한국산업위생학회지 제14권 제3호(2004년 12월)
J Korean Soc Occup Environ Hyg 2004;14(3):251-263

사무실 실내공기오염물질 노출에 의한 건강위해성평가

이철민‡ · 김윤신 · 노영만 · 김종철 · 전형진 · 이소담

한양대학교 환경 및 산업의학연구소

Health Risk Assessment of Exposure to Indoor Air Pollutants in Office Building

Cheol-Min Lee‡ · Yoon-Shin Kim · Young-Man No · Jong-Chul Kim · Hyung-Jin Jeon · So-Dam Lee.

Institute of Environmental and Industrial Medicine, Hanyang, University, Seoul, Korea

This study collected and re-analysed the articles of exposure assessment for the indoor environment of offices in journals related environment in Korea since 1990, and estimated the unit health risk on indoor environment. The objective of this study was to offer scientific data for decision-making of policy for improvement and management of indoor air quality on office in Korea.

The pooled concentration for the critical air pollutants in the office was estimated 114 ± 84 μg/m3 for respirable particle, 2 ± 1.6 ppm for carbon monoxide and 1,008 ± 983 ppm for carbon dioxide, respectively. And the pooled concentration for the volatile organic compounds was estimated 11.1 ± 13.1 μg/m^3 for benzene, 65,8 ± 79.8 μg/m^3 for toluene, 7.7 ± 9.3 μg/m3 for ethylbenzene, 23.1 ± 25.6 μg/m^3 for m-p-xylene, 5.5 ± 5.2 μg/m^3 for styrene and 14.6 ± 17.9 μg/m3 for o-xylene, respectively. The result of the risk assessment for the critical pollutants by Monte Carlo analysis showed that the probability of the safety factor exceeded 1 was 36.83% for respirable particle and 99.12% for carbon dioxide, respectively. The unit cancer risk for men and women by inhalation of benzene was 8.9 × 10-6 and 6.1 × 10-6, respectively. And hazard indexes for toluene, ethylbenzene, m-p-xylene, styrene, and o-xylene were less than 1.

Key Word : Health risk assessment, office, indoor environment, critical air pollutants, volatile organic compounds

Ⅰ. 서 론

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(Stolwijk, 1992). 그러나 1970년대 이후 각종 산업분야에서 에너지 절감 및 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

접수일 : 2004년 9월 9일, 채택일 : 2004년 10월 29일
‡ 교신저자 : 이철민 (서울특별시 성동구 행당동 17번지 한양대학교 환경 및 산업의학 연구소
Tel : 02-2290-1510 E-mail : spica@ihanyang.ac.kr)

야기될 수 있는데 그 영향은 실내 거주자들의 생명을 위협할 정도는 아닐지라도 장기적으로 볼 때 건강에 나쁜 영향을 미치고 있음에 틀림없다(Lee, 2000). 실내공기오염에 따른 건강위해성평가 분야의 연구는 1970년대 초 선진 각국에서 빌딩증후군(Sick Building Syndrome, SBS)이라하는 새로운 증상이 보고되면서부터 본격적으로 관심을 갖게 되었다(Lende, 1980; Molbare, 1982; 김윤신, 2003). 미국 산업안전보건청(OSHA)은 빌딩증후군 증세를 보인 근로자수를 3 ~ 7천만명으로 추정하고 있다. 또한 세계보건기구(WHO)는 모든 형태의 새로운 시설 중 약 30%가 공기질 저하를 야기 시킨다고 발표하였다. 이렇듯 다양한 잠재적인 원인으로 인하여 빌딩증후군은 직업적 기인물로서 사회적인 질환으로 간주될 수 있다(한국산업안전관리공단, 2004). 미국과 캐나다 및 유럽의 근로자에 관한 연구에서는 작업시 빌딩증후군 관련성 증상을 가진 작업자는 18 ~ 19%에 달한다고 보고하고 있다. 우리나라 사무실 근로자들에게서 발생되는 업무상 질병 현황을 유해인자로 구분해보면 대부분 작업관련성 인자가 원인이 되지만, 물리적인자, 화학적인자 및 생물학적 인자로 인한 질병자가 2000년 5명, 2001년 21명, 2002년 4명으로 적지 않게 보고되고 있다(한국산업안전관리공단, 2004).

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 사무실내 공기질에 관한 연구조사 자료가 매우 미약한 수준에 있는 실정으로 사무실의 실내공기오염물질에 대한 합리적 기준제시 및 이에 따른 공학적 처리기술의 목표설정 수립과 같은 정책결정에 있어 과학적 자료를 제공하기 위해 사무실 공기오염물질에 대한 건강위해성평가에 관한 연구의 수행이 요구되고 있다.

이에 본 연구는 1990년 이후 국내 사무실 실내공기질에 관한 연구결과들을 수집하고 메타분석법을 이용하여 사무실 실내공기 중 산업보건기준에 관한 규칙에서 제시하고 있는 4개 오염물질 중 포름알데히드를 제외한 3개 오염물질 및 휘발성유기화합물질의 병합평균농도를 제시하였다. 또한 사무실 근로자들의 실내공기오염물질의 흡입에 의한 건강위해성평가를 수행함에 있어 사전조사로 이들 4개 공기오염물질에 대한 안전계수를 조사하여 제시함으로써 사무실 근로자들로부터 건강상 악영향이 발생할 가능성을 제시하였으며, 유해공기오염물질로 알려져 있는 휘발성유기화합물질 중 발암성물질 및 비발암성물질에 대한 건강위해성평가를 수행하여 제시함으로써 향후 국내 사무실내 공기질 관리정책 및 공기오염에 따른 건강위해성평가 연구 수행에 있어 기초자료를 제공하고자 한다.

Ⅱ. 연구방법

1. 사무실 실내공기질 조사 자료 수집

과거 국내에서 수행된 사무실내 공기질 조사 자료의 수집은 한양대학교 백남학술정보관에서 지원하는 학술 데이터베이스 (http://library.hanyang.ac.kr/dlsearch/TGUI/Hanyang/Main.asp) 중 국내 전자저널검색 및 메타검색을 이용하여 다음과 같은 문헌 검색 및 선정 조건을 설정하고 이에 적합한 연구논문만을 선정하였다.

문헌 검색 조건으로는

첫째, 문헌 검색은 한양대학교 백남학술정보관 학술 데이터베이스 검색 중 국내 전자저널 검색 엔진과 메타검색 엔진을 이용한다.

둘째, 검색어로는 '사무실', '실내환경', '다중이용시설' 등 사무실을 포함한 미세환경을 의미하는 단어를 이용한다.

셋째, 환경관련학회지(한국대기환경학회지, 한국환경관리학회지, 한국환경보건학회지, 한국환경과학회지, 대한위생학회지, 한국생활환경학회지, 한국산업위생학회지, 대한환경공학회지 등)에 제시된 논문을 검색한다.

