

사무실 실내공기중 휘발성유기화합물의 기준설정에 관한 연구

김윤신¹ · 이철민^{1†} · 노영만¹ · 이소담¹ · 손종렬² · 김석원³

¹한양대학교 환경 및 산업의학연구소 · ²고려대학교 보건대학 · ³대한산업보건협회 산업보건환경연구원

A Study on the Standards of Volatile Organic Compounds in Indoor Air of Office

Yoon-Shin Kim¹ · Cheol-Min Lee^{1†} · Young-Man Roh¹ · So-Dam Lee¹
Jong-Ryeul Sohn² · Seok-Won Kim³

¹*Institute of Industrial and Environmental Medicine, Hanyang University*

²*Dept. of Environmental Health, College of Health Science, Korea University*

³*Korean Industrial Health Association, Institute of Occupational Environmental Health*

It is necessary to study and develop guidelines for providing comfort and health indoor air quality for office workers since air-tight envelope system of current office building may cause poor indoor air quality.

The purpose of this study is to propose guideline for volatile organic compounds in office base on the field study, human health risk assessment and cost-benefit analysis. The field study was conducted to survey the concentrations of volatile organic compounds in indoor air of 69 offices from June to September, 2005 in Seoul and Gyeonggi-do. The rate of excess to guideline of volatile organic compounds in indoor air of new apartment on the Ministry of Environment in Korea(MOE) was surveyed 37.6% for benzene, 6.8% for toluene, and 1.5% for ethylbenzene. As the result of human health risk assessment, mean cancer risk did not exceed 10^{-6} which is guideline of US.EPA. Also, total hazard index did not exceed 1 which is guideline of US.EPA. Through the cost-benefit analysis of angle on the social-economics to verify the necessary to establish the

standards of volatile organic compounds for improvement and development of indoor air quality in office, the present value of benefit was higher than the present value of cost. With the above considerations in mind, it is suggested that the field study for indoor air quality in offices should be expanded and human health risk assessment and cost-benefit analysis be performed to offer scientific data for decision-making of policy for improvement and management of indoor air quality in office.

Key Words : offices, volatile organic compounds(VOCs), risk assessment, cost-benefit analysis, standards, guideline

접수일 : 2006년 4월 16일, 채택일 : 2006년 12월 28일

† 교신저자 : 이철민 (서울시 성동구 행당동 17번지 한양대학교 환경 및 산업의학연구소,
Tel : 02-2220-1510, E-mail : spica@hanyang.ac.kr)

I. 서론

농업이 생산활동의 대부분을 차지하던 시대에는 인간의 주된 생활환경은 자연이었다. 그러나 산업구조의 변화에 따라 인간의 생활양식은 크게 변화하게 되었다. 산업화사회의 발전에 따라 밀폐된 건물 안에서 근무하는 환경이 많아진 것이다.

미국에서 수행된 거주자들의 실내 거주 시간 조사 결과 24 시간 중 건물 및 자동차 등의 실내에서 거주하는 시간이 약 95%인 것으로 보고되었으며(Robinson, 1995), 또한 환경부(2001)에서 전국 성인 838명을 대상으로 1일 활동 내역과 활동장소 및 실내에서의 거주시간을 조사한 결과 실내 거주 시간은 약 20.3시간이며, 교통수단(자동차, 버스, 지하철 등) 실내에서의 소요시간은 약 3시간으로 조사되어 건물 및 교통수단 등의 실내에서 거주하는 시간이 약 23.3시간으로 한국인의 경우 하루 중 약 97%의 시간을 실내에서 보내고 있는 것으로 조사되었다(환경부, 2001). 이와 같이 현대 산업화사회인들은 일상생활의 대부분의 시간을 여러 형태의 실내공간에서 생활하게 됨으로써 쾌적한 실내환경에 대한 인식이 새롭게 부각되기에 이르렀다.

실내공기질(Indoor Air Quality, IAQ)에 대한 문제의 발생 배경을 보면, 1970년대 이전 거주지역 및 비산업지역의 실내공기질에 관한 문제는 점차적으로 증가하였으나, 그 관심수준은 매우 미약한 실정이었다(Stowijk, 1992). 그러나 1970년대 이후 각종 산업분야에서 에너지 절감치 효율을 높이기 위한 노력의 일환으로 열효율 증대를 위한 건물의 밀폐화와 에너지 절감 장치를 설치하는 건물의 증가로 인하여, 이들 건물의 실내공기질이 악화되면서 실내공기질의 관리 및 건강위해성에 대한 관심이 발생되었다(NAS, 1993).

실내공기오염은 주택, 학교, 사무실, 공공건물, 병원, 지하시설물, 교통수단 등 다양한 실내공간의 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 있음에 틀림없다(Lee & Chang, 2000). 사무실에서의 이런 실내공기오염물질의 발생원으로는 인체에서 발생하는 것, 사람의 보행 등의 활동에 의한 피부 및 의복에서의 발진, 실내에서 연소기구, 사무기기를 포함한 각종 기구에서 발생하는 각종 건축자재에서 발행하는 유해가스 등이 있다. 이러한 유해가스들과 관련하여 일종의 증후군 현상을 띠는 빌딩관련 증후군에는 빌딩증후군(Sick Building Syndrome, SBS)과 복합화학물질과 민감증(Multiple Chemical Sensitivity, MCS) 등이 있으며(한국실내공기산소연구회, 2004), 이러한 새로운 증상이 보고되면서부터 본격적으로 관심을 갖게 되었다(Lende, 1980; Molbare,

1982, 김윤신 2003).

작업장내 화학적인자로 인한 공기오염은 주요 산업보건문제로 인식되어 이미 산업안전보건법 및 여러 정책으로 관리되고 있으나 사무실을 포함한 실내의 공기질에 관하여는 최근 사회적 관심증가로 인하여 새로운 산업보건문제로 부각되고 있다. 또한 기존에 관리대상이 되었던 화학적 인자 이외에 생물학적 인자 등 새로운 유해인자로 인한 업무상 질병자가 발생됨에 따라 이를 예방하기 위하여 산업안전보건법의 개정을 추진하여 2002년 12월 30일에 개정법률(법률 6847호)을 공포하였다. 이에 따라 하위 법령으로서 동법 시행령(2003. 6. 30), 시행규칙(2003. 7. 7) 및 산업보건기준에 관한 규칙(2003. 7. 12)의 개정작업을 2003년에 모두 완료하였다. 이와 같이 노동부는 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 인체에 유해한 실내오염물질로 알려져 있는 휘발성유기화합물에 대한 기준은 아직 제시되어 있지 않은 실정으로 이들 오염물질에 대한 사무실 공기질 관리에 대한 합리적 기준제시 및 이에 따른 공학적 처리기술의 목표 설정 수립과 같은 정책 결정에 있어 과학적 자료를 제공하기 위한 사무실 유해공기오염물질에 대한 관련 연구의 수행이 요구되어지고 있다.

이에 본 연구에서는 사무실 실내공기질의 휘발성유기화합물의 농도분포를 조사하고 이 자료를 바탕으로 건강위해성 평가 및 관리기준 설정에 따른 비용-편익분석을 수행하고 그 결과를 제시함으로써 향후 정부의 사무실 실내공기 중의 휘발성유기화합물 기준 설정 및 관리방안 수립에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구대상

본 연구는 2005년 6월부터 9월까지 수도권에 위치한 69개소의 사무실을 대상으로 사무실내 휘발성유기화합물의 농도를 조사하였다. 조사대상 휘발성유기화합물은 환경부의 '다중이용시설등의 실내공기질관리법' 중 신축공동주택을 대상으로 기준치가 제시되어 있는 5개 휘발성유기화합물(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌)을 선정하였다. 또한 연구 대상시설을 선정은 다음과 같은 기준에 따라 일반 사무직 근무자가 근무하는 사무실을 대상으로 선정하였으며, 이와 같은 기준에 따라 선정된 연구 대상시설의 현황은 표 1에

제시하였다.

첫째, 사무실 건설완공연도에 따라 1년 이하, 1년과 3년 사이, 3년 이상으로 구분하여 선정한다.

둘째, 사무실의 위치에 따라 지상 54개소와 지하 15개소로 나눈다.

셋째, 지상에 위치한 사무실에 대해 공기정화설비 가동여부에 따라 공기정화설비의 설치 및 가동 중인 사무실 45개소, 비설치 및 비가동 중인 사무실 9개로 나눈다.

2. 연구내용 및 방법

1) 실내 휘발성유기화합물 농도 조사

사무실내의 공기중 휘발성유기화합물의 농도는 환경부에서 제시하고 있는 실내공기질 공정시험방법(환경부, 2004)을 준용하여 연구대상 사무실의 입구와 중앙에서 각각 조사하였다.

