가 높은 사무실의 경우 휘발성유기화합물의 관리가 이루어져야 함을 시사하는 결과라 할 수 있다. 뿐만아니라 휘발성유기화합물 역시 이산화질소와 같이 오존의 전구물질이며, 자체 독성이 높다는 특성 역시 휘발성유기화합물의 관리가 요구되는 특성으로 사료된다.

IV. 결론

산업보건기준에 관한 규칙에서 사무실실내환경 관리대상 물질로 지정하고 있지 않는 5개의 실내공기오염물질 즉 이산화질소, 오존, 석면, 라돈, 총휘발성유기화합물 및 개별물질을 대상으로 30개의 사무실 건물을 선정하여 실태조사를 실시하였고 위해성평가방법을 이용하여 관리대상인자의 추가선정여부를 조사하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

이산화질소, 오존, 라돈에 대한 측정결과 환경부의 실내공기 기준치 이하 인 것으로 도출되었지만 사무실에서 이산화질소, 오존, 라돈의 방출원이 외부뿐만 아니라 내부에서도 존재하므로 이에 대한 관리대책 및 저감방안이 요구된다.

신축사무실에서 총휘발성유기화합물의 농도는 기준치를 초과하였고 최악의 노출시나리오에서 위해성평가 결과가 "1"을 초과하였으므로 특히 신축사무실에 대한 건강위해성평가 결과를 바탕으로 한 건강기준 관리기준의 설정 및 기존 관리기준의 타당성 검토가 이루어져야 할 것이다.

현재 기술로서는 개별 휘발성유기화합물의 관리는 불가능한 것으로 여겨지며, 또한 개별 휘발성유기화합물의 관리에 있어 독성이 알려져 있지 않은 휘발성유기화합물의 관리가 이루어지지 않을 가능성이 있으므로 총휘발성유기화합물에 대한 관리방안의 설립이 이루어져야 할 것이며, 나아가 현재 까지 독성 및 건강상의 악영향이 높은 것으로 알려진 개별 휘발성유기화합물질에 대해 개별적 관리기준의 설정이 요구

되어진다.