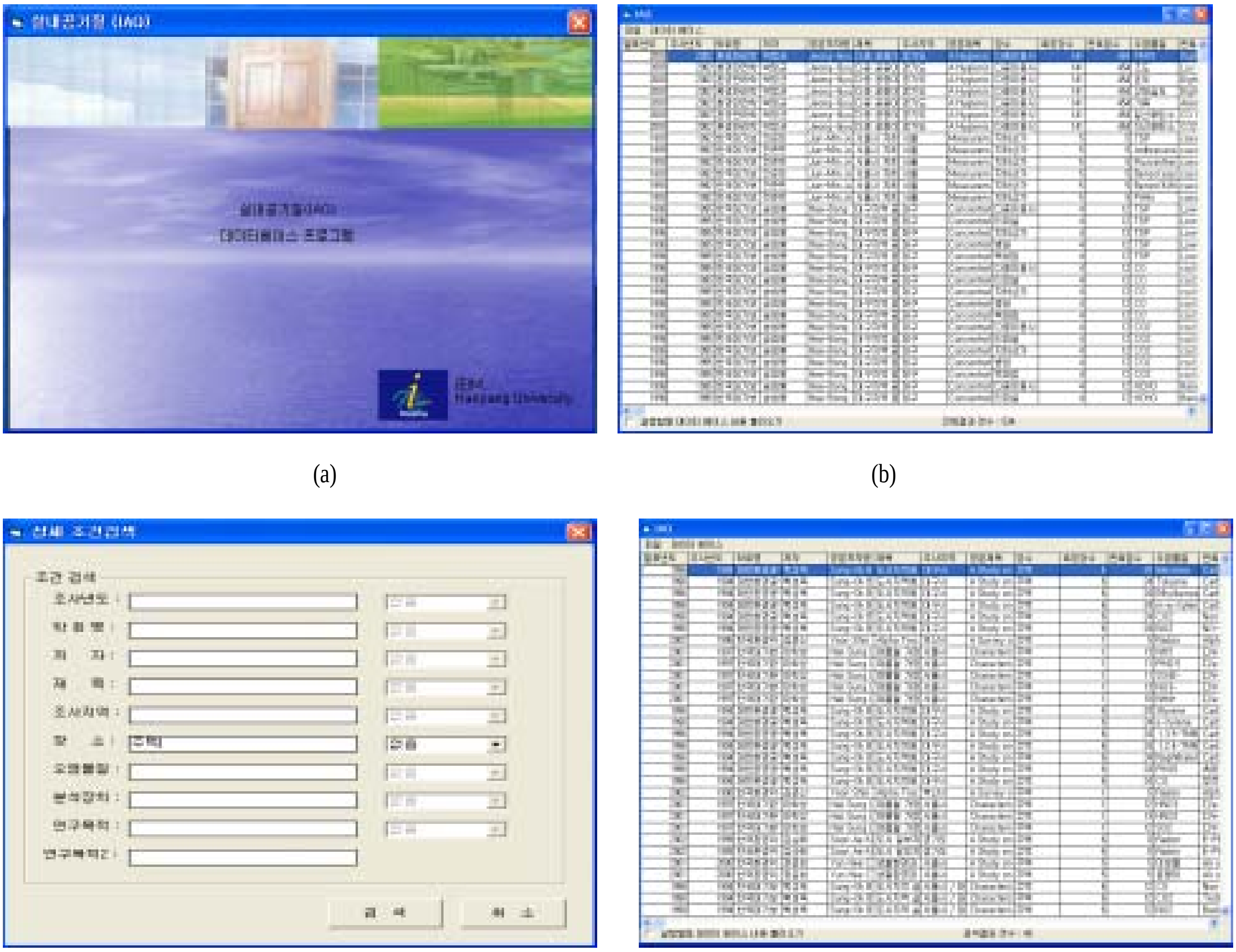
문헌 선정 조건으로는

첫째, 1990년 이후에 학회지에 발표된 연구논문만을 선정한다.

둘째, 선정된 연구논문의 내용을 확인하여 본 논문의 주제(사무실 실내공기오염)와 일치하는 연구논문만을 선별한다.

2. 사무실 실내공기질 데이터베이스 관리 프로그램 작성 및 운영

수집된 과거 연구결과자료들의 원활한 데이터베이스 구축 및 운영을 위해 '실내공기질 데이터베이스 프로그램'을 제작하여 운영하였다. 그림 1은 본 연구의 수행을 위해 제작된 프로그램을 나타낸 것으로 수집된 연구결과자료를 조사장소, 측정장소 수, 관측점수(자료수), 대상오염물질, 측정장비, 분석장비 및 분석방법, 평균농도, 표준편차, 최소농도값, 최대농도값, 연구목적 1, 연구목적 2의 순으로 데이터베이스를 구축하였으며, 구축된 데이터베이스로부터 필요한 자료만을 출력할 수 있도록 검색창을 프로그램에 삽입하였다. 또한 검색된 자료의 원활한 활용을 위해 검색된 자료를 spread sheet 인 EXECL 프로그램으로 전환할 수 있도록 프로그램화 하였다.



(a) (b)

Figure 1. Scheme of the indoor air quality database program. :
(a) Main window (b) Database window (c) Search window (d) Result window

3. 자료의 취합 및 분석

1) 오염물질별 병합평균농도 산출

구축된 데이터베이스를 바탕으로 노동부에서 시행하고 있는 산업보건기준에 관한 규칙 중의 사무실내 공기오염물질 중 기준물질인 4개 오염물질 및 휘발성유기화합물질에 대한 병합평균농도를 역분산 가중 평균산출법을 이용하여 산출하였으며, 산출된 병합평균농도는 사무실내의 공기오염물질의 흡입으로 인한 건강상 악영향이 발생할 가능성을 조사하기 위한 건강위해성평가 수행시 오염물질의 노출농도로 활용하였다.

사무실내의 오염물질별 병합평균농도 산출은 다음과 같은 문헌 선정 조건을 설정하고 조건에 적합한 연구결과만을 선정하여 활용하였다. 문헌 선정 조건은 다음과 같다.

첫째 동일한 측정 및 분석방법을 사용한 연구결과만을 선정한다.

둘째 연구대상오염물질의 공기중 농도범위(표준편차, 범위, 분산 및 최대값과 최소값)가 제시된 연구결과만을 선정한다.

이 연구에 사용된 역분산 가중 평균법(inverse-variance-weighted avergae)은 메타분석(meta-analysis)의 효과크기분석(analysis of effect-magnitude measures)의 일환으로 선정된 연구들의 결과(평균농도)들로부터 각 연구의 크기(자료수 등)을 고려하여 병합평균을 산출하는 방법이다. 이 방법은 병합평균의 추정량이 근사적으로 정규분포함을 가정한다. 즉

$$\bar{\theta}_i = N(\theta_i, \omega_i^{-1}),\ i=1,2,\cdots,k$$

여기서 ω_i는 $\bar{\theta}_i$의 역분산(inverse variance), 즉 $\omega_i = \frac{1}{var(\bar{\theta})}$ 이다. 또한 k편의 연구는 독립이다. 따라서 병합평균 추정량을 $\theta_1 = \theta_2 = \cdots = \theta_k = \theta$라 가정할 때 이의 분포는 다음과 같이 근사정규분포한다.

$$\sum \bar{\theta}_i \omega_i \sim N(\theta \sum \omega_i, \sum \omega_i)$$

따라서

$\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^{k} \bar{\theta}_i \omega_i}{\sum_{i=1}^{k} \omega_i}$, 즉 $Var(\bar{\theta}) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{k} \omega_i}$ 이다.

$\bar{\theta}_i$가 근사정규분포함을 이용하여 $\bar{\theta}_i$의 95% 신뢰구간은 다음의 식을 이용하여 산출하였다.

$$\bar{\theta} \pm 1.96\sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^{k} \omega_i}}$$

여기서 ω_i는 여러 연구결과들을 병합하는데 있어 가중(weight)의 역할을 한다.

2) 기준오염물질의 건강위해성평가

기준오염물질의 건강위해성평가는 안전계수(safety factor)를 이용하여 평가하였으며, 이 안전계수는 다음과 같은 식을 이용하여 산출하였다.

$$S = \frac{C}{TRV}$$

여기서 C는 오염물질의 병합평균농도를 나타내고, TRV(toxicological reference value)는 독성학적 참고치로 국제적이나 국내 오염물질의 권고값을 의미한다(Roman, 2003). 안전계수의 의미는 1을 기준으로 1이하인 경우 건강상의 불편이 발생되지 않음을 의미하며, 반면에 1을 초과할 경우에는 건강상의 불편함이 발생할 가능성을 나타내는 계수이다.

이 연구에서는 산업보건기준에 관한 규칙에서에 제시하고 있는 4개의 기준오염물질 중 포름알데히드를 제외한 3개의 오염물질의 병합평균농도를 이미 구축된 데이터베이스 및 문헌선정조건을 활용하여 역분산 가중평균산출법을 이용하여 산출하였으며, 산출된 병합평균농도를 CTE (centeral tendency exposure)값으로 선정하였고 이 병합평균농도의 95% UCL(upper confidence level)값을 산출하여 RME (reasonable maximum exposure)값으로 선정하였다. 또한 오염물질의 병합평균농도의 분포는 정규분포하는 것으로 가정하였으며, 농도의 범위는 전체 농도값의 99.7%를 활용하기 위하여 mean ± 3 stand- ard deviation으로 선정하였다. 안전계수는 산출된 사무실내 공기중 오염물질들의 CTE 및 RME상태의 병합평균농도를 활용하여 단일 안전계수를 산출하였으며, 오염물질의 확률분포를 이용한 몬테카를로 모의실험(Monte-Carlo simulation)을 통해 확률론적 안전계수의 평균값, 최대·최소값과 25%, 50%, 70%, 90%, 100% 값을 각각 산출하였다. 몬테카를로 모의실험은 『crystal ball 2000 (Decisioneering, Inc)』 컴퓨터 프로그램을 이용하여 10,000번 모의실험을 반복 실행하였다.