휘발성유기화합물의 포집은 고체흡착법으로 Tenax-TA (60/80 mesh, Supelco, USA)가 200mg 이상 충전된 스테인

레스 흡착관(1/4inch×9cm, Perkinelmer, UK)을 이용하여 포집하였다. 포집에 사용된 펌프는 포집 전·후의 유량변동이 적은 Personal Air Sampler(Gilian, USA)를 사용하여 0.2 l/min으로 30분간 포집하였다. 또한 측정 전·후의 유량은 Digital Flowmeter(Alltech, USA)로 측정하여 총 흡인유량을 산출하였다. 이때 모든 측정에서 측정 전·후의 유량변화가 5%이내인 것으로 조사되었다. 측정이 끝난 시료에 대해서는 흡착튜브의 양끝을 Storage Cap으로 막고 4℃의 냉장고에서 분석전까지 보관하였으며, 측정 후 일주일 내에 분석을 수행하였다.

휘발성유기화합물의 분석은 Turbomatrix ATD(Perkinelmer, UK) 열탈착기와 가스크로마토그래피(GC-MSD, HP-6890, Agilent 5973 inert, USA)를 이용하였다. 분석에 사용된 컬럼은 RTX-1 (105m×0.32mm×3μm) 컬럼을 사용하였다.

2) 건강위해성평가

본 연구의 대상오염물질인 5개의 휘발성유기화합물의 위험성 확인 및 용량-반응평가는 US.EPA에서 제공하는 IRIS(integrated risk information system)의 데이터베이스를 이

Table 1. Classification of surveyed office

Time of completion	Above the ground		Basement	Total
	Mechanical ventilation system	Natural ventilation system		
< 1 year	15	3	5	23
1-3 years	15	3	5	23
> 3 years	15	3	5	23
Total	45	9	15	69

Table 2. Quantitative estimate of carcinogenic risk from inhalation exposure

Pollutant	EPA Classification	UR ((μg/m ³) ⁻¹)	Extrapolation Method	Route	Tumor type	RfD (mg/kg/day)	NOAEL LOAEL (mg/kg/day)	UF	UF	Reference
Benzene	A	8.3 × 10 ⁻⁶	one-hit	inhalation, occupational exposure	Leukemia	—	—	—	—	Finsky et al. 1982
Toluene	D	—	—	—	—	0.2	N:119 L:119	300	0	Foo et al. 1990
Ethylbenzene	D	—	—	—	—	0.1	N:434	300	1	Wolf.M.A et al. 1956
Xylene	D	—	—	—	—	0.2	N:500	500	1	Ubgvaru et al. 1980
Styrene	C	—	—	—	—	0.2	N:4	30	1	ACGIH 1986

UR : unit risk, RfD : reference Dose, 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

용하여 연구대상 오염물질의 발암성을 구분하였으며, 발암 잠재력과 참고치 등의 독성값등을 조사하였다. 또한 주어진 독성값은 본 연구에서 조사된 연구대상자의 체중과 호흡율을 고려하여 본 연구에 적합한 독성값을 산출하여 건강위해성평가를 수행하였다.

건강위해성평가지 기본적으로 필요한 노출계수인 나이, 체중, 노출기간, 노출빈도 등은 연구대상 사무실에 근무중인 사무직 근무자들을 대상으로 작업환경측정기관협의회에서 2004년 7월부터 9월까지 사무실 실내공기관련 제도의 제정을 위한 근거자료 제시를 위해 수행된 연구(노영만, 2004)에서 이용된 설문지를 활용한 자기기입식 설문조사를 통해 산출하여 활용하였으며, 호흡율은 현재 국내에 조사되어진 바가 없기 때문에 US.EPA(1997)에서 제시하고 있는 자료를 활용하여 국내 실정에 적합한 노출시나리오를 작성하였다.

조사된 독성값과 작성된 노출시나리오를 바탕으로 노출평가는 비발암성 휘발성유기화합물은 일일평균용량(average daily doses, ADDs)으로, 발암성 휘발성유기화합물은 평생일일평균용량(lifetime average daily doses, LADDs)를 산출하였

다. 일일평균용량 및 평생일일평균용량은 다음의 식에 의해 계산되었다.

$$\begin{aligned} \text{검} & \quad \times \quad \times \\ \bigcirc & \quad \times \quad \times \\ & \quad \times \quad \times \\ & \quad \times \end{aligned}$$

where
ADDs : average daily doses(mg/kg-day)
LADDs : lifetime average doses(mg/kg-day)
C : contaminant concentration in inhaled air($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
IR : inhalation rate(m^3/day)
ED : exposure duration(days)
BW : body weight(kg)
AT : averaging time(days)
LT : lifetime(days)

위해도결정은 발암성물질의 경우 본 연구 대상자의 노출 계수 자료를 고려한 독성값인 발암잠재력과 산출된 노출평가 결과인 LADDs 값을 곱하여 발암성 휘발성유기화합물의

Table 3. Exposure assumptions used inputs to risk estimates in offices

Parameter		Unit	CTE	RME
Body weight	Male	kg	57	57
	Female	kg	48.7	48.7
Exposure durtion (Average time)	Male	yr	30.5	50
	Female	yr	30.5	50
Exposure Frequency	Male	min/day	262.7	832.67
	Female	min/day	167.0	662.88
Life time	Male	yr	72.84	72.84
	Female	yr	80.01	80.01
Inhalation rate	Male	m^3/day	20	30
	Female	m^3/day	20	30

CTE : central tendency exposure, RME : reasonable maximum exposure

Table 4. Equipments affected by the influence of ventilation

Equipment	Hours of operation (hr/day)	Equipment	Hours of operation (hr/day)
Boiler	3	AHU	10
Heating changer	3	FPU	8
Ventilation Unit	10	Cooling package	8
Cooling tower	3	Fan	6
Air Conditioner	8	EHP	8
Hot and cold water Supply system	3	Others	6

위해도 지수인 발암위해도(cancer risk, CR)를 산출하였으며, 비발암성물질은 노출평가에서 산출된 ADDs와 독성값인 참고치의 비를 통해 위해도지수(hazard index, HI)를 산출하여 제시하였다.

3) 비용-편익분석

사무실 실내공기질 개선에 따른 사회적 편익을 구하는 과정은 결코 간단하지 않다. 기본적으로 비시장재인 실내 공기를 편익분석의 대상으로 하는 것은 물론 이에 대한 연구도 찾아보기 힘든 것이 현실이다. 편익 추정시 어떠한 연구방법을 사용하는 것이 가장 적절할 것인가에 대한 논의도 앞으로 중요한 과제라 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점 및 한계점을 인식하여 질병비용접근법을 사용하여 편익을 추정하였다. 질병비용 접근법은 사회적 편익의 하한을 산출하는 방법이라 할 수 있으나 다수의 실내공기 오염물질로 인한 질병발생의 상관성에 대한 연구자료의 불충분과 기존의 본 연구와 유사한 규제영향분석사례에서도 사용된 전례가 있음을 감안하여 본 방식을 채택하였다.

사무실 실내공기질 개선에 따른 비용 분석은 실내공기질 향상을 목적으로 건축물의 환기량 증가에 따른 설비비 및 운전비를 산정하여 제시하기위해 환경부의 신축공동주택의 휘발성유기화합물의 권고기준 유지시와 일본의 권고기준으로 강화된 휘발성유기화합물의 유지기준 시에 요구되는 시설투자비와 운전비(동력비, 유지관리비 등)를 산정하여 제시하였다. 또한 비용 분석 수행시 자료 수집의 한계점을 극복하기 위해 다음과 같은 가정을 수립하고 이에 준하여 비용 분석을 수행하였다. 가정은 다음과 같다. 첫째, 사무실 실내 휘발성유기화합물 기준 설정 시 환기량 변화를 예측할 목적으로 오염물질 중 벤젠과 톨루엔을 대상으로 하였으며, 이중 환기량의 증가가 큰 항목을 기준 오염물질로 하였다. 둘째, 일반적으로 주거용 건축물 및 사무용 건축물에 적용되는 공기조화설비들은 급기량을 100으로 하였을 경우, 재사용 70, 배기 30, 외기 30으로 운전되므로 본 연구에서도 동일 기준으로 삼았다. 셋째, 공기조화설비를 비롯한 본 연구의 대상시설에 적용되는 모든 설비들은 하절기 및 동절기를 구분하지 않고 계산하였으며, 환기량의 변화에 따른 변동요인이 있는 설비와 일일 운전시간은 표 4에 제시한 것과 같다고 가정하였다. 넷째, 환기량의 변화에 따른 변동요인이 전혀 없거나 거의 없는 설비는 비용산출 고려대상에서 제외하였다.

III. 결과

1. 사무실 공기 중 휘발성유기화합물의 농도분포

사무실 공기 중 휘발성유기화합물의 농도 조사는 각 조사 대상 사무실의 입구 부분과 중앙에서 이루어졌다. 그림 1은 공조시설이 설치된 사무실과 비공조 사무실 및 지하사무실 별 입구와 중앙에서 조사된 각 휘발성유기화합물의 농도를 나타낸 것이다.

공조시설이 설치된 사무실의 경우 벤젠, 톨루엔, 스티렌의 경우 중앙에서의 농도가 높은 것으로 조사된 반면, 에틸벤젠과 자일렌은 입구가 높은 것으로 조사되었으나 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($p>0.05$). 비공조시설 사무실과 지하시설 역시 공조시설이 설치된 사무실과 같이 벤젠, 톨루엔, 스티렌의 경우 사무실 중앙에서의 농도가, 에틸벤젠 및 자일렌의 경우 사무실 입구에서의 농도가 높은 것으로 조사되었으며, 에틸벤젠과 자일렌의 입구와 중앙의 농도차는 다른 오염물질에 비해 매우 작은 것으로 조사되었으나, 이 역시 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다($p>0.05$).