REFERENCES

- 김동술, 김신도, 김윤신, 신응배, 이태정, 서울시 지하철역내 분진 오염원의 정량적 기여도의 결정, 대한환경공학회지 1994;16(3):309-319.
- 김만구, 박춘옥, 권영진, 이용근, 이대운, 왁스 청소기에 기인한 실내 공기 중 휘발성유기화합물 의 농도 변화, 한국 대기보전학회지 1997;13(3):221-229
- 김예신, 박화성, 이용진, 김영수, 양지연, 신동천, 서울일부지역에서 실내공기오염으로 인한 초과 발암위해도 및 사망손실비용 추정연구. 한국실내환경학회지2005;1(2):196-209
- 김윤신, 김동술, 이주형, 실내외 공기오염의 보건학적 영향에 관한 조사연구, 대한보건협회지 1991;17(1):90-96
- 김윤신, 이철민, 김현탁, Takao Iida, Alpha Track Detector 를 이용한 실내외 라돈 농도조사 에 관한 연구, 한국환경위생학회지 2002;28(5):71-76
- 남보현, 황인조, 김동술, 분산주성분 분석을 이용한 실내환경중 PM-10 오염의 패턴분류, 한국대기환경학회지 2002;18(1):25-37
- 노영만, 이철민, 김석원, 김치년, 김현욱, 조기홍, 최호춘, 강성호, 김정만, 사무실 내 실내공기질 특성 및 근무자 자각증상에 관한 연구, 한국산업위생학회지 2004;14(3):270-282
- 박정균, 윤재용, 다중공중이용시설의 실내환경관리수준과 영향요인의 분석, 환경관리학회지 2003;9(1):49-56
- 방선재, 이철민, 김윤신, 선우 영, 중앙집중식 냉방시설의 냉각탑수중 레지오넬라균과 실내 외 미생물 분포에 관한 연구, 한국환경위생학회지 2003;28(3):39-48
- 백성옥, 김영민, 도시지역에서의 실내외 주변공기 중 휘발성유기화합물의 농도측정에 관한 연구, 대한환경공학회지 1996;18(2):181-197
- 산업자원부, 실내 환경 중 특정유해 실내오염물질에 대한 측정/분석 기법의 개발, 2004.
- 송세욱, 사무실 공기질 오염실태조사 결과, 사무실오염으로 인한 건강장해 예방, 한국산업안전공단 (129-162쪽.)
- 신동천, 이효민, 김종만, 정용, 일부지역의 실내공기오염도와 건강에 미치는 영향에 관한 연구, 한국대기보전학회지 1990;6(1):73-84
- 신혜수, 김윤신, 허귀석, 실내외 공기중 휘발성유기화합물질(VOCs)의 농도조사에 관한 연구, 한국대기보전학회지 1993;9(4):310-319
- 이엔에치, 이엔에치컨설팅, available from URL: <http://www.enh.or.kr>
- 이운규 외, 실내공기환경 관련기준의 국제적 연구동향, 건설기술정보, 1999.
- 이지호, 박성은, 신동천, 실내 환경 중 aldehyde 분석과 다양한 실내구역에서의 농도 분포, 한국환경분석학회지 2000;3(2):117-128
- 이철민, 김윤신, 다중시설 내 실내공기오염물질의 연구동향 분석 및 건강위해성 평가에 관한 연구. 한국실내환경학회지 2004; 1(1): 39-60
- 이철민, 김윤신, 노영만, 김종철, 전형진, 이소담, 사무실실내오염물질에 노출에 의한 건강위해성평가. 한국산업위생학회지 2004; 14(3): 251-26
- 장성기, 이석조, 유승화, 정경미, 류정민, 전국 신축공동주택의 실내 공기질 실태, 한국 실내환경학회지 2004;1(1):12-24
- 통계청, 생활시간조사보고서, 제1권 생활시간량편, 2001.
- 한국대기환경학회, 실내공기질 관리 및 측정, 2003.
- 한국실내공기산소연구회, 실내공기와 건강, 신광문화사, 2004, (60-61쪽.)a
- 한국실내공기산소연구회, 실내공기와 건강, 신광문화사, 2004, (65-66쪽.)b
- 한화택 외, 쾌적한 실내공기환경의 역사, 공기청정기술 제13권 제1호, 2000.
- 환경부, 실내공기질 관리대책 연구, 2004.
- 환경부고시 제2004-80호 "실내공기질 공정시험방법", 2004.
- 환경부, 노출평가지침서, 2001.
- 황승만, 신주희, 정진욱, 박상곤, 백성옥, 흡연 및 비흡연 사무실의 실내공기질 비교 평가, 한국대기환경학회추계학술대회, 관동대학교 양양캠퍼스, 1999.
- Adams W.C. , Measurement of breathing rate and volume in routinely performed daily activities, final Report, California Air Resources Board(CARB) Contract No. A033-205, June 1993, 185
- ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning, Standard No 55-1992.
- Coultas, D.B., Lambet, W.E., Carbon monoxide. In: Sanet, J.M., Spengler, J.D. (Eds.), Indoor Air Pollution: A Health Perspective. Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD. 197-208, 1991.
- Jamstrom H. and Saarela K, The development of indoor air quality during the first year in new, residential buildings, proceedings of Healthy Buildings, 259-264, 2003
- EPA, Guiding principles for monte carlo analysis, EPA/630/R-97/001, 1-35, 1997.
- EPA, Indoor Air Pollution : An Introduction for Health Professionals, 1994.
- EPA, Risk assessment guidance for superfund(RAGS) : volume 00. human health evaluation manual(HHEM), Office of emergency and remedial response, EPA/540/1-89/002, 1989.
- Smith R, Use of Monte carlo simulation for human exposure assessment at a superfund site, Risk Analysis, 14(4), 433-439, 1994