3) 휘발성유기화합물질의 건강위해성평가

휘발성유기화합물질의 위험성확인 및 용량-반응평가는 TOMES plus(Toxicology Occupational Medicine and Environmental Series)내의 IRIS(Integrated Risk Information System) 자료를 이용하여 각 오염물질의 EPA 분류체체계인 발암증거의 가중(Weighting of evidence)에 따라 발암력을 분류하여 제시하였으며, 단위위해도(Unit risk), 외삽방법(Extrapolation method), 노출경로, 암의 형태, NOAEL(No Observed Adverse Effect Level) 또는 LOAEL(Lowest Observed Adverse Effect Level)로부터 유도된 참고농도(Reference concentration, RfC) 및 특정화학물에 이용될 수 있는 자료의 과학적 불확실성과 외삽할 때 발생하는 불확실성을 교정하기 위한 변형계수(Modifying factor, MF)와 불확실성계수(Uncertainty factor, UF) 등을 조사하여 제시하였다(표 1).

Table 1. Quantitative estimate of carcinogenic and non-carcinogenic risk from inhalation exposure.

Pollutant	EPA Classification	UR (($\mu g/m^3)^{-1}$)	Extrapolation Method	Route	Tumor type	RfC (mg/kg/day)	NOAEL LOAEL (mg/kg/day)	UF	MF	Reference
Benzene	A	8.3×10-6	one-hit	inhalation, occupational exposure	Leukemia	-	-		-	Finsky et al. 1982
Toluene	D	-	-	-	-	0.4	N : 119 L : 119	300	0	Foo et al. 1990
Ethylbenzene	D	-	-	-	-	1	N : : 434	300	1	Wolf.M.A. et al. 1956
m-p-Xylene	D	-	-	-	-	0.29	N : 500	500	1	Ubgvaru et al. 1980
o-Xylene	D	-	-	-		2.9	N : 145	500	1	Ungvary et al. 1980
Styrene	C	-	-	-	-	1	N : 4	30	1	ACGIH. 1986

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

노출기간, 노출빈도, 평균수명, 체중 등의 노출계수는 환경부, 통계청 및 보건복지부에서 제공하는 자료를 활용하여 각각의 단일평가치와 확률밀도함수를 각각 산출하였으며, 한국인의 발암인자는 IRIS의 발암인자 자료에 근거하여 한국인의 평균체중과 평균호흡량으로 보정하여 산출하였다. 이와 같이 산출된 오염물질별 병합평균농도와 노출인자계수 및 이들의 확률밀도를 이용하여 비발암성 오염물질의 건강위해성평가를 위한 일일 평균 용량(average daily dose; ADD)을 다음과 같이 산출하였다(EPA, 1989; 1997 환경부, 2001).

$$ADD = \frac{[C \cdot IR \cdot ED]}{[BW \cdot AT]}$$

여기서 ADD : average daily dose(mg/kg-day)
C : concentration(μg/m^3)
IR : inhalation rate(m^3/day)
ED : exposure duration(days)
BW : body weight(kg)
AT : averaging time(years) 이다.

또한 발암작용이 있는 오염물질의 건강위해성평가를 위한 평생 일일 평균 용량(lifetime average daily dose : LADD)은 일일 평균 용량 식을 취하고 평생시간(lifetime time: LT)이 평균시간(average time: AT)을 대신하여 표현하였다(EPA, 1989; 1997, 환경부, 2001).

$$LADD = \frac{[C \cdot IR \cdot ED]}{[BW \cdot LT]}$$

발암물질은 용량-반응 평가를 통해 산출된 발암잠재력(cancer potency factor: CPF)과 CTE 및 RME 각각의 노출평가를 통해 얻어진 일일 평균 용량값을 곱하여 단일 발암위해도(cancer risk: CR)를 산출하고, 비발암성물질은 용량-반응 평가를 통해 산출된 참고농도(reference concentration: RfC)와 CTE 및 RME 각각의 노출평가를 통해 얻어진 일일 평균 용량과의 비교를 통하여 단일 위해도지수(hazard index; HI)를 산출하였으며(EPA, 1989; 1997, 환경부, 2001), 각각의 노출계수의 확률분포를 이용한 몬테카를로 분석을 통해 확률론적 발암위해도 및 위해도지수의 평균값, 최대·최소값과 25%, 50%, 70%, 90%, 100% 값을 산출하였다. 몬테카를로 모의실험은 「Crystal Ball 2000(Decisioneering, Inc)」 컴퓨터 프로그램을 이용하여 10,000번 모의실험을 반복 실행하였다.

Ⅲ. 결 과

1. 사무실 실내공기질 조사 자료의 수집 및 재분석

표 2는 1990년 이후 국내 환경관련학회지에 수록된 사무실 실내공기질 실태조사에 관한 연구결과물을 정리한 것으로 총 8편의 논문이 발표된 것으로 조사되었다.

신동천 등(1990)은 가스 검지관과 용액흡수법 및 Dust Monitor를 이용하여 서울시에 위치한 흡연사무실과 비흡연사무실의 실내공기 중 오염물질 농도분포를 조사하여 제시하였으며, 신해수 등(1993)은 사무실 4곳을 대상으로 활성탄관(charcoal, coconut, 100 mg / 50 mg : Gillian Co.)을 개인용 공기포집기에 부착하여 200 ml/min의 유속으로 2 ~ 3시간을 포집, 용출 후 GC(Hewlett Packard 5890)을 이용하여 휘발성유기화합물질을 조사하였다. 백성옥 등(1996)은 대구시에 위치한 사무실을 대상으로 비분산적외선분석법을 이용하는 CO11M(Environment S.A., France)를 이용하여 일산화탄소를 측정하였다. 또한 이산화탄소는 Tedler Air Sampling Bag(SKC Inc., UK)를 이용하여 포집한 후 FID와 Methanizer(Zr/Ni catalytic reactor, p\Perkin Elmer, USA)가 장착된 GC를 사용하여 분석하였다. 또한 휘발성유기화합물질은 30 mg의 carbotrap(60/80 mesh, Supel Co.)을 충진한 스테인레스 스틸 샘플링 듀브를 휴대용 펌프에 부착하여 포집한 후 SGE BP1 capillary column을 갖춘 GC에 자동열탁착장치인 ATD 400(Perkin Elmer, UK)을 부착하여 분석하였다. 황승만 등(1999)은 대구 및 대전 지역에 위치한 사무실 환경을 선정하여 흡연 및 비흡연 그룹으로 나누어서 Personal 펌프를 이용하여 호흡성분진을 포집하였으며, 남보현 등(2002)은 Mini-Volume Portable Sampler(Model 4.1, Airmetrics Co., USA)를 사용하여 PM10을 포집하였다.

방선재 등(2002)은 서울과 경기도에 위치한 사무실을 대상으로 공기 중의 미생물을 조사하여 보고하였으며, 김윤신 등(2002)은 서울에 위치한 사무실내 공기중의 라돈농도를 지하공간과 지상공간으로 구분하여 일본 나고야 대학 원자력핵공학과에서 제작한 Passive Monitor인 Radon Cup을 이용하여 조사하여 보고하였다. 박정균 등(2003)은 CO integrator(V-01-AN, Japan) 및 CO_2 integrator(CD-95, Japan)을 사용하여 일반 사무실과 공중 사무실 실내공기 중의 CO 및 CO_2를 조사하여 보고하였다.

이와 같이 조사된 자료를 바탕으로 문헌 선정 조건에 합당한 연구결과 자료들의 병합을 통해 산출한 기준오염물질 및 휘발성유기화합물질의 병합평균농도 및 신뢰구간은 표 3과 같다. 기준공기오염물질의 병합평균농도는 호흡성분진의 경우 114 ± 84 μg/m^3, 일산화탄소는 2 ± 1.6 ppm, 이산화탄소는 1,008 ± 983 ppm로 분석되었으며, 포름알데히드의 경우 1990년 이후 국내 환경관련 학술지에 발표된 연구결과가 없는 것으로 조사되었다. 또한 휘발성유기화합물질의 병합평균농도는 Benzene은 11.1 ± 13.1 μg/m^3, Toluene은 65.8 ± 79.8 μg/m^3, Ethylbenzene은 7.7 ± 9.3 μg/m^3, m-p-Xylene은 23.1 ± 25.6 μg/m^3, Stylene은 5.5 ± 5.2 μg/m^3, o-Xylene은 14.6 ± 17.9 μg/m^3로 조사되었다.