표 5는 조사대상 사무실을 건축완공연식 즉, 건축완공 후의 기간에 따라 1년 미만의 사무실, 1년에서 3년 사이의 사무실 및 3년 이상의 사무실로 구분하여 평균농도를 제시하였으며, 지상 사무실과 지하 사무실로 구분하였고 또한 지상 사무실의 경우 공조시설이 가동중인 사무실과 비가동중이거나 또는 공조시설이 설치되어있지 않은 사무실로 구분하여 각각의 특성에 따른 사무실 내의 휘발성유기화합물의 평균 농도를 제시하였다.

조사대상 사무실 내의 벤젠의 평균농도는 $43.0 \pm 76.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었으며, 완공이후의 기간에 따른 분류에서는 1년에서 3년이 된 사무실내의 평균농도($60.3 \pm 105.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)가 가장 높은 농도를 보였으며, 1년 미만의 사무실에서 가장 낮은 농도($23.5 \pm \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 나타냈다. 지상과 지하의 구분에 따른 사무실내의 평균농도는 지상 사무실($43.8 \pm 82.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 지하 사무실($39.8 \pm 48.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 높은 농도를 나타냈으며, 지상 사무실 중 공조시설이 비가동중이거나 설치되어 있지 않은 사무실의 농도($54.5 \pm 93.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)가 공조시설이 설치 가동중인 사무실($41.5 \pm 80.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 높은 평균농도를 나타냈다.

톨루엔의 사무실 내 평균농도는 $311.6 \pm 402.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었으며 건설완공이후 기간에 따른 분류에서는 1년 미만의 사무실($333.1 \pm 380.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서, 지상과 지하의 구분에서는 지하사무실($342.0 \pm 593.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이, 공조시설 설치 유무의 분류에서는 공조시설이 가동중인 사무실($320.3 \pm 366.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 가장 높은 평균농도를 보였다. 사무실 내의 에틸벤젠의 평균농도는 $39.8 \pm 68.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며, 건물연식의 분류에서는 1년에서 3년이된 사무실에서 가장 높은 평균농도($59.3 \pm 103.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 나타냈고, 지상 사무실($43.6 \pm 75.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 지

하 사무실($24.4 \pm 17.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 높은 농도를 나타냈다. 또한 공조기가 가동중인 사무실($46.9 \pm 81.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서의 농도가 비가동 사무실($27.7 \pm 27.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 높은 것으로 조사되었다.

자일렌은 평균농도가 $38.3 \pm 49.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되었으며, 건물 연식에 따른 분류는 1년에서 3년이 된 사무실에서 가장 높은 농도($45.1 \pm 67.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 보였으며, 지하 사무실($39.3 \pm 42.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 지상 사무실($38.8 \pm 38.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 높은 농도를 보였고, 공조기가 가동중인 사무실($38.5 \pm 51.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 비가동 사무실($35.7 \pm 47.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 높은 것으로 조사되었다.

환경부에서 제시하고 있는 신축공동주택의 실내공기중의 휘발성유기화합물의 기준치를 바탕으로 본 연구에서 조사된 사무실 공기중의 휘발성유기화합물의 농도의 기준치 초과율은 표 6과 같다.

벤젠의 경우 본 연구에서 조사된 125개의 사무실 중 기준치($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과한 농도를 나타낸 사무실의 수는 47개로 37.6% 가량이 기준치를 초과하고 있는 것으로 조사되었다. 건물연식에 따른 기준치 초과율은 1년 이상 3년 미만의 사무실이 가장 높은 45.2%를 나타냈으며, 지상에 위치한 사무실(37.0%)에 비해 지하에 위치한 사무실(40.0%)이 기준치를 초과하는 사무실이 많은 것으로 조사되었다. 또한 공조기가 설치되어 있지 않거나 가동되지 않는 사무실(38.9%)이 공조기가 가동 중인 사무실(36.6%)에 비해 높은 초과율을 나타냈다.

톨루엔은 전체 132개의 사무실 중 9개의 사무실 즉 6.8%의 사무실이 기준치($1,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 초과하고 있는 것으로 나타났으며, 벤젠과 같이 1년 이상 3년 미만의 사무실(13.6%)이 다른 시설에 비해 높은 초과율을 보였으며, 3년 이상의 사무

실에서는 기준치를 초과하는 사무실이 없는 것으로 조사되었다. 사무실의 위치에 따른 초과율 역시 벤젠과 같이 지하에 위치한 사무실(7.7%)이 지상에 위치한 사무실(6.6%)에 비해 높은 초과율을 나타냈다. 공조기 가동 여부에 따른 분류에서는 가동 중인 사무실에서 8.0%의 초과율을 보인 반면, 가동되지 않거나 설치되어 있지 않은 사무실에서는 기준치를 초과하는 사무실이 없는 것으로 조사되었다.

에틸벤젠은 전체 132개의 조사대상 사무실에서 2개의 사무실 즉 1.5%만이 기준치($360 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 초과하는 것으로 조사되었다. 건물연식에 따른 분류에서는 1년 이상 3년 미만인 사무실 중 2개의 사무실(4.5%)이 기준치를 초과하는 것으로 조사되었으며, 1년 미만과 3년 이상의 사무실 중 기준치를 초과하는 농도를 나타낸 사무실은 없는 것으로 조사되었다. 사무실 위치에 따른 분류에서는 지상에 위치한 사무실 중 2개의 사무실(1.9%)이 초과하는 것으로 조사되었고, 지하 사무실은 기준치를 초과한 사무실이 없는 것으로 조사되었다. 공조기의 가동 여부에 따른 분류에서는 가동중인 사무실 중 2개의 사무실(1.5%)이 기준치를 초과하였으며, 공조기가 비가동중이거나 설치되지 않은 사무실에서는 기준치를 초과한 사무실이 없는 것으로 조사되었다. 자일렌과 스티렌은 각각의 기준치가 $700 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 본 연구에서 조사된 사무실 중 이들 기준치를 초과한 농도를 나타낸 사무실은 없는 것으로 조사되었다.

스티렌의 평균농도는 19.2 ± 23.6 이었으며, 건물완충연도에 따른 분류에서는 1년에서 3년사이의 사무실($23.6 \pm 14.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 가장 높았고, 지하 사무실($21.7 \pm 27.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 지상 사무실($18.5 \pm 22.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 높았고, 공조기 가동 사무실($20.4 \pm 24.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 비가동 사무실($10.2 \pm 7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해

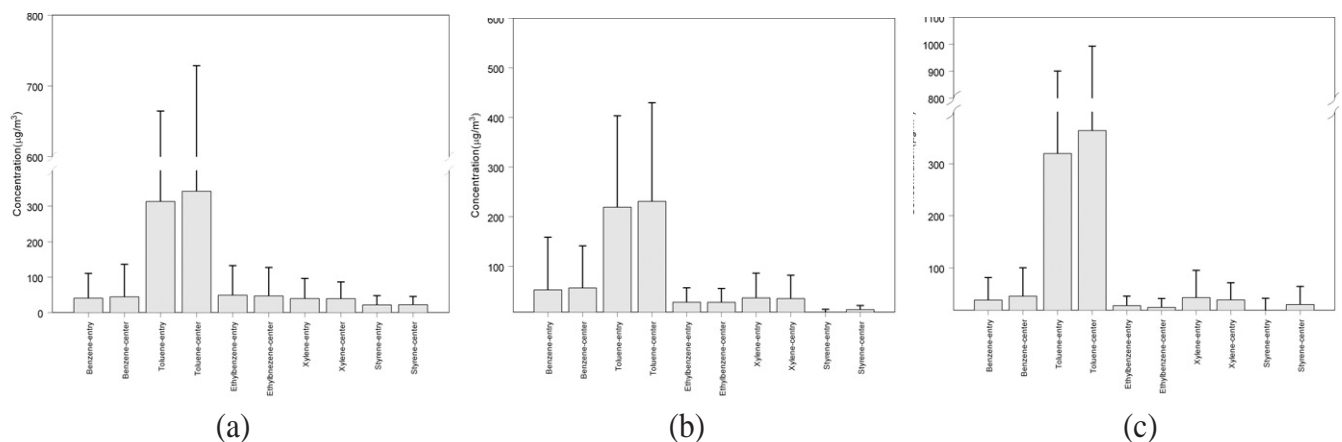


Fig. 1. Concentration of volatile organic compounds in the entry and the center in surveyed offices : (a) offices where the mechanical ventilation system is operated, (b) offices where the mechanical ventilation system is not operated. (c) basement offices

