

다양한 사무실 실내환경에서의 휘발성유기화합물의 농도분포 특성

Distributional Characteristics of Volatile Organic Compounds in the Indoor Air of Various Office Environments

백 성 옥* · 전 찬 곤

영남대학교 환경공학과 대기환경연구실

(2014년 8월 14일 접수, 2014년 9월 24일 수정, 2014년 9월 26일 채택)

Sung-Ok Baek* and Chan-Gon Jeon

Department of Environmental Engineering, Yeungnam University

(Received 14 August 2014, revised 24 September 2014, accepted 26 September 2014)

Abstract

This study was carried out to evaluate the concentration variations of volatile organic compounds (VOCs) in the office environments located in a large urban area with respect to seasonality, smoking status, types of ventilation and heating. Indoor air sampling was undertaken in 37 and 30 offices in Daegu city during summer and winter, respectively. The VOC samples were collected using adsorbent tubes, and were determined by thermal desorption coupled with GC/MS analysis. The analytical method was validated for repeatability, method detection limits (MDL), and duplication precision. A total of 34 VOCs of environmental concern were determined, including 15 aromatics and 19 halogenated hydrocarbons. Average concentrations of BTEX appeared to 1.91 ppb, 22.98 ppb, 3.44 ppb, and 3.70 ppb, respectively. These values were relatively higher levels than those measured at homes and outdoor roadsides reported by other researches. In general, the concentrations of VOCs were higher in winter than summer, in smoking offices than non-smoking offices, in forced ventilation type than natural ventilation type, and in combustion heating than non-combustion heating offices. However, such differences were not always significant at a level of 0.05 by statistical tests (t-test and/or Mann-Whitney test) with some exceptions for BTEX and styrene. This study demonstrated that smoking status, ventilation type and presence of combustion sources indoors could be important factors on the elevated concentrations of some VOCs in the office environment.

Key words : VOC, IAQ, Smoking, Office, GC/MS

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)53-810-2544, E-mail : sobaek@yu.ac.kr

1. 서 론

실내공기오염이란 인간활동에 의해 발생하는 각종 오염물질이 방출되어 실내환경을 오염시키는 현상을 말한다. 생활 패턴의 변화 및 실내 거주시간의 증가 등으로 사람들이 상시적으로 노출되는 공기의 오염은 결국 실내 거주자의 건강에 영향을 줄 수 있다. 그러나 대부분의 사람들은 실내오염에 의한 인체영향이 실외의 대기오염보다 더욱 중요하다는 사실을 간과하는 경향이 있으며, 아직도 다양한 실내공기오염물질의 특성과 종류에 대해서도 정확히 파악하고 있지는 못한 실정이다(Kim *et al.*, 2001).

실내공기가 인간의 건강과 관련지어 대기오염보다 더욱 중요한 이유는 첫째, 인간은 하루 24시간 중 80% 이상을 실내에서 생활하는 것으로 조사·보고되고 있으며, 둘째, 대기오염은 자연적인 희석률이 크고 대기오염에 대한 사회적 인식, 각종 규제로 인하여 억제되고 있으나, 실내공기는 한정된 공간에서 오염물질이 축적되어 그 농도가 증가할 수 있다. 셋째, 1970년대 이후 에너지 보존을 위한 다양한 산업기술이 만들어 낸 새로운 건축자재가 공공건물뿐만 아니라 일반주택에도 사용되고 있는데, 새로운 건축자재에서의 외의 오염물질이 방출하게 된다. 또한, 경제수준의 향상으로 다양한 생활용품의 사용이 증가하는데, 이와 같은 생활용품에도 뜻밖의 오염물질이 방출될 수 있다. 마지막으로, 에너지 절약을 위해 건물의 밀폐화가 진행되면서 건물 내 거주자들이 일시적 또는 만성적인 건강과 관련된 증상을 호소하는 사례가 증가되고 있다는 점 등이다(Kim, 1993).

세계보건기구(WHO)에 의하면 실내공기오염에 의한 사망자는 공기오염 때문에 숨지는 전체 사망자 수의 약 50%에 이르며 특히 개도국의 경우 영·유아사망의 주요 원인 가운데 하나로 지적한 바 있으며, 실내에서 방출되는 오염물질이 실외의 그것보다 사람의 폐에 전달될 확률이 약 천 배 가량 높아 실내오염도를 20%만 줄여도 급성 기관지질환 사망률을 최소한 4~8%를 줄일 수 있다고 보고한 바 있다(WHO, 1991).