2. 기준오염물질의 위해성평가

기준오염물질의 위해성평가는 노동부에서 사무실 근로자의 건강을 위하여 산업보건기준에 관한 규칙에서 정하고 있는 4개의 기준오염물질 중 과거 연구결과자료가 없는 포름알데히드를 제외한 호흡성분진, 일산화탄소 및 이산화탄소에 대한 건강위해성평가를 수행하기위해 각 오염

Table 2. A summary of indoor air quality in office based on Korean literature review.

Author (year)	Sampling location (period)	Sampling pollutant	Sampling method	Summary (Concentration)
Shin.D.C. et al (1990)	5 sites in Seoul (1989. 2 / 1989. 7)	CO, CO_2, NO_x,SO_2, TSP	· ıstec detector pump(unico 400), · MOTO(HS-7, Japan) · rarosaniline formalin · ıst monitor	Non-smoke(Summer,Winter) CO-1.4±0.4, 3.1±1.7 CO_2-646±148, 741±185, NO_x-0.136±0.008, 0.023±0.010 TSP-86±25, 137±41 smoke(Summer,Winter) CO-2.0±0.9, 4.5±2.5 CO_2-806±186, 680±175, NO_x-0.018±0.006, 0.033±0.017 SO_2-0.046±0.022, 0.049±0.025 TSP-139±104, 225±92
Shin.H.S. et al (1993)	4 sites in Seoul (1993. 3 ~ 4)	Benzene Toluene Ethylbenzene o-Xylene m-p-Xylene	· ıarcoal, coconut, 100mg/50mg : Gillian)	Benzene-76.9±63.7, Toluene-434.8±467.4, Ethybenzene-54±64, o-Xylene-18.5±15.2, m-p-Xylene-46.9±33.2
Baek.S.O. & Kim.Y.M. (1996)	24 sites in Daegu (1994 .8 / 1994. 12 ~ 1995 .1)	CO, CO_2, NO_2,Benzene, Toluene, Ethylbenzene, m-p-Xylene, Stylene, o-Xylene, 1,3,5-TMB, 1,2,4-TMB, Naphthlene	·)11M, Environment. S.A., France · dler air sampling bag(SKC Inc., UK) (GC: Zr/Ni catalytic reactor analysis) · ter Badge(Toyo Roshi Kaisha Inc, Japan) · rtable Pump (Model AFC123, Casella London Ltd., UK) · ırbotrap(60/80 mesh, Supeloco Inc, USA) (GC : ATD-400 analysis) · rtable Pump (SP15, Casella London, UK)	CO-2±1.6, CO_2-1008±983, NO_2-0.022±0.013, Benzene-11.1±13.1 Toluene-65.8±79.8, Ethylbenzene-7.7±9.3, m-p-Xylene-23.1±25.6 Stylene-5.5±5.2, o-Xylene-14.6±17.9 1,3,5-TMB-8.1±19.1 1,2,4-TMB-18.3±39.2 Naphthlene-6.9±7.2
Hwang.S.M et al. (1999)	18 sites in Daegu & Daejoen (1999. 8 ~	PM10	· rtable pump	Daegu(Smoke, Non-smoke) PM10-55.10, 7.66 Daejeon(Smoke, Non-smoke) PM10-59.80, 96.80
Nam.B.H. et al. (2002)	2 sites in Seoul (2000. 4 ~)	PM10, B, Mg, Al, Ti, V, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Cd, Ba, Ce, Pb	· ini-volume portable sampler (Model 4.1, Airmetrics Co., USA)	PM10-57.5, B-0.540, Mg-0.009, Al-1.097, Ti-0.005, V-0.001, Cr-0.140, Fe-0.487, Ni-0.035, Cu-0.001, Zn-0.830, As-0.001, Se-0.001. Cd-0.001, Ba-0.447, Ce-0.002, Pb-0.027
Bang.S.J. et al. (2002)	4 sites in Seoul & Gyeonggi (2001. 6 ~)	Legionella.spp Bacteria Fungi Coliform	· r Sampler MAS 100 (MERK Germany)	Legionella.spp-5, Bacteria-230, Fungi-54, Coliform-112
Kim.Y.S. et al. (2002)	5 sites in Seoul (1996. 3 ~ 97.3)	Rn	· ıdon cup(Passive integrate)	Underground Rn-53.2±28.7 Above ground Rn-32.2±7.1
Park.J.G. & Yoon.J.W. (2003)	Sites in Gyeonggi	TSP, CO, CO_2,	· gital Dust Indicator(P-5H, Japan), ·) Integrator(V-01-AN, Japan) ·)$_2$ Integrator(CD-95, Japan)	General office TSP-50, CO-1.31, CO_2-806.25 Public office TSP-35, CO-1.35, CO_2-929.55

Table 3. Distribution for pooled concentration of indoor air pollutions in offices.

Pollutant	Mean	Standard deviation	95% Confidence interval		Reference
			Upper level	Lower level	
PM10	114.000	84.000	278.640	0	Hwang.S.M. et al.(1999), Nam.B.H. et al.(2002)
CO_2	1008.000	983.000	2934.680	0	Baek S.O. & Kim Y.M.(1996)
CO	2.000	1.600	5.136	0	Baek S.O. & Kim Y.M.(1996)
NO_2	0.022	0.013	0.047	0	Baek S.O. & Kim Y.M.(1996)
Rn	33.411	6.892	46.919	19.903	Kim Y.S. et al(2002)
Benzene	11.100	13.100	36.776	0	Baek S.O. & Kim Y.M.(1996)
Toluene	65.800	79.800	222.208	0	Baek S.O. & Kim Y.M.(1996)
Ethylbenzene	7.700	9.300	25.928	0	Baek S.O. & Kim Y.M.(1996)
m-p-Xylene	23.100	25.600	73.276	0	Baek S.O. & Kim Y.M.(1996)
Stylene	5.500	5.200	15.692	0	Baek S.O. & Kim Y.M.(1996)
o-Xylene	14.600	17.900	49.684	0	Baek S.O. & Kim Y.M.(1996)

물질별 CTE 및 RME 상태의 단일 안전계수와 몬테카를로 분석을 통한 확률론적 안전계수를 산출하여 표 4에 제시하였다.

호흡성분진의 경우 단일 안전계수는 CTE의 경우 0.76로 1을 초과하지 않는 것으로 조사되었으나 RME의 안전계수는 1.86으로 1을 초과하는 것으로 조사되었다. 또한 몬테카를로 분석을 통해 산출된 확률론적 안전계수의 범위는 0 ~ 3.28로 안전계수가 1을 초과할 수 있을 확률은 36.83%로 사무실 실내공기중의 호흡성분진의 제어활동이 이루어져야 할 것으로 조사되었다. 일산화탄소의 단일 안전계수는 CTE 및 RME 상태에서 각각에 대해 0.20, 0.51로 1보다 매우 낮은 양호한 안전계수를 나타냈으며, 몬테카를로 분석 결과 역시 확률론적 안전계수가 1을 초과하지 않는 것으로 조사되었다. 이산화탄소의 단일 안전계수는 CTE 및 RME 상태하에서 각각 1.01, 2.93으로 모두 초과하는 것으로 조사되었으며, 몬테카를로 분석 결과에 의한 확률론전 안전계수의 범위는 0 ~ 5.10으로 안전계수가 1을 초과할 수 있을 확률이 99.12%로 사무실 실내공기중 이산화탄소의 제어가 시급히 이루어져야 할 것으로 조사되었다.

3. 노출 시나리오 작성

표 5는 사무실내 유해공기오염물질인 휘발성유기화합물에 대한 건강위해성평가를 수행하기 위해 작성된 노출 시나리오를 제시한 것으로, 실내공기오염물질의 흡입에 의한 건강위해성을 살펴보기 위한 필수적인 조건인 인구집단의 다양한 특성을 반영할 수 있는 노출계수(체중, 호흡률, 기대수명, 노출기간 및 노출빈도)의 CTE 및 RME의 단일값 및 확률분포와 이의 출처를 각각 제시하였다.