Table 5. The mean concentration of volatile organic compounds in surveyed office

(Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

VOCs	Period since constructed	Above the ground			Basement	Total
		Mechanical ventilation system	Natural ventilation system	Subtotal		
Benzene	< 1 year	27.1 \pm 39.1 (n=27)	11.4 \pm 8.4 (n=6)	24.2 \pm 36.0 (n=33)	20.2 \pm 21.7 (n=7)	23.5 \pm 33.7 (n=40)
	1-3 years	67.7 \pm 124.9 (n=28)	40.9 \pm 43.2 (n=6)	62.9 \pm 114.7 (n=34)	49.2 \pm 53.7 (n=8)	60.3 \pm 105.4 (n=42)
	> 3 years	28.6 \pm 37.2 (n=27)	111.2 \pm 146.3 (n=6)	43.7 \pm 74.3 (n=33)	46.0 \pm 57.2 (n=10)	44.2 \pm 70.0 (n=43)
	Subtotal	41.5 \pm 80.6 (n=82)	54.5 \pm 93.4 (n=18)	43.8 \pm 82.7 (n=100)	39.8 \pm 48.4 (n=25)	43.0 \pm 76.9 (n=125)
Toluene	< 1 year	404.5 \pm 434.3 (n=29)	180.6 \pm 145.9 (n=6)	366.1 \pm 407.2 (n=35)	188.7 \pm 189.2 (n=8)	333.1 \pm 380.9 (n=43)
	1-3 years	372.9 \pm 369.7 (n=30)	151.5 \pm 112.6 (n=6)	366.0 \pm 349.3 (n=36)	662.1 \pm 997.0 (n=8)	395.3 \pm 526.7 (n=44)
	> 3 years	181.6 \pm 238.6 (n=29)	343.0 \pm 241.4 (n=6)	209.2 \pm 243.5 (n=35)	208.5 \pm 210.2 (n=10)	209.1 \pm 234.2 (n=45)
	Subtotal	320.3 \pm 366.5 (n=88)	225.0 \pm 186.2 (n=18)	304.1 \pm 343.8 (n=106)	342.0 \pm 593.0 (n=26)	311.6 \pm 402.6 (n=132)
Ethyl-benzene	< 1 year	35.7 \pm 48.2 (n=29)	14.1 \pm 12.7 (n=6)	32.0 \pm 44.8 (n=35)	24.4 \pm 11.3 (n=8)	30.6 \pm 40.7 (n=43)
	1-3 years	75.8 \pm 121.7 (n=30)	21.0 \pm 15.8 (n=6)	66.7 \pm 112.9 (n=36)	26.0 \pm 19.7 (n=8)	59.3 \pm 103.4 (n=44)
	> 3 years	28.1 \pm 37.8 (n=29)	48.0 \pm 37.3 (n=6)	31.5 \pm 37.9 (n=35)	23.2 \pm 21.0 (n=10)	29.6 \pm 34.8 (n=45)
	Subtotal	46.9 \pm 81.2 (n=88)	27.7 \pm 27.5 (n=18)	43.6 \pm 75.1 (n=106)	24.4 \pm 17.5 (n=26)	39.8 \pm 68.1 (n=132)
Xylene	< 1 year	36.6 \pm 39.5 (n=29)	14.4 \pm 9.3 (n=6)	32.8 \pm 37.0 (n=35)	38.0 \pm 24.5 (n=7)	33.64 \pm 35.1 (n=42)
	1-3 years	47.9 \pm 76.0 (n=30)	15.2 \pm 11.2 (n=4)	42.5 \pm 70.4 (n=36)	57.0 \pm 51.5 (n=8)	45.1 \pm 67.0 (n=44)
	> 3 years	30.8 \pm 25.8 (n=29)	77.6 \pm 64.8 (n=6)	38.8 \pm 38.6 (n=35)	26.1 \pm 43.3 (n=10)	36.0 \pm 39.5 (n=45)
	Subtotal	38.5 \pm 51.9 (n=88)	35.7 \pm 47.2 (n=18)	38.1 \pm 50.9 (n=106)	39.3 \pm 42.5 (n=25)	38.3 \pm 49.3 (n=131)
Styrene	< 1 year	15.4 \pm 18.1 (n=22)	6.7 \pm 4.7 (n=6)	13.5 \pm 16.5 (n=28)	15.1 \pm 12.1 (n=7)	13.8 \pm 15.6 (n=35)
	1-3 years	32.7 \pm 33.9 (n=21)	14.2 \pm 5.0 (n=4)	29.7 \pm 31.7 (n=25)	33.0 \pm 40.3 (n=6)	30.4 \pm 32.8 (n=31)
	> 3 years	12.6 \pm 10.1 (n=19)	77.6 \pm 64.8 (n=4)	12.4 \pm 10.1 (n=23)	18.3 \pm 26.9 (n=6)	13.6 \pm 14.7 (n=29)
	Subtotal	20.4 \pm 24.5 (n=62)	10.2 \pm 7.5 (n=4)	21.7 \pm 27.6 (n=19)	21.7 \pm 27.6 (n=19)	19.2 \pm 23.6 (n=95)

높은 것으로 조사되었다.

2. 건강위해성평가 결과

연구대상시설 사무실의 사무직 근무자들의 건강위해성평가를 수행하기 위해 이들 사무직 근무자 290명을 대상으로

자기기입식 방법을 이용한 설문조사를 통해 노출계수를 산출하였다. 본 연구 대상자의 남녀 구성비는 남성은 64.14% (186명), 여성은 35.86% (104)명으로 조사되었으며, 평균연령은 31.9세로 남성은 33.8세, 여성 28.5세로 조사되었다. 이는 우리나라에서 일반적으로 나타나는 남성의 사회진출 나이가 늦어지게 되는 것에 따른 영향으로 남성의 평균 연령이 높게 조사된 것으로 여겨진다. 평균체중은 남성은 71.3kg,

Table 6. Percentage of number exceeding Standard levels proposed in MOE

VOCs	Period since constructed			Situation		Ventilation System		Total
	< 1year	1-3 years	>3 years	Above the ground	Basement	Mechanical ventilation system	Natural ventilation system	
Benzene	27.5 (11/40)	45.2 (19/42)	39.5 (17/43)	37.0 (37/100)	40.0 (10/25)	36.6 (30/82)	38.9 (7/18)	37.6 (47/125)
Toluene	7.0 (3/43)	13.6 (6/44)	—	6.6 (7/106)	7.7 (2/46)	8.0 (7/88)	—	6.8 (9/132)
Ethylbenzene	—	4.5 (2/44)	—	1.9 (2/106)	—	2.3 (2/88)	—	1.5
Xylene	—	—	—	—	—	—	—	—
Styrene	—	—	—	—	—	—	—	—

* :%(Number exceeding Standard level in MOE/number of collected samples)

Table 7. Cancer risk for carcinogenic volatile organic compound in offices

Pollutant	Sex	Cancer risk		
		Mean	Max	Min
Benzene	Male	3.9E-06	7.6E-05	2.8E-09
	Female	5.9E-06	9.1E-05	3.4E-00

Table 8. Hazard index for non-carcinogenic volatile organic compounds in offices

Pollutant	Sex	Hazard index		
		Mean	Max	Min
Toluene	Male	2.1E-01	1.6E+00	8.1E-04
	Female	3.1E-01	2.3E+00	1.2E-03
Ethylbenzene	Male	1.1E-02	1.1E-01	1.6E-04
	Female	1.6E-02	1.7E-01	2.4E-04
Xylene	Male	1.0E-01	8.9E-01	8.1E-05
	Female	1.5E-01	1.3E+00	1.2E-04
Styrene	Male	5.1E-03	3.2E-02	8.1E-05
	Female	6.0E-03	3.8E-02	1.2E-04
Total hazard index	Male	3.3E-01	2.6E+00	1.1E-03
	Female	4.8E-01	3.8E+00	1.7E-03

여성은 61.2kg으로 약 10kg의 차이를 나타냈다. 연중 총 근무 일수는 남성과 여성 각각 279일로 차이가 없는 것으로 조사 되었으며, 일중 근무시간 중 사무실 체류 시간은 남성은 8.6 시간 여성은 9시간으로 여성 근로자가 더 많은 시간을 사무 실에 체류하는 것으로 조사되었다. 이는 남성 근무자의 경우 외부 출장 등의 업무가 여성 근무자들에 비해 많은 것에 기 인한 결과로 여겨진다.