1970년대 이후 많은 나라에서 사무실 근로자와 학생들 사이에서 비특이성 임상증상 즉, 빌딩증후군(Sick Building Syndrome)을 호소하는 경우가 많았으

며 아직까지 이에 대한 명확한 원인을 밝히지는 못하고 있으나 실내공기 중의 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, 이하 VOCs)로 인한 영향이 많은 원인 중의 하나일 것으로 추정하고 있다(WHO, 2000). 실내환경에서 VOCs는 주로 건축자재나 유기용제, 사무용품 등에서 발생하며, 가스나 석유를 사용하는 난로 등도 주요 발생원이다. 담배연기에도 많은 종류의 VOCs가 포함되어 있으므로 흡연이 허용되는 사무실에서는 담배연기 역시 VOCs를 발생하는 주요 원인이 될 수 있다(Baek and Jenkins, 2004, 2001; National Research Council, 1986). 따라서 사무실이나 가정과 같은 일반 실내 환경에서 담배연기가 VOC 농도에 미치는 영향의 정도는 많은 사람들의 관심의 대상이 되어왔다(Baek *et al.*, 1997; Daisey *et al.*, 1994).

국내의 경우 일산화탄소, 질소산화물, 아황산가스, 이산화탄소, 부유먼지 등과 같은 기존성 오염물질에 대한 실내공기오염도를 조사한 연구는 그 사례를 많이 찾을 수 있으나(Baek *et al.*, 1999b; Song *et al.*, 1998; Baek *et al.*, 1998; Song *et al.*, 1996; Shin *et al.*, 1990) 최근 사회적 문제가 되고 있는 새집(건물)증후군이나 새학교증후군의 원인물질로 알려진 VOCs에 대한 측정연구는 그리 많지 않다(Song *et al.*, 1998; Baek *et al.*, 1997). 특히 사무실 환경에서의 흡연유무와 공조시스템에 따른 VOC 농도를 비교·분석한 연구는 매우 드문 실정이다. 이러한 측면을 고려하여 본 연구에서는 독성이 강한 방향족 및 할로겐화탄화수소를 포함한 30여종의 주요 VOCs를 대상으로 대도시 일반 사무실에서 근무자가 노출될 수 있는 실내공기 중 VOCs 농도를 측정하여 계절요인과 흡연유무 및 냉방과 난방방식에 따른 농도변동 특성 및 그에 영향을 미치는 실내 환경인자를 규명하고자 하였다.

국내에서는 1990년대 이후 환경문제에 대한 국민 의식의 제고와 비흡연자들의 간접흡연에 대한 관심이 고조되면서 정부에서는 1995년 9월 국민건강증진법을 발효하여 공공장소 등에서의 흡연을 규제하고, 흡연구역 설치를 의무화한 바 있다. 그리고 최근에는 공공장소뿐만 아니라 많은 민간건물에서도 건물 내 실내공간에서의 흡연을 금하고 있어 간접흡연으로 인한 피해를 줄이고자 노력하고 있다. 그러나 2000년대 초반까지만 해도 공공시설이 아닌 일반 사무실 환경에서는 간접흡연으로 인한 영향을 배제할 수 없는 실정이었다. 본 논문은 당초 1999년에서 2000년

의 1년간 대구와 대전에 소재한 각종 유형의 사무실 (총 65개소)을 대상으로 흡연으로 인한 환경담배연기 (environmental tobacco smoke, 이하 ETS)가 실내공기 질에 미치는 영향을 파악하고자 수행된 연구에서 얻어진 자료를 근거로 작성되었다. 실내공기질의 평가 항목 중 ETS 성분 및 부유먼지 항목은 대전과 대구 모두에서 측정하였으나 VOCs 항목은 내부 사정상 대구지역 사무실에 한하여 측정되었다. 연구결과 중 ETS가 사무실 내 부유먼지에 미치는 영향에 관한 부분은 이미 학술지에 보고된 바(Baek and Park, 2004) 있으나 VOCs 관련 부분은 아직 발표하지 못한 상태였다. 비록 자료가 얻어진 시점은 오래되었으나 최근에는 흡연사무실을 찾기 힘든 상태에서 흡연이 실내 VOCs 농도에 미치는 영향을 실제 상황을 대상으로 조사한 사례는 여전히 학술적으로 가치가 있을 것으로 판단하여 논문을 투고하기에 이르렀으므로 논문 작성 배경에 대한 독자들의 이해가 요망된다.

2. 연구 방법

2.1 시료채취 지점 및 기간

본 연구에서는 대구지역에 위치한 공공건물, 일반 사무실, 학교 교무실 등 다양한 사무실 환경을 대상으로 여름철과 겨울철 두 계절에 대하여 각 40개의 장소를 섭외하였다. 이 때 사무실에서의 흡연 허용 유무에 따라 조사 대상 사무실을 흡연과 비흡연 그룹으로 구분하였다. 일부 사무실의 경우 두 계절 사이에 이전하거나 내부 사정으로 측정이 허용되지 않는 경우가 있었으며, 결과적으로 여름철의 경우 총 37개소(흡연 21개소, 비흡연 16개소), 겨울철은 총 30개소(흡연 18개소, 비흡연 12개소)에서 VOCs 시료를 채취하였다. 여름철 측정은 1999년 8월에서 9월에 걸친 두 달간 수행되었으며, 겨울철 측정은 1999년 12월에서 2000년 1월의 기간에 걸쳐 여름철과 동일한 장소

를 대상으로 하였다. 모든 시료는 측정장소별로 일반 사무원이 근무하는 시간대인 오전 9시부터 오후 6시까지 약 8시간 동안 채취되었다. 표 1에 시료채취장소에 대한 상세한 내용을 나타내었다.