이 연구에서의 사무실에서 근무 할 것으로 기대되어지는 성인(18~60세)의 평균 체중(남 : 69.3 kg, 여 : 56.3 kg)은 1997년 한국표준과학연구원에서 수행된 국민체위조사 결과를 활용하였다. 또한 체중의 분포 역시 한국표준과학연구원에서 제공하는 자료를 바탕으로 triangle 분포를 가정하였다(기술표준원, 1997). 호흡률은 연령, 성, 체중, 키, 건강상태, 활동정도 및 흡연 유무 등에 의해서 영향을 받는 것으로 알려져 있으며(환경부, 2001), IRIS에서는 건강위해성평가시의 호흡률을 20 m^3/day로 규정하고 있다. 이 연구에서는 국내 호흡률 조사 관련자료의 빈약성으로 IRIS에서 규정하는 평균호흡율을 활용하여 CTE일 경우 20 m^3/day를, RME의 경우 30 m^3/day를 이 연구의 호흡률 노출계수값으로 선정하였다(EPA, 1997). 또한 호흡률의 분포는 triangle 분포를 가정하였다(Smith, 1994). triangle 분포의 최대, 최소 및 최적값은 Adams(1993)가 제시한 연구결과의 적절한 활동(moderate), 휴식활동(resting) 및 가벼운 활동시(light)의 호흡률로 각각 가정하였다. 사무실의 노출기

Table 4. Table 4. Comparison between fixed-point(CTE and RME) and safety facto by Monte carlo simulation.

Pollutant	Safety factor										
	Fixed Point		Monte Carlo								
	CTE	RME	Mean	Max	Min	Percentiles(%)					
						25	50	75	90	95	100
PM10	0.76	1.86	0.86	3.28	0	0.49	0.82	1.18	1.51	1.70	3.28
CO	0.20	0.51	0.23	0.91	0	0.13	0.22	0.32	0.41	0.47	0.91
CO_2	1.01	2.93	1.28	5.10	0	0.67	1.20	1.80	2.36	2.70	5.10

간은 통계청에서 2004년에 제시한 생산노동가능인구조사의 연령분포인 15세 ~ 64세(50년)으로부터 가장 높은 경제활동인구를 나타낸 40 ~ 49세의 중앙값인 44.5세(30.5년)을 활용하여 CTE 일 경우 30.5년, RME 일 경우 50년으로 산정하였으며, 분포는 triangle 분포(최대값 : 50년, 최소값 : 0년, 최적값 : 30.5년)로 가정하였다(통계청, 2004). 노출빈도는 환경부에서 전국 성인 838명을 대상으로 1일 활동 내역과 활동장소 및 장소에서의 소요시간을 조사하여 발표한 내용 중 사무실 거주시간의 평균시간을 CTE상의 노출빈도 값(남 : 262.7분, 여 : 167.0분)으로 선정하였으며, RME 상의 노출빈도 계수의 값은 95% UCL 값을 활용하였다(환경부, 2001). 노출빈도의 확률분포는 정규분포를 가정하여 활용하였다. 평균수명은 발암물질의 경우 통계청에서 2001년도에 제시한 기대수명(남 : 72.84년, 여 : 80.01)을 이 연구의 평균수명 노출계수 값으로 선정하였으며, 평균수명의 확률분포는 남여 각각 단일값을 사용하였다(통계청, 2001; Thompson, 1992). 또한 비발암물질의 평균수명은 노출기간의 값 및 확률분포의 값을 평균수명의 값으로 대체하여 활용하였다. 발암물질의 단위위해도는 IRIS에서 제공하는 단위위해도를 한국인의 남여별 평균체중 및 호흡률로 조정하여 활용하였다(장미숙, 2002). Benzene의 보정된 남여별 단위위해도는 각각 $9.5 \times 10^{-6}(\mu g/m^3)^{-1}$, $1.1 \times 10^{-5}(\mu g/m^3)^{-1}$ 으로 산출되었다.

4. 발암 및 비발암 위해도 평가

표 6은 사무실내 발암 및 비발암성 유해공기오염물질의 흡입으로 인한 각 오염물질별 발암위해도 및 위해도지수를 산출한 결과를 나타낸 것으로 과거 조사된 사무실내 유해공기오염물질에 대한 자료 중 발암물질로는 벤젠에 대한 조사가 이루어진 것으로 나타났으며, 벤젠의 흡입에 위한 발암위해도는 CTE 상태에서 남자의 경우 8.9×10^{-6}, 여자의 경우 6.1×10^{-6}으로 조사되었다. 또한 RME 상태에서의 발암위해도는 남자의 경우 2.3×10^{-4}, 여자의 경우 1.9×10^{-4}으로 각각 조사되어 미국 환경보호청에서 권장하고 있는 허용기준치인 10^{-6} 및 최고허용기준치인 10^{-4}을 초과하는 것으로 조사되었다. 또한 벤젠의 흡입에 위한 몬테카를로 분석을 통한 확률론적 발암위해도의 평균값 또한 남여 각각 3.6×10^{-5}, 3.3×10^{-5}으로 미국 환경보호청에서 권장하는 10^{-6}을 초과하는 것으로 조사되어 사무실내 벤젠에 대한 제어활동이 요구되는 것으로 조사되었다. 이에 반해 비발암성 유해공기오염물질의 흡입에 위한 건강상의 악영향 발생 가능성을 나타내는 단위위해도지수의 경우 CTE 및 RME 상에서 남여 모두 미국 환경보호청에서 권장하고 있는 1을 초과하지 않는 것으로 조사되었다.

Ⅳ. 고 찰

이 연구의 최종목표는 향후 국내 사무실 근로자들의 건강장해를 예방하기 위한 사무실 실내공기질 관리정책 및 실내공기오염에 따른 사무실 근로자들의 건강위해성평가 연구 수행에 있어 활용되어질 수 있는 신뢰성 있는 기초자료를 제공하는데 있다. 이러한 연구의 최종목표를 달성하기 위해 본 연구는 크게 두 가지로 구분하여 연구를 수행하였다. 첫째, 국내 사무실 실내공기질 실태조사연구의 수집 및 재분석을 실시하여 그 결과를 제시하였으며, 둘째, 오염된 사무실 실내공기의 흡입으로 인한 근로자들의 건강상 악영향 발생가능성을 평가하기 위한 건강위해성평가의 예비연구로 노동부의 산업보건기준에 관한 규칙에서 제시하고 있는 기준공기오염물질에 대한 안전계수를 산출하고 제시하였다. 또한 유해공기오염물질의 흡입으로 인한 발암위해도 및 위해도지수를 산출하여 제시하였다. 그러나 국내 사무실 실내공기오염에 관한 연구는 일부 소수의 연구진에 의해 단기간에 일부 지역에 국한되어 수행되어져 왔기 때문에 다양한 사무형태에 따른 사무실 실내공기질을 파악하고 이들 자료를 바탕으로 사무실 근무자들을 대상으로한 건강위해성평가를 수행하는데는 많은 제약점의 발생을 배제할 수 없다. 이에 본 연구에서는 이와 같이 발생되어 질 수 있는 많은 연구 제약점들 중 감소시킬 수 있는 제약점들을 고려하고 이들 제약점들을 최대한으로 줄이기 위한 노력을 다음가 같이 기울였다.

첫째, 다양한 사무형태에 따른 사무실 실내공기질 실태조사자료를 확보하기 위해 과거 단편적으로 수행된 연구조사 자료를 취합했다. 이러한 취합에 있어 연구의 질을 고려하기 위해 국내 환경관련 학술지에 발표된 논문만을 선정하였으며, 보고서 등의 자료는 이 연구에서 제외하였다. 둘째, 과거 단편적으로 선행된 연구조사 자료의 선별 및 취합과정에서 발생될 수 있는 불확실성을 최소화하기 위해 연구자료의 선별에 있어 문헌 선정 기준 즉, 동일한 목적에의해 조사 보고된 논문 중 1990년 이후 국내 학술지에 발표된 논문을 선정하고 선정된 논문들 중 동일 측정 및 분석방법에 의해 오염물질의 농도를 조사한 논문들만을 선정하기 위한 문헌 선정 기준을 설정하고 이 기준에 준하는 연구논문만을 선정하였다. 셋째, 선정된 문헌에 제시된 연구결과의 병합과정에서 발생될 수 있는 불확실성을 줄이기 위한 방안으로 개별연구의 연구크기(자료수)를 고려한 역분산 가중 평균 산출법을 활용함으로써 산출된 병합평균농도의 정밀도를 높이고자 하였다. 이러한 연구설계 과정에서 발생되어 질 수 있는 제약점을 감소시키기 위한 노력에도 불구하고 발생되어질 수 있는 연구 제약점을 살펴보면 첫째, 연구의 선정에 있어 국내 실내환경에 관한 선행된 연구결과들을 전체 반영하지 못함으로써 발생되어 질 수 있는 표본추출의 오류로 인한 표본의 대표성 및 결과에대한 해석상의 오류를 완전히 제어하지 못하였다. 둘째, 국내 전 지역의 다양한 사무형태에 따른 사무실 실내공기질 조사자료를 연구대상으로 선정함으로써 수집된 자료들 간의 연구지역적 차이 및 사무형태에 따른 차이에서 발생될 수 있는 가변성 및 연구 수행자들간의 차이에서 발생될 수 있는 가변성을 고려하지 못한 자료의 병합에서 발생될 수 있

Table 5. Fixed assumptions and probability densities used as inputs to risk estimates in offices.