표 7과 8은 사무실내 휘발성유기화합물의 농도 조사 및 노 출계수 조사 결과를 바탕으로 수행된 사무직 근로자들의 위

해성평가 결과를 나타낸 것으로 발암성물질인 Benzene의 흡 입으로 인한 평균 발암위해도는 남녀 각각 3.9×10^{-6} , 5.9×10^{-6} 으로 조사되어 US, EPA에서 제시하고 있는 위해도 권고 치($10^{-6} \sim 10^{-4}$) 보다 낮은 것으로 조사되었으나 최대 발암위 해도의 경우 남녀 각각 7.6×10^{-5} , 9.1×10^{-5} 로 권고치는 초과 하지 않았으나 권고치의 하한값(1×10^{-6})보다는 높은 위해 도를 나타내 이에 대한 관리가 요구되어지는 것으로 조사되 었다. 또한 비발암위해물질인 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 및 스티렌의 평균위해도지수 역시 모두 US, EPA의 권고치(1)를

Table 9. Method of computation for present value of benefit

Item	Method of computation	Value
Mean prevalence		0.4165%
Benefit per year	$(\text{₩}32,179,423 + \text{₩}128,717,690) \times (60 \text{ persons} \times 91,544 \text{ offices}) \times 36.7\%$	₩1,305,600,000,000
Present value of benefit	$\text{₩}1,305,600,000,000 \times (1 + 0.075)^{-i}$	₩9,527,900,000,000

Table 10. Estimation of standard electrical charge

Use of electric power	Type of electric power	electrical charge per season (won/kWh)			Mean electrical charge(won/kWh)
		Summer	Spring/Fall	Winter	
General electric power	Low tension	91. ³⁰	61. ⁰⁰	64. ⁹⁰	68. ⁰⁵
	High tension(A)	91. ³⁰	60. ⁸⁰	67. ⁹³	67. ⁹³
Industrial electric power	Low tension	63. ⁸⁰	48. ¹⁰	51. ⁹⁰	52. ⁶²
	High tension(A)	63. ⁵⁰	48. ⁰⁰	51. ⁹⁰	52. ²⁸
Standard electrical charge					60. ²²

Table 11. The rate of increase for cost of equipment and maintenance

Equipment	Cost of equipment		Cost of maintenance	
	Before	After	Before	After
Boiler	53,000	57,400	48,294	70,488
Heating changer	100,900	129,600	22,741	33,246
Ventilation Unit	11,500	15,000	495	725
Cooling tower	5,520	5,980	990	1,450
Air conditioner	39,000	48,400	300	520
Hot and cold water supply system	1,590	1,950	19	28
AHU	127,55	156,498	36,266	49,906
FPU	20,030	27,010	1,892	2,795
Cooling package	78,500	92,500	3,351	5,655
Fan	35,372	46,143	13,801	21,424
EHP	65,246	70,966	40,800	59,586
Personal expenses	-	-	80,731	97,717
expendable supplies	-	-	43,057	52,116
Sum	538,20	651,447	292,737	395,656
rate of increase		21.04		35.16%

초과하지 않는 것으로 조사되었으나, 최대노출의 경우 톨루엔에서 남여 모두와 자일렌에서 여성의 경우 권고치를 초과하는 것으로 조사되었으며, 이들 비발암성 휘발성유기화합물의 평균 통합위해도지수 역시 1을 초과하지 않았으나 최대노출의 경우 남여 모두에서 1을 초과하고 있는 것으로 조사되었다.

(3) 비용-편익분석 결과

① 편익분석

사무실 실내공기질 개선에 따른 사회적 편익을 구하는 과정은 기본적으로 비시장재인 실내 공기를 편익분석의 대상으로 하는 것은 물론, 이에 대한 기존 연구도 찾아보기 힘든 것이 현실이다. 이에 편익추정시 어떠한 연구 방법을 사용하는 것이 가장 적절할 것인가에 대한 논의는 중요하다 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 이러한 문제점 및 한계점을 인식하고 다음과 같은 주요한 가정들을 선정하고 이를 전제로 편익을 추정하였다.

본 연구에서 편익분석을 수행하는데 설정된 가정은 첫째, 질병비용 접근법을 사용하여 편익을 추정한다. 둘째, 실내공기질이 개선될 경우 질병률의 감소는 물론 쾌적성 증가로 인한 건강개선 및 생산성 증가 등도 중요한 편익 항목이 될 수 있으나, 본 연구에서는 이러한 항목들에 대한 계량적 편익추정을 직접적으로 포함시키기에는 많은 제한성이 있어 한국 산업안전공단(2004)에서 추정된 질병률 값을 사용함으로써 질병률의 범위를 보다 확장하여 사용한다. 셋째, 분석기간은 10년으로 한다. 즉, 정부의 실내공기질 기준이 강화될 경우 이는 향후 지속적으로 유지, 혹은 보다 강화되는 방향으로 갈 가능성이 매우 높다고 할 수 있다. 또한 공기질의 경우 급성 질환에 미치는 영향은 물론, 만성적 질병에도 영향을 미치게 된다. 따라서 10년의 기간을 분석대상으로 하여 편익과 비용을 분석하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 넷째, 기준선(baseline) 설정시 모형을 단순화하여 규제 대상이 되는 빌딩 수나 해당 빌딩에서 근무하는 근무자의 수는 일정하다고 가정한다. 다섯째, 공기정화시설을 갖춘 건축물 면적이 3,000m² 이상이라고 가정하고 또한 이들 신규 실내공기질 규제대상건물은 91,544개소로 추정한다. 여섯째, 현재가치 계산시 사용되는 할인율은 사무실 실내공기질 개선사업에 의한 국민건강 개선효과라고 하는 공공적 목적을 감안할 때 공공투자의 경제성 평가에서 주로 사용되는 연 7.5%를 적용한다. 여섯째, 본 연구를 통해 사무실별 휘발성유기화합물의 농도 조사 결과, 톨루엔이 대표 오염물질로 추정된다. 즉 톨루엔 농도를 저감하기 위한 환기시설을 추가 설치, 가동할 경우 기타 휘발성유기화합물 농도 또한 동시에 저감되는 것으로 간주한다. 일곱째, 톨루엔의 기준치 적용시 국내 환경부에

서 제시하는 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다는 더 강화된 일본의 기준인 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 적용한다. 또한 사무실 근무자의 경우 입구 보다는 사무실 중앙을 중심으로 대부분의 시간을 보낸다는 사실을 감안하여 사무실 중앙을 기준으로 기준치를 초과한 비율(36.7%)을 3,000m²이상의 건물 전체로 확장하여 적용한다. 여덟째, 개별 휘발성유기오염물질 노출에 따른 직업성 질환의 발병률에 대해서는 ‘산업안전보건법령 개정안중 주요규제 신설에 따른 규제영향분석’에서 제시한 휘발성유기화합물별 발병률 추정결과를 활용한다. 아홉째, 직업병 발생에 따른 1인당 직접손실액 및 간접손실액은 각각 32,179,423원과 128,717,690원으로 계산되었으며, 이때 간접손실액은 하인리히 방식으로 계산하여 직접손실액의 4배로 추정하였다. 열번째, 3,000m²이상의 건물에서 근무하는 근로자 수에 대한 통계가 사회적 편익을 구하는 과정에서 필요하다. 공식통계가 전무한 실정을 감안하여 건물 공실률 등을 감안하여 1인당 면적 50m²로 계산하여 총 3,000m² 건물에 근무하는 근무자 수는 60명으로 추산한다.

이와 같은 가정을 바탕으로 연간 편익의 산출은 각 물질에 의해 발생한 직업성질환에 따른 직간접손실액에 직업성질환의 발생률을 곱하고 여기에 정부규제 대상인 3,000m² 이상의 건물에서 근무하는 근무자수 중 규제대상인 건물에 근무하는 비율을 곱하여 계산하였다.

한국산업안전공단(2004)의 유해인자별 발생률 추정치에서 제시된 유해물질별 최소 및 최대 직업병자 발병률은 각각 28/94,735 (0.030%), 761/94,735 (0.803%)로 조사되었다. 따라서 10년간 발생하는 총편익의 현재가치는 최소, 최대 직업병자 발생률의 평균을 구하고 여기에 발병에 따른 직간접손실액, 3,000m²이상의 건물에 근무하는 해당 근로자수, 실제 기준강화에 따른 접촉 대상인 건물의 비율 즉 톨루엔 기준의 36.7%를 곱하여 산출하였으며, 최종적으로 7.5%의 할인율을 고려하여 최종적으로 휘발성유기화합물의 저감에 따른 총편익의 현재가치액을 산출하였다. 이와 같은 연산을 통해 최종적으로 산출된 연간편익은 13,056억원이었으며, 또한 이 기준이 향후 10년간 유지된다고 했을 때 기존의 3,000이상의 면적을 가진 모든 사무실 건물에서 발생하는 사회적 편익의 현재가치는 95,279억원으로 추정되었다. 다음의 표는 휘발성유기화합물의 편익산출과정을 나타낸 것이다.