Parameter		Unit	CTE	RME	Distribution type	distribution parameters	Source
Pollutant	Benzene	㎍ ι^{3}	11.100	36.645	NM	Mean: 11.100 S.D.: 13.100	Song.H.H 1998, 1992.
	Toluene	㎍ ι^{3}	65.800	221.410	NM	Mean: 65.800 S.D.: 79.800	Song.H.H 1998, 1992.
	Ethylbenzene	㎍ ι^{3}	7.700	25.835	NM	Mean: 7.700 S.D.: 9.300	Song.H.H 1998, 1992.
	m-p-Xylene	㎍ ι^{3}	23.100	73.020	NM	Mean: 23.100 S.D.: 25.600	Song.H.H 1998, 1992.
	Styrene	㎍ ι^{3}	5.500	15.640	NM	Mean: 5.500 S.D.: 5.200	Song.H.H 1998, 1992.
	o-Xylene	㎍ ι^{3}	14.600	49.505	NM	Mean: 14.600 S.D.: 17.900	Song.H.H 1998, 1992.
Body weight	Male	kg	57	57	TR	Max : 84 Min : 3.5 Likeliest : 57	Smith, 1994, Lee.S.R,199
	Female	kg	48.7	48.7	TR	Max : 68 Min : 3.4 Likeliest : 48.7	Smith, 1994, Lee.S.R,1999
Exposure duration (Average time)	Male	yr	30.5	50	TR	Max : 50 Min : 0 Likeliest :30.5	Smith, 1994 NSO, 2001 Judgement
	Female	yr	30.5	50	TR	Max : 100 Min : 0 Likeliest : 80.01	Smith, 1994 NSO, 2001 Judgement
Exposure frequency	Male	min/day	262.7	832.67	NM	Mean : 262.7 SD : 290.8	Judgement MOE, 2001,
	Female	min/day	167.0	662.88	NM	Mean : 167.0 SD :253.0	Judgement MOE, 2001,
Life time	Male	yr	72.84	72.84	Point	72.84	Thompson, 1992 NSO. 1997
	Female	yr	80.01	80.01	Point	80.01	Thompson, 1992 NSO, 1997
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

NM : normal distribution, TR : Triangle distribution, SD : standard deviation, Max : maximum, Min : Minimum

Table 6. Comparison of fixed-point(CTE, RME) with Monte Carlo unit cancer risk and unit hazard index estimates on hazardous air pollution in offices.

	Sex	Pollutant	Cancer risk										
			Fixed Point		Monte Carlo								
								Percentiles					
			CTE	RME	Mean	Max	Min	25	50	75	90	95	100
Cancer risk	Male	Benzene	8.9E-6	2.3E-4	3.6E-5	1.3E-3	1.7E-9	6.8E-6	1.9E-5	4.4E-5	8.5E-5	1.2E-4	1.3E-3
	Female	Benzene	6.1E-6	1.9E-4	3.3E-5	8.6E-4	8.5E-10	5.7E-6	1.7E-5	4.1E-5	8.1E-5	1.2E-4	8.6E-4
Hazard index	Male	Toluene	3.3E-2	5.3E-1	2.2E-1	14.9	3.7E-6	3.0E-2	8.8E-2	2.2E-1	4.9E-1	7.8E-1	14.9
		Ethyl-benzene	1.6E-3	2.5E-2	1.0E-2	9.9E-1	1.1E-7	1.4E-3	4.1E-3	1.0E-2	2.3E-2	3.7E-2	9.9E-1
		m-p-Xylene	1.6E-2	2.4E-1	9.6E-2	8.8	2.6E-7	1.4E-2	4.1E-2	1.0E-1	2.2E-1	3.4E-1	8.8
		Styrene	1.1E-3	1.5E-1	6.2E-3	1.0	7.4E-8	9.0E-4	2.6E-3	6.4E-3	1.3E-2	2.1E-2	1.0
		o-Xylene	1.0E-3	1.7E-2	6.6E-3	1.0E-1	9.7E-9	9.3E-4	2.7E-3	6.8E-3	1.4E-2	2.3E-2	1.0E-1
	Female	Toluene	2.5E-2	5.0E-1	2.2E-1	33.4	1.6E-5	2.7E-2	8.1E-2	2,2E-1	4.7E-1	7.5E-1	33.4
		Ethyl-benzene	1.2E-3	2.3E-2	1.0E-2	2.1	6.0E-8	1.3E-3	4.0E-3	1.0E-2	2.3E-2	3.6E-2	2.1
		m-p-Xylene	1.2E-2	2.3E-1	9.9E-2	27.4	9.1E-8	1.3E-2	3.9E-2	1.0E-1	2.2E-1	3.5E-1	27.4
		Styrene	8.3E-4	1.4E-2	6.0E-3	3.9E-1	1.1E-7	8.7E-4	2.5E-3	6.5E-3	1.4E-2	2.2E-2	3.9E-1
		o-Xylene	7.6E-4	9.6E-3	7.0E-2	24.5	8.4E-7	8.5E-3	2.6E-2	6.7E-2	1.5E-1	2.1E-1	24.5

는 자료집계의 오류를 완전히 제어하지 못하였다. 그러나 본 연구는 단편적으로 수행되어온 국내 사무실 실내공기질 조사 자료를 검토하고 또한 이들 연구 자료를 활용하여 사무실 근로자들을 대상으로 건강위해성평가를 수행하여 그 결과를 제시함으로써 국내 전무한 실정에 있는 사무실 근로자들에 대한 건강위해성평가 연구의 선도적 역할을 수행하였다는 의미에서 본 연구결과가 어느 정도의 의미를 가질 수 있다고 본다.

이 연구에서 조사된 사무실 실내공기중의 산업보건기준에 관한 규칙에서 정하고 있는 기준오염물질 중 호흡성분진의 병합 평균농도는 114 ㎍/m^{3}으로 산업보건기준의 허용기준인 150 ㎍/m^{3}을 초과하지 않는 것으로 조사되었으며, 안전계수는 CTE 하에서 1을 초과하지 않는 것으로 조사되어 양호한 결과를 나타냈다. 그러나 Clayton et al.(1993)과 Janssen et al.(1998)의 호흡성분진의 경우 개인의 노출농도가 실내공기중의 농도에 비해 높으며, 이러한 현상은 특히 낮 시간대가 더욱 심하다고 보고하였다. 특히 Clayton et al(1993)은 그의 연구 보고에서 낮 시간대의 호흡성분진의 개인노출농도는 실내외 공기 중의 농도에 비해 50%정도 높은 것으로 제시하였다. 이와 같은 Clayton et al.의 결과를 고려할 때 이 연구에서 조사된 사무실 실내공기중의 호흡성분진의 병합 평균농도는 허용기준을 초과하지는 않았으나 모의실험결과 허용기준 초과 가능성을 나타내고 있다. 호흡성분진의 실내공기중의 대표적 발생원으로는 실내 거주자의 활동에 의한 재비산과 흡연 및 연소시 발생되는 것으로 알려져 있으며(Spengler and Sexton, 1983), 건강 영향으로는 천식 및 폐기능 감소 등의 호흡계 질환을 유발하는 것으로 알려져 있다(Koenig et al., 1993; Abbey et al., 1998). 또한 호흡성분진의 경우 방향족 탄화수소, 중금속, 질소산화물 및 황산화물 등이 흡착되어 있으며(Maroni et al., 1995), 이들 흡착물들은 호흡을 통해 폐까지 흡입되어진 후 신체로 흡입되어 건강상 악영향을 야기하는 것으로 알려져 있다. 특히 호흡성분진에 부착된 다환 방향족 탄화수소(PAHs)의 경우 발암을 유발하는 것으로 알려져 있다(Sisovic et al., 1996).

사람들은 실내공기 중에 존재하고 있는 수백 종 이상의 다른 화학물질들이 혼합된 휘발성유기화합물에 일반적으로 노출되고 있다. 실내환경에서의 휘발성유기화합물질의 발생원은 생활용품, 페인트, 가구, 의복, 건축자재 및 연소재료 등 매우 다양한 것으로 보고 되고 있다(Maroni et al., 1995; Guo et al., 2000). 또한 이러한

휘발성유기화합물의 노출은 급성 또는 만성적 건강영향을 야기할 수 있다(Otto et al., 1993; Guo et al., 2000). Guo et al(2004)은 사무실내의 공기 중 Benzene의 노출에 의한 성인의 발암위해도를 9.32×10^{-6}으로 보고하고있으나 이 연구에서 조사된 사무실 실내공기 중 Benzene의 노출에 의한 발암위해도는 남여 각각 8.9×10^{-6}, 6.1×10^{-6}으로 Guo et al.의 결과에 비해 낮은 발암위해도를 나타냈다. 이와 같이 Guo et al.의 결과와 이 연구 결과가 차이를 나타낸 것은 사무실내 공기 중의 휘발성유기화합물의 농도 차이 및 노출계수(노출기간, 노출빈도, 호흡율, 체중 등)의 차이에 의해 발생된 것으로 여겨진다. Guo et al.은 그의 연구에서 가정된 노출시나리오를 제시하지 않아 본 연구의 노출계수와의 차이에 대해서는 비교할 수 없었으나 실내공기중의 Benzene의 농도는 이 연구에서 제시된 11.0 ㎍/m^3에 비해 높은 11.92 ㎍/m^3로 조사되어 노출농도의 차이에 의해 두 나라의 사무실 내의 공기중 Benzene의 흡입에 의한 발암위해도에 차이가 발생했음을 확인할 수 있었다. Guo et al.는 그의 연구결과에서 실내공기중의 Benzene의 발암위해도는 전체 휘발성유기화합물에 의한 발암위해도의 약 40% 이상을 차지하는 것으로 보고하고 있다. 이러한 결과를 바탕으로 사무실내 휘발성유기화합물에 의한 발암위해도를 산출하면 남자의 경우 2.2×10^{-5}, 여자의 경우 1.5×10^{-5}으로 조사되어 사무실 실내공기중의 휘발성유기화합물에 대한 남여의 발암위해도는 모두 미국 환경보호청에서 권장하는 허용기준인 10^{-6}을 초과하는 것으로 조사되었다. 이와 같은 결과는 사무실 실내공기중의 휘발성유기화합물질에 대한 관리가 요구되고 있음을 시사하는 결과라 할 수 있다.

공기 중 유해공기오염물질의 흡입에 의한 건강상의 영향은 여러 요인에 의해 영향을 받을 수 있다. 즉, 오염물질의 노출량뿐만 아니라 노출빈도, 노출기간, 체중, 호흡량 및 평균수명 등의 노출인자들에 영향을 받는다고 할 수 있다. 그러나 이들 노출인자들 중 노출빈도, 노출기간, 체중, 호흡량, 및 평균수명에 대한 제어는 사무실이라는 특수 환경에서 이루어지기 힘들 것으로 여겨진다. 따라서 유해공기오염물질의 흡입으로 인한 건강상의 악영향을 예방하기 위해서는 실내 공기중 유해오염물질에 대한 농도를 저감하는 것이 가장 바람직한 것으로 여겨진다. 이러한 오염물질의 제어를 위해서는 국민의 자발적 활동을 통한 제어활동이 이루어지는 것이 가장 바람직하다할 수 있다. 그러나 최근 실내공기질에 대한 중요성이 국민들에게서 인식되어지고는 있으나 아직 미흡한 상태로 국민의 자발적 활동에 의한 제어는 현실적으로 불가능하다고 볼 수 있다. 이에 사무실내 유해공기오염물질의 흡입에 의한 건강상의 영향을 고려한 규제기준을 마련하고 관리함으로써 사무실내 유해공기오염물질 제어에 국민적 참여를 유도하는 것이 바람직하다고 생각한다.

이 연구는 과거 선행된 실내공기질 조사자료를 활용하여 국내 사무실내 기준오염물질 및 유해공기오염물질의 흡입으로 인한 건강위해도를 조사한 연구로 건강위해도 즉, 사무실 근로자들의 오염물질의 흡입으로 인한 건강상의 악영향이 발생할 가능성이 높은 것으로 조사되었으나 다음과 같은 이유에 의해 과대평가 되었을 가능성이 있는 것으로 여겨진다.

첫째, 이 연구는 과거 연구 결과 자료의 취합을 통해 오염물질의 평균농도를 산출하였다. 이는 대부분의 연구가 조사 당시 사회적으로 문제화된 시기에 수행되는 경향이 높음으로 이 연구에서 산출된 병합평균농도는 사무실 실내공기오염물질의 평균적 농도라 하기보다는 과대평가된 높은 농도를 나타낼 가능성이 높다. 즉 과대평가된 노출 농도를 활용하여 산출된 위해도의 경우 과대평가되어졌을 가능성이 높다 할 수 있다. 둘째, 과거에 조사된 노출계수 자료를 활용하여 위해도를 산출함에 있어 과대평가가 이루어졌을 가능성 또한 배제할 수 없다. 즉, 체중의 경우 1997년도에 조사된 자료로 현재의 한국인의 평균체중은 영양 및 체질 개선등에 의해 과거에 비해 증가하였을 것으로 사료되나 과거의 과소평가된 체중값을 사용함으로써 위해도 값이 과대평가 되어졌을 가능성이 있으며, 또한 발암잠재력 산출시 한국인의 평균체중으로 보정하여 활용함에 있어 낮게 산출된 평균체중값을 활용함으로써 보정된 발암잠재력의 과대평가 및 위해도의 과대평가가 이루어졌을 가능성 또한 배제할 수 없다. 이와 같이 이 연구는 과거 연구자료에 의존하여 수행된 연구로 과거자료의 빈약성 등으로 인해 산출된 결과의 의미해석에 있어 오해가 발생할 가능성이 높다. 그러나 본 연구의 수행을 통해 다음과 같은 향후 연구방향을 제시할 수 있다. 첫째, 보다 체계적이며, 장기적이고 전국적인 사무실 실내공기오염물질의 실태조사가 요구된다. 둘째, 과거 규제기준오염물질을 대상으로 수행되어져 오던 실내공기질 관련 연구에서 유해공기오염물질로의 연구 확대가 요구된다. 셋째, 국내 실정에 적합한 노출계수 개발을 위한 연구의 활성화가 요구된다.

V. 결 론

이 연구는 1990년 이후 국내 사무실의 실내공기질에 관한 연구결과들을 수집하고 메타분석법을 이용하여 국내 사무실 실내공기 중 산업보건기준에서 제시하고 있는 4개 오염물질 중 3개의 오염물질 및 휘발성유기화합물의 병합평균농도를 제시하였다. 또한 사무실 근로자들의 실내공기오염물질의 흡입에 의한 건강위해성평가를 수행함에 있어 사전조사로 이들 기준오염물질에 대한 안전계수를 조사하여 제시함으로써 사무실 근로자들로부터 기준오염물질의 노출로 인한 건강상 악영향의 발생 가능성의 정도를 제시하였으며, 유해공기오염물질로 알려져 있는 휘발성유기화합물 중 발암성물질 및 비발암성물질의 흡입으로 인한 건강위해성평가를 수행하여 그 위해의 정도를 제시하였다.

본 연구의 수행을 통해 산출된 결과를 요약하여 제시하면 다음과 같다.

첫째, 사무실의 실내공기 중 호흡성분

진의 병합평균농도는 114 ± 84 μg/m^3, 일산화탄소는 2 ± 1.6 ppm, 이산화탄소는 1,008 ± 983 ppm로 조사되었으며, 이들 중 이산화탄소만이 산업보건기준에서 정하고 있는 기준치를 초과하고 있는 것으로 조사되었다.

둘째, 휘발성유기화합물질의 사무실 실내공기 중 병합평균농도는 Benzene은 11.1 ± 13.1 μg/m^3, Toluene은 65,8 ± 79.8 μg/m^3, Ethylbenzene은 7.7 ± 9.3 μg/m^3, m-p-Xylene은 23.1 ± 25.6 μg/m^3, Stylene은 5.5 ± 5.2 μg/m^3, o-Xylene은 14.6 ± 17.9 μg/m^{3}로 조사되었다.