② 비용분석

비용분석은 환경부에서 제시하고 있는 건축공동주택 대상의 휘발성유기화합물의 기준에서 일본의 권고기준으로 강화될 때 요구되는 시설투자비와 운전비(동력비, 유지관리비 등)를 산정하여 제시하였다. 비용 산정에 있어 설비의 초기 투자비는 적합한 용량 및 규격에 따르며 사단법인 한국물가

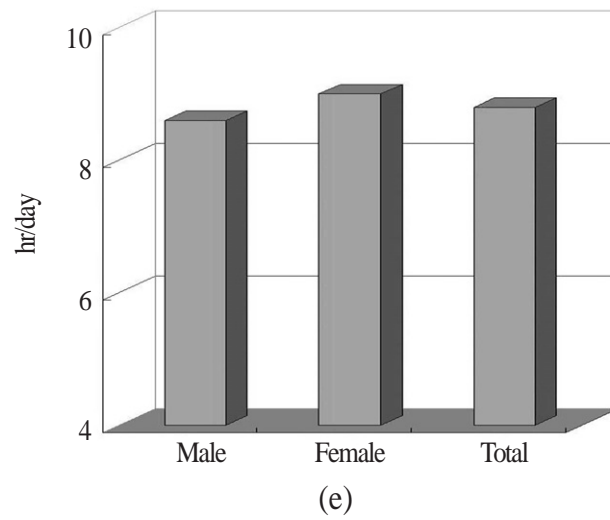
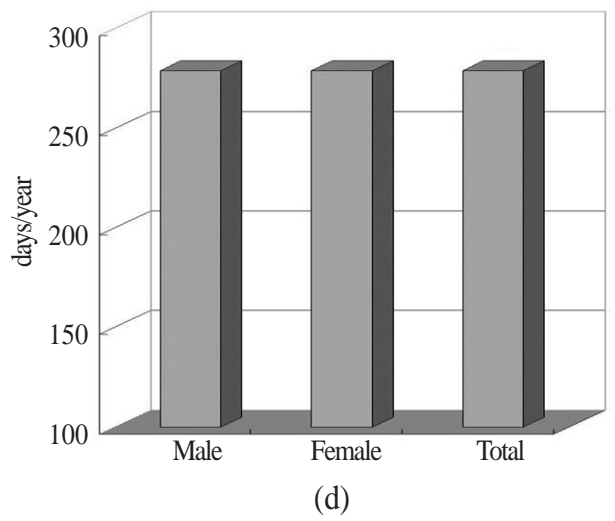
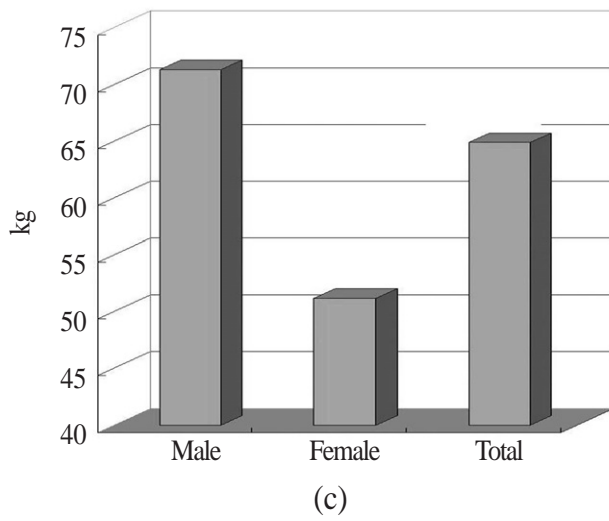
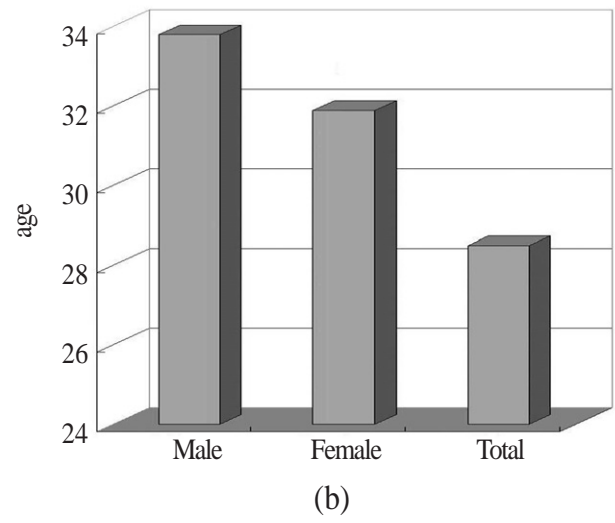
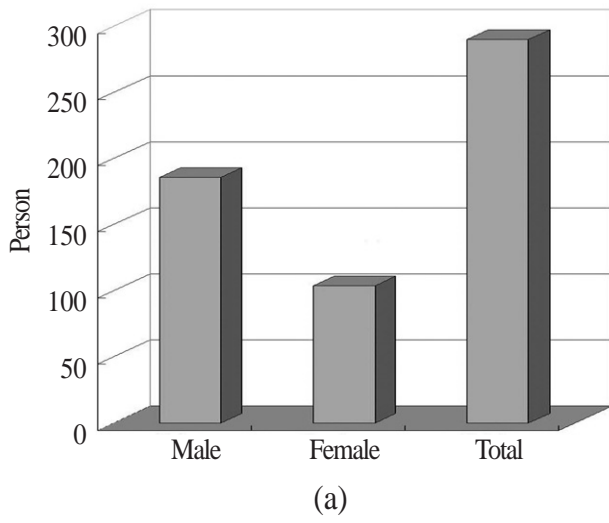


Fig . 2. The level of exposure factors on workers in surveyed offices : (a) sex, (b) age, (c) weight, (d) working days, (e) working hours.

정보의 인쇄판 또는 Web-site에서 제공되는 정보를 근거로 하였으며, 정격의 표준용량과 부합되지 아니한 항목은 동등 이상의 상위제품으로 하였으며 이에도 부합되지 않거나 부적절한 경우는 동등의 생산업체의 자료를 사용하였다. 전력량의 계산은 연간 소요운전비를 산정하였으며, 한국전력에서 고시하는 전기요금체계에 준하였고 기본요금은 산정에서 제외하였다. 사무용 건축물에 적합한 한국전력의 전기요금 체계는 전력의 용도별 분류로는 일반용 전력(저압전력 1,000kW 미만)과 산업용 전력(갑종, 계약전력 300kW 미만)을 대상으로 하였다. 전력의 종류로는 저압전력(110~380V)과 고압 A형 전력(3,300~66,000V)을 택하여 평균요금으로 산정하였다. 전력의 용도별, 종류별 평균요금은 계절별 기간을 가중치로 하여 계산하였다. 가스요금은 한국가스공사에서 적용하는 산업용가스(LNG)의 단가를 적용하였다. 이와 같은 기준에 따라 산정된 전기요금은 다음 표와 같다.

환기량 변동률은 실측된 자료 중 보편 타당한 자료만을 Pivot하기 위해 오염물질의 하한농도는 기준 대기농도 이상이며 상한농도는 벤젠의 경우 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 톨루엔의 경우 $1,000\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 자료만 대상으로 하였다.

환기량 계산은 평균 벤젠농도가 $20.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 대기 중의 기준농도가 $4.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이므로 실내에서 발생하는 원가스량(X)는 다음과 같이 계산하였다.

$$0.3 \times 4.2\mu\text{g}/\text{m}^3 + 0.7 \times 20.4\mu\text{g}/\text{m}^3 = 20.4\mu\text{g}/\text{m}^3 - X \\ X = 4.9\mu\text{g}/\text{m}^3$$

환기의 양을 새로운 규제치 $16.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 만족하도록 공급하려면 다음의 대수식을 만족하므로 증가율(Y)은 다음과 같이 계산하였다.

$$0.3 \times (1+Y) \times 4.2\mu\text{g}/\text{m}^3 + 0.7 \times (20.4\mu\text{g}/\text{m}^3 + 0.3 \times 4.2\mu\text{g}/\text{m}^3 \times Y) = 16.1\mu\text{g}/\text{m}^3 \times (1+Y) - X \\ Y \approx 0.3087 (30.87\%)$$

톨루엔의 경우도 벤젠과 같은 절차를 통해 원가스량과 증가율을 산출한 결과 각각 $95.8\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.4603(46.03%)으로 조사되었다. 벤젠과 톨루엔의 원가스량과 증가율 비교를 통해 본 연구에서는 톨루엔의 경우에 한하여 비용분석을 수행하였다.

다음의 표는 환경부에서 제시하고 있는 신축공동주택 대상의 휘발성유기화합물의 기준에서 일본의 권고기준으로 강화될 때 요구되는 시설투자비와 유지관리비를 산정하여 제시한 것이다. 대상 건축물의 초기투자 설비비의 증가율은 21.04%로 나타났으며 연간유지관리비는 35.16% 증가하는

것으로 조사되었다. 설비 투자 후 초기 1년간의 총비용의 증가는 26.16%이다. 이러한 결과를 평당 추가 비용으로 환산하면 설비비의 경우 21,000원/평이고, 유지관리비의 경우 19,534원/평으로서 도합 40,534원/평이다. 따라서 새로운 실내공기질 규제에 소요되는 당해연도의 추가비용은 $(21,000\text{원} + 19,534\text{원}) \times 909\text{평} \times 91,544\text{개소} \times 36.7\% = 12,379\text{억원}$ 이다. 여기서 91,544개소 건물의 정확한 면적을 알 수 없는 상황에서 대상건물 면적은 909평을 기준으로 하였다. 또한 36.7%는 앞의 편익분석에서와 마찬가지로 톨루엔 권고기준치를 초과하는 사무실의 비율로서, 본 연구에 의하면 전체 실측 대상 건물 69개소 중 비공조시설을 제외한 60개소를 대상으로 할 때 이중 22개소(사무실 중앙 기준)가 톨루엔의 권고기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 이 비율을 $3,000\text{m}^2$ 이상의 건물에 확장하여 적용한 것으로 해석할 수 있다. 톨루엔 농도를 저감하기 위한 환기시설을 추가 설치, 가동할 경우 벤젠의 농도 또한 동시에 저감됨은 물론이다. 새로운 공기질 기준치를 근거하여 향후 10년간 발생될 것으로 예상되는 총비용의 현재가치를 할인율 7.5%를 적용하여 계산하면 다음과 같다. 이때 추가설비시설의 내구연한은 시설의 특성상 10년으로 가정하였으며, 현재가치의 영향을 받는 항목은 유지관리비에 한하였다.

$$\text{기준강화 당해연도 총비용} = 6,413\text{억원} + 5,966\text{억원} = 12,379\text{억원}$$

$$\text{총비용의 현재가치} = 21,000\text{원} \times 909\text{평} \times 91,544\text{개소} \times 36.7\% + 19,534\text{원} \times 909\text{평} \times 91,544\text{개소} \times 36.7\% \times (1+0.075)^{-i} = 6,413\text{억원} + 44,019\text{억원} = 50,432\text{억원}$$

따라서 새로운 공기질 기준치가 향후 10년간 유지된다고 했을 때 기존의 $3,000\text{m}^2$ 이상의 면적을 가진 모든 사무실 건물에서 추가로 소요되는 설치 및 유지가동비의 현재가치는 50,432억원으로 추정된다.

③ 비용-편익분석 결과

비용과 편익의 추정결과를 요약하면 당해연도 총편익은 13,056억원, 당해연도 총비용은 12,378억원이며, 기준 강화 이후 10년간 총편익의 현재가치는 95,279억원, 총비용의 현재가치는 50,432억원으로 조사되었다. 이러한 추정 결과를 기초로 사무실 실내공기질 규제기준 강화에 따른 비용-편익분석 결과를 B/C(benefit/cost) 비율을 기준으로 제시하면 기준 강화 당해 연도의 B/C 비율과 기준 강화 이후 10년간의 B/C 비율은 각각 1.05, 1.89로 조사되었다. 이와 같은 결과에 따르면 사무실 실내 중 휘발성유기화합물에 기준 설정 및 강

화하고자 하는 정부의 정책은 경제성이 있는 것으로 나타났다. 이는 향후 10년간 발생하는 비용과 편익에 따른 경제성 분석에서는 물론, 기준을 강화하는 당해연도에서도 경제성이 있는 것으로 확인되었다.

IV. 고찰

본 연구는 사무실 실내공기중 휘발성유기화합물에 관한 공기질 악화의 개선을 위한 국가 정책의 관련제도의 개정에 있어 근거자료의 확보를 위한 지침자료로 활용되어지는 것을 목적으로 크게 세 분야의 연구 즉, 사무실 내 공기중 휘발성유기화합물의 농도분포에 관한 실태조사와 건강위해성평가 및 개선에 따르는 비용-편익 분석으로 구분하여 수행되었다.

사무실 실내 공기중의 휘발성유기화합물의 포집 및 분석 방법은 노동부에서 제시하고 있는 표준 방법이 없어 환경부에서 제시하고 있는 실내공기질 공정시험방법을 준용하여 실시하였다. 이는 두가지 이유에서 이의 방법을 준용하였다. 첫째, 사무실의 경우 일반 작업환경과는 달리 실내 공기중의 오염물질의 농도가 낮은 농도로 존재할 가능성이 높으며, 둘째, 사무환경과 다중이용시설의 환경이 작업환경과의 환경에 비해 더욱 유사한 것으로 사료되어 환경부에서 제시하는 공정시험법에 따라 휘발성유기화합물의 포집 및 분석을 수행하였다.

사무실내 정확한 휘발성유기화합물의 농도를 조사하기 위한 적정 지점을 확인하기 위해 사무실 입구와 중앙에서 각각 동일 시점에 휘발성유기화합물을 포집하고 분석한 결과 벤젠, 톨루엔, 스티렌의 경우 중앙에서 조사된 농도가 입구에서 조사된 농도에 비해 다소 높은 경향을 나타냈으며, 에틸벤젠 및 자일렌은 입구에서 조사된 농도가 중앙에서 조사된 농도에 비해 다소 높은 농도를 나타내고 있는 결과를 보였다. 이는 벤젠, 톨루엔, 스티렌의 경우 사무기자재가 밀집되어 있는 사무실 중앙에서 주로 발생되고 있으며, 에틸벤젠 및 자일렌의 사무실 중앙보다는 입구에서 발생이 주로 이루어지고 있음을 간접적으로 시사하는 결과로 여겨진다. 또한 입구와 중앙에서의 각 오염물질의 농도차가 통계적으로 유의한 차이를 보일 만큼 큰 차이를 나타내지 않는 결과는 사무실 내 휘발성유기화합물의 농도분포는 고른 분포를 나타내며, 이는 사무실 내 공기 교환이 활발히 이루어지고 있음을 간접적으로 보여주는 결과라 할 수 있다. 이와 같은 결과를 통해 향후 사무실내 휘발성유기화합물의 농도 조사는 특정 휘발성유기화합물의 발생원으로부터의 영향 및 공조시설의 가동에 따른 영향이 크지 않는 지점을 선정하여 조사가 이루어 졌을

때 이로부터 산출된 결과가 그 사무실 실내공기 중의 휘발성유기화합물의 농도를 간접적으로 대표할 수 있음을 시사하는 결과로 사료된다.

공조시설의 가동 중인 사무실과 가동되지 않거나 설치되어 있지 않은 사무실 내의 실내공기중의 휘발성유기화합물의 농도비교 결과 벤젠만이 공조시설이 가동 중이 사무실이 비가동중이거나 설치가 되어 있지 않은 사무실에 비해 낮은 농도를 나타냈으나, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 및 스티렌은 공조시설이 가동중인 사무실에서 높은 농도를 보였다. 그러나 공조시설 가동 중인 사무실과 비가동중인 사무실내의 모든 조사대상 휘발성유기화합물의 농도차는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않은 것으로 조사되었다. 이와 같은 결과는 공조시설의 가동이 사무실 실내공기중의 휘발성유기화합물의 농도 저감에 크게 기여하고 있지 못하고 있음을 보여주는 결과로 공조시설이 가동이 실내공기질 개선에 기여할 것이라는 예상과는 다른 결과를 나타내었다. 이는 기존의 공조시설이 휘발성유기화합물의 저감을 고려하여 설계되어졌기 보다는 실내 온열환경의 유지에 관계하여 설계되어졌기 때문에 사무실내 휘발성유기화합물의 저감에 크게 기여하지 못하고 있는 것으로 여겨진다. 이에 향후 공조시설 설계시 사무실내 휘발성유기화합물의 저감을 고려한 설계 및 시공이 이루어져야 할 것이며, 이를 위한 관련 방안이 이루어 져야 할 것이다.

건물의 완공이후 연식 즉, 1년 미만, 1년 이상 3년 미만 및 3년 이상 사무실내의 휘발성유기화합물 농도 비교결과 조사대상 휘발성유기화합물 모두 1년 이상 3년 미만의 사무실내의 농도가 다른 연식의 사무실내의 농도에 비해 높은 것으로 조사되었으나 통계적으로는 유의한 차이를 나타내지 않았다 ($p>0.05$). 이와 같은 결과는 노영만 등(2004)에 의해 1년 미만 사무실과 1년 이상 3년 미만 사무실내의 휘발성유기화합물의 농도간에 유의한 차이를 나타내지 않은 결과와 유사한 결과이나 건축재료로부터 방출되는 휘발성유기화합물의 방출량은 6개월이 경과하면 절반 수준으로 감소한다는 기존의 연구결과와는 상반되는 결과이다. 이와 같은 결과는 앞에서 제시한 바와 같이 각 사무실의 용도 및 특성에 따른 차이에서 건축자재 이외의 다른 사무기자재로부터의 휘발성유기화합물의 방출과 또한 실내 온열환경의 변화에 따른 건축자재로부터의 휘발성유기화합물의 방출량의 변화에 의한 것으로 사료되나 특별한 원인을 규명하지 못하였다. 이에 사무실의 용도 및 특성의 분류, 실내온열환경 변화에 따른 건축자재 방출 특성 및 사무실 온열환경의 변화 등에 관한 연구를 비롯한 보다 많은 연구를 통해 그 원인의 규명이 이루어져야 할 것이다.