셋째, 기준공기오염물질에 대한 몬테카를로 분석을 이용한 건강위해성평가 결과 호흡성분진 및 이산화탄소의 안전계수가 1을 초과할 확률이 각각 36.83%, 99.12%로 사무실 실내공기중 이들 두 오염물질에 대한 제어활동이 활발히 이루어져야 할 것으로 조사되었다.

넷째, 휘발성유기화합물질에 의한 발암 및 비발암성 위해성평가 결과 발암물질인 Benzene의 흡입으로 인한 발암위해도는 남여 각각 8.9×10^{-6}, 6.1×10^{-6}으로 미국 환경보호청에서 권장하고 있는 허용기준치인 10^{-6}을 초과하는 것으로 조사되었으나, 비발암성물질인 Toluene, Ethylbenzene, m-p-Xylene, Styrene, o-Xylene의 흡입으로 인한 위해도지수는 미국 환경보호청에서 권장하고 있는 허용기준치인 1을 초과하지 않는 것으로 조사되었다.

이 연구는 과거 연구자료에 의존하여 수행된 연구로 과거자료의 빈약성 등으로 인해 산출된 결과의 의미해석에 있어 오해가 발생할 가능성이 높다. 그러나 본 연구의 수행을 통해 다음과 같은 향후 연구 방향을 제시할 수 있다. 첫째, 보다 체계적이며, 장기적인 사무실 실내공기질에 대한 실태조사가 요구된다. 둘째, 과거 기준오염물질을 대상으로 수행 되어오던 사무실 실내공기질 관련 연구에서 유해공기오염물질로의 연구 확대가 요구된다. 셋째, 규제기준오염물질의 흡입에 의한 건강상의 불편함의 유발 여부를 나타내는 지표 및 정밀한 건강위해성평가 수행의 여부와 저감방안의 설립 마련 여부의 판정에 있어 안전계수를 이용한 건강위해성 평가방법의 적극적 활용을 권장한다.

REFERENCES

김윤신, 이철민, 문정숙, 김상욱. 서울경기지역 초중고등학교 교실의 실내공기오염에 관한 연구. 한국학교보건학회지 2003;16(1):81-90

김윤신, 이철민, 김현탁. Takao Iida, Alpha Track Detector를 이용한 실내외 라돈 농도조사에 관한 연구. 한국환경위생학회지 2002;28(%):71-76

남보현, 황인조, 김동술. 분산주성분 분석을 이용한 실내환경 중 PM-10 오염의 패턴분류. 한국대기환경학회지 2002;18(1):25-37

박정균, 윤재웅. 다중 공중이용시설의 실내환경 관리 수준과 영향요인의 분석. 환경관리학회지 2003;9(1):49-56

방선재, 이철민, 김윤신, 선우 영. 중앙집중식 냉방시설의 냉각탑수중 레지오넬라균과 실내외 미생물 분포에 관한 연구. 한국환경위생학회지 2002;28(3):39-48

백성옥, 김영민. 도시지역에서의 실내외 주변공기 중 휘발성유기화합물의 농도측정에 관한 연구. 대한환경공학회지 1996;18(2):181-197

손혜향. 메타분석법. 자유아카데미; 1992.

손혜향. 의학, 간호학, 사회과학 연구의 메타분석법. 청문각; 1998.

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 농도 조사에 관한 연구. 한국대기보전학회지 1993;9(4):310-319

환경부. 노출평가지침서. 2001.

황승만, 신주희, 정진욱, 박상곤, 백성옥. 흡연 및 비흡연 사무실의 실내공기질 비교 평가. 한국대기환경추계학술대회 관동대학교 양양캠퍼스 1999.

Abbey DE, Burchette RJ, Knutsen SF, McDonnell WF, Lebowitz MD, Enright PL. Long-term particulate and other air pollutants and lung function in non-smokers. American Journal of Respiratory Critical Care Medicine 1998;158(1):289-298

Adams WC. Measurement of breathing rate and volume in routinely performed daily activities, final Report. California Air Resources Board(CARB) Contract No. A033-205. June 1993. p.185.

Akland GG, Hartwell TD, Johnson TR, Whitmore RW. Measureing human exposure to carbon monoxide in Washington, D.C and Denver, Colorado, during the winter of 1982-1983, Environmental Science and Technology 1985;19(10):911-918

Arashidani K, Yoshikawa M, Kawamoto T, Matsuno K, Kayama F, Kodama Y. Indoor pollution from heating. Industrial Heath 1996;34(3):205-215

Clayton CA, Perritt RL, Pellizzari ED, Thomas KW, Whitmore RW, Özkaynak H, Spengler JD, Wallace LA. Particle total exposure assessment methodology(PTEAM) study: distributions of aerosol and elemental concentrations in personal, indoor, and outdoor air samples in a Southern California community, Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology 1993;3(2):227-250

Coultas DB, Lambet WE. Carbon monoxide. In: Sanet JM, Spengler JD. (Eds.), Indoor Air Pollution: A Health Perspective. Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD; 1991. p.197-208

Gold DR. Indoor air pollution, Clinics in Chest Medicine 1992;13(2):215-229

Institute for Environment and Health(IEH), IEH assessment on indoor air quality in the home. Institute for Enviornment and Health, Leicester, UK, 1996.

Janssen NA, Hoek G, Brunekreef B, Harssema H, Mensink I, Zuidhof A. Personal sampling of particles in adults: relation among personal, indoor, and outdoor air concentrations. American Journal of Epidemiology 1998;147 (6):537-547

Koenig JQ, Larson TV, Hamley QS, Rebolledo V, Dumler K, Checkoway H, Wang SZ, Lin D, Pierson WE. Pulmonary lung function in children associated with fine particulate matter, Environmental Research 1993;63(1): 26-38

Lambert WE. Combustion pollution in indoor environments, In: Bardana EJ, Montanaro A. (Eds.), Indoor Air Pollution and Health. Marcel Dekker, New York;1997. p.83-103

Lee SC and M, Chang LY. Indoor air outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong, Chemosphere; 2000. p.40, p.109-113

Lende R. Health aspects related to indoor air pollution. Inter. J. Epidemiology 1980;9(3)

Madany IM. Carboxyhemoglobin levels in blood donors in Bahrain, Science of the Total Environment 1992;116(1):53-58

Maroni M, Seifert B, Lindvall T (Eds.). Indoor Air Quality-a Comprehensive Reference Book. Elsevier, Amsterdam. 1995.

Molbare, L., Indoor air pollution due to organic gases and vapors of solvents in building materials. Environ. Int. 1982.

Moriske JJ, Drews M, Ebert G, Menk G, Shceller C, Schöndube M, Konieczny L. Indoor air pollution by different heating systems: coal burning, open fireplace and central heating. Toxicology Letters 1996;88(1-3):49-354

National Academy of Sciences(NAS), Human exposure assessment for airborne pollutants, Washington DC. 1993.

National Aeronautics and Space Administration(NASA), Bioastronautics Data Book - SP 3006. NASA, Washington, D.C. 1973.

Otto DA, Hudnell HK. The use of visual and chemosensory evoked-potenials in environmental and occupational health environ. Res 1993;62(1):159-171

Roman Meininghanus, Amin Kouniali, Corinne Mandin and André Cicolella. Risk assessment of sensory irritants in indoor air-a case study in a french school, Environment International; 2003. p.28

Roughton FJW, Darling RC. The effect of carbon monoxide on the oxyhemoglobin dissociation curve. American Journal of Physiology 1994;141(1): 17-31

Scjwarzberg MN. Carbon dioxide level as migraine threshold factor: hypothesis and possible solutions. Medical Hypotheses 1993;41(1):35-36

Sisovic E, Fugas M, Sega K. Assessment of human inhalation exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology 1996; 6(4):439-447

Spengler JD, Sexton K. Indoor air pollution: a public health perspective, Science 221 (4605);1993. p.9-17

Sterling TD. Concentrations of nicotine, RSP, CO and CO_2 in non-smoking areas of offices ventilated by air recirculated from smoking designated areas. American Industrial Hygiene Association Journal 1991;52(10): 564-565

Stewart RD, Peterson JE, Baretta ED, Bachand RT, Hosko MJ, Herrmann AA. Experimental human exposure to carbon monoxide. Archives of Environmental Health 1970;21(2): 154-164

Stolwijk JA. Risk assessment of acute health and comfort effects of indoor air pollution. Annals of the New York Academy of Sciences 641, p.56-62.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Risk assessment guidance for superfund(RAGS) : volume Ⅰ. human health evaluation manual(HHEM), Office of emergency and remedial response, EPA/540/1-89/002, 1989.

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.