현행 국내 실내환경관련 공기질 관리법 중 실내 공기중 휘

발성유기화합물에 대한 기준이 마련된 법으로는 환경부의 다중이용시설등의 실내공기질관리법으로 17개 다중이용시설에 대해서는 TVOCs로 규제하고 있으며, 개별 휘발성유기화합물에 대한 기준은 신축공동주택에 대해서 기준을 설정하고 규제하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 사무실내 휘발성유기화합물의 기준 설정의 근거마련을 위해 본 연구에서 조사된 농도를 실내환경 특성이 다르나 기준에 기준이 설정된 신축공동주택에 관한 기준치와 비교하여 그 초과율을 제시하였다. 벤젠의 경우 기준치의 초과율이 37.6%, 톨루엔은 6.8%, 에틸벤젠은 1.5%로 조사되었으며, 자일렌과 스티렌은 기준치를 초과하지 않는 것으로 조사되었다. 물론 앞에서 제시한 바와 같이 사무실 환경과 신축공동주택의 환경은 많은 차이가 있으나 벤젠의 경우 신축공동주택의 특성에 맞춰 설정된 기준치를 초과하는 사무실이 매우 많은 것으로 조사되었고 또한 톨루엔, 에틸벤젠 역시 초과율은 높지 않으나 기준치를 초과하는 사무실이 존재하는 것으로 조사되었다. 물론 신축공동주택에 거주하는 거주자의 거주시간의 경우 사무실에 거주하는 시간에 비해 더 많은 시간을 거주한다는 점에서 사무실의 근로자의 경우 휘발성유기화합물의 노출시간이 작다는 점은 있으나, 건축자재로부터 방출되는 휘발성유기화합물의 농도가 가장 높은 것으로 여겨지는 신축공동주택에 관한 기준치를 초과하는 사무실이 다수 존재한다는 것을 고려할 때, 사무실내 공기중 휘발성유기화합물에 대한 기준 설정이 요구되어진다. 따라서 발암물질로 알려진 벤젠 등 일부 휘발성유기화합물의 사무실 농도가 신축공동주택 기준치를 초과하고 있다는 결과는 향후 이에 대한 건강위해성평가 및 경제성평가 등을 고려한 기준의 설정이 이루어져야 하며, 나아가 이의 관리가 적극적으로 이루어져야 하는 당위성을 부여하는 결과라 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 사무실 실내공기중의 휘발성유기화합물 농도분포 조사 결과 및 사무실 근로자의 노출경향 조사 결과를 바탕으로 건강위해성평가를 수행하였다. 그 결과 발암물질인 벤젠의 경우 US. EPA에서 권장하고 있는 발암위해도 범위($10^{-6} \sim 10^{-4}$) 중 하한 값인 10^{-6} 보다 낮은 값을 나타냈으나 최고 노출시에는 10^{-5} 을 초과하는 것으로 조사되었다. 비발암물질인 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌 역시 US. EPA에서 권유하고 있는 위해도지수인 1을 초과하지 않고 있으나 최대노출에서 일부 휘발성유기화합물의 위해도지수가 1을 초과하였으며, 또한 최대노출시 총위해도지수가 1을 초과하고 있는 것으로 조사되었다. 이와 같은 결과는 이철민 등(2004)에 의해 수행된 과거 사무실 실태조사의 메타분석을 통한 건강위해성평가 결과와 유사한 결과를 나타냈다. 이와 같은 결과는 사무실 근로자의 실내공기오염으로 인한 건강예방을 위해 사무실 실내공기중의 휘발성유기화합물에 대

한 기준 설정 등의 적극적 관리대책이 이루어져야 함을 시사하는 결과라 할 수 있다.

사무실 실내공기질 관리를 위한 휘발성유기화합물에 대한 새로운 공기질 기준치 도입에 따른 경제성 평가의 일환으로 비용-편익분석을 수행한 결과 사무실 실내공기질 기준을 강화하는 정부의 정책은 경제성이 있는 것으로 나타났다. 이는 향후 10년간 발생하는 비용과 편익에 따른 경제성분석에서는 물론, 기준의 설정 및 강화하는 당해연도에서도 경제성이 있는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 자료의 제약으로 인해 편익과 비용 도출과정에서 다양한 가정을 전제하였다. 특히 할인율의 설정, 발병률 추정, 건물당 근무자 수 등은 편익과 비용의 추정결과에 많은 영향을 미치는 주요 요소들이다. 그러나 본 연구를 통해 계산된 편익과 비용 비율을 고려할 때 다양한 민감도 분석과 관계없이 사무실 실내공기질 개선을 위한 휘발성유기화합물의 기준 설정 및 관리 정책은 경제성이 충분히 있는 것으로 판단된다.

V. 결론

본 연구는 사무실 실내공기 관련제도의 개정에 있어 휘발성유기화합물의 기준 개정에 관한 근거자료의 확보를 위해 크게 세분야로 나누어 연구를 수행하였다. 첫째, 국내 사무실 환경 내의 휘발성유기화합물의 농도 분포에 관한 실태조사, 둘째, 실태조사를 기반으로 한 사무직 근로자의 휘발성유기화합물의 흡입으로 인한 건강위해성평가, 셋째, 휘발성유기화합물의 기준 개정에 따른 경제성평가를 각각 수행하여 그 결과를 제시하였다.

본 연구에서 산출된 결과를 간략히 제시하면 다음과 같다.

첫째, 사무실 내 휘발성유기화합물 농도의 환경부에서 제시하는 신축공동주택내 휘발성유기화합물의 기준에 대한 초과율은 벤젠의 경우 37.6%, 톨루엔의 경우 6.8%, 에틸벤젠의 경우 1.5%로 조사되었다. 신축공동주택과 사무실 환경간에는 많은 차이가 있으나 노출환경 및 벤젠의 발암 독성을 고려할 때 사무실 실내공기중의 휘발성유기화합물의 기준 설정이 고려되어야 할 것이다.

둘째, 건강위해성평가 결과 평균 발암위해도 및 위해도지수의 경우 US. EPA에서 권장하고 있는 하한 기준(발암위해도 : 10^{-6} , 위해도지수 : 1)보다 낮은 위해도를 나타냈으나 최대 노출환경에서는 하한 기준을 초과하는 결과를 나타내 이 역시 휘발성유기화합물의 기준 설정이 고려되어야 할 것으로 조사되었다.

셋째, 사무실 실내공기질 개선을 위한 휘발성유기화합물의 기준 설정시에 따르는 사회 경제적 비용 및 편익 분석 결

과 기준 강화 당해연도의 B/C 비율과 기준 강화 이후 10년간의 B/C 비율은 각각 1.05, 1.89로 조사되어 사무실 실내공기질 개선을 위한 휘발성유기화합물에 대한 기준 설정 및 관리를 강화하는 정부의 정책은 경제성이 있는 것으로 조사되었다.

본 연구는 현행 노동부의 사무실 실내공기질 관련 제도에 있어 휘발성유기화합물의 기준 개정 및 관리방안 수립을 위한 근거자료 확보를 위해 수행된 연구로 연구대상시설의 제약, 건강위해성평가지의 노출계수 자료의 제약 등을 통한 국외 자료의 활용 및 가정 등에 기인한 불확실성, 기준설정에 따르는 경제성평가 수행에 있어 자료의 제약으로 인한 다양한 가정을 통한 분석 등에서 발생하는 불확실성 산출된 결과의 의미해석에 있어 오해가 발생할 가능성이 높다. 그러나 본 연구의 수행을 통해 다음과 같은 향후 연구방향을 제시할 수 있다. 첫째, 보다 체계적이며, 장기적이고 광범위한 사무실 실내공기질에 관한 실태조사가 요구된다. 둘째, 건강위해성평가 및 경제성평가 수행에서 발생될 수 있는 많은 불확실성을 줄이기 위한 노출계수 및 사회 경제적 계수에 관한 폭넓은 자료의 수집 및 검증을 통한 데이터베이스 구축이 선행되어야 할 것이며, 또한 구축된 데이터베이스를 활용한 건강위해성평가 및 경제성평가의 수행을 통해 발생될 수 있는 불확실성을 최대한 감소시키는 노력이 이루어져야 할 것이다.

REFERENCES

- 김윤신, 이철민, 문정숙, 김상욱. 서울·경기지역 초중고등학교 교실의 실내공기오염에 관한 연구. 한국학교보건학회지, 2003;16(1):81-90
- 노영만, 이철민, 김석원, 김치년, 김현욱, 조기홍, 최호준, 강성호, 김정만. 사무실 내 실내공기질 특성 및 근무자의 자각증상에 관한 연구, 한국산업위생학회지, 2004;14(3):270-282
- 한국산업안전공단. 사업안전보건법령 개정안중 주요규제 신설에 따른 규제영향분석(산업의학분야-근로자 건강진단체도 개선), 연구원 2004-75-536; 2004.
- 이철민, 김윤신, 노영만, 김종철, 전형진, 이소담. 사무실 실내 공기오염물질 노출에 의한 건강위해성평가, 한국산업위생학회지, 2004;14(3):251-263
- 한국실내공기산소연구회. 실내공기와 건강, 신광문화사; 2004. (38-39쪽.)
- 환경부. 노출평가지침서. G7 프로젝트 보고서; 2001. (170-221쪽.)
- 환경부. 실내공기질공정시험방법, 환경부고시 제 2004-80호 (2004.6); 2004.
- Lee S.C., M. Chang L.Y. Indoor and outdoor air quality investigation at school in Hong Kong. Chemosphere 2000;40:109-113
- Lende R. Health aspects related to indoor air pollution. Inter J Epidemiology 1980;9(3):195-197
- Molbare, L. Indoor air pollution due to organic gases and vapors of solvents in building materials. Environ Int. 1982.
- National Academy of Sciences(NAS), Human exposure assessment for airborne pollutants, Washington DC; 1993.
- Robinson, J., Nelson W.C. National Human Activity Pattern Survey Data Base. United States Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC; 1995.
- Stolwijk, J.A. Risk assessment of acute health and comfort effects of indoor air pollution, Annals of the New York Academy of Sciences 641. 1992. p. 56-62
- U.S. Environmental Protection Agency(EPA), Volume I - General factors handbook, Exposure factors handbook, updated to 1989 Exposure factors handbook, National Center for Environmental Assessment, EPA/600/p-95/2Fa, Chapter I and V; 1997.