2.2 VOCs 시료채취방법

VOCs 시료는 개인 휴대용 펌프(personal sampler)인 SKC Double Take Sampler(SK Inc., USA)를 사용하여 약 25~30 mL/min의 유량으로 8시간 동안 채취하였다. 시료채취매체는 stainless steel column (1/4" × 9 cm, Perkin Elmer, UK)에 흡착제로서 전단에 약 100 mg의 Carbotrap-C를 충전하고 후단에 약 300 mg의 Carbotrap을 충전한 흡착관을 사용하였다. VOCs 용 흡착관은 시료를 채취하기 전에 He 기체 유량 100 mL/min 조건에서 250°C에서 2시간, 그리고 300°C에서 2시간 정도 전처리(conditioning)한 후 사용하였다. 실제 현장에서는 조사대상 사무실을 공간 면적으로 대략 양분하여 두 지점에서 각각 시료를 채취하였으며, 시료채취장비는 모두 근무자의 호흡영역(바닥으로부터 약 1.5 m)을 포함할 수 있는 위치에 설치하였다. 각 사무실에서 얻어진 두 측정 결과의 평균치를 해당 사무실의 당일의 대표값으로 사용하였다.

2.3 VOCs 분석방법

본 연구에서는 측정대상 VOCs는 환경대기 중 출현빈도가 높고 환경보건학적 관심사가 높은 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠 및 자일렌 등 방향족 계통과 독성이 강한 C₁~C₂ 할로젠화탄화수소 등을 포함하여 총 34개의 VOCs를 대상으로 분석하였다. VOCs 시료의 분석은 400°C까지 승온 가능한 자동열탈착장치(ATD-400, Perkin Elmer, UK)가 GC칼럼(Rtx-502.2, 0.32 mm × 105 m × 1.80 μm)으로 직접 연결된 HP GC/MS(HP 6890/5973)을 사용하여 정성·정량 하였다. 흡착관에 채취된 분석대상 VOCs는 일차적으로 300°C에서 80 mL/min의 유량(운반가스, He)으로 10분간 열탈착하

Table 1. Classification of offices investigated in this study.

	Summer (n=37)				Winter (n=30)				Total
	Public office	Private office	School office	Sub-total	Public office	Private office	School office	Sub-total	
Smoking	2	19	0	21	2	16	0	18	39
Non-smoking	8	6	2	16	8	3	1	12	28
Total	10	25	2	37	10	18	1	30	67

였다. 이렇게 일차적으로 탈착된 시료는 저온응축트랩(cold trap)에서 농축된 후 약 4초 이내에 350°C까지 급속 가열되는 2차 열탈착을 통해 GC 분석칼럼으로 주입된다. GC의 오븐온도는 초기에는 10분간 30°C를 유지하다가 5°C/min의 온도 경사를 주어 230°C까지 승온시키며 마지막 온도 230°C에서 5분 정도 머물게 한 후 분석을 종결하였다. 열탈착 장치의 모든 valve와 transfer line의 온도는 200°C로 유지하였으며, 칼럼 주입부의 압력은 15 psi로 고정하였다.

시료의 정성 및 정량을 위하여 사용한 표준물질은 VOCs 표준혼합용액(VOC Mix 1, 2, 7, 8, Supelco, USA)을 기화시켜 사용하였으며, 서로 다른 농도 수준의 표준시료를 마련하여 GC/MS의 재현성과 검출한계 추정 등 일련의 정도관리 목적의 실험을 수행하였다. 액상표준시료를 흡착관으로 함침시키기 위하여 GC의 충전칼럼 injector를 사용하였으며, 이에 대한 상세한 내용은 기존 문헌(Baek *et al.*, 1999a)에서 찾을 수 있다. VOCs 농도는 내부표준물질을 이용한 내부보정법으로 정량하였다. 즉, 분석 전에 혼합표준용액이 흡착된 표준시료와 실제 현장시료에 흡착관당 각각 50, 250, 100, 50 ng인 d_6 -benzene, d_8 -toluene, d_{10} -ethylbenzene, d_5 -bromobenzene 등 4종의 중수소치환(deuterated)물질(Aldrich, USA)을 주입하였다.

2. 4 분석정도관리

본 연구에서는 GC/MS를 이용한 VOCs 분석방법의 재현성을 평가하기 위하여 전처리된 깨끗한 흡착관에 각각 100, 200, 500, 1,000 ng의 표준시료를 함침하여 현장시료와 랜덤하게 혼합하여 분석하였다. 각 수준별 4개의 흡착관을 준비하여 총 16개의 표준시료를 분석하여 기기의 분석감도를 평가하였으며, 정도관리 실험의 상세한 결과는 표 2에 나타내었다. 총 34개 VOCs 물질에 대한 기기 감응계수의 상대표준편차는 전반적으로 30% 이하의 수준으로 나타나 미국 EPA의 흡착관법에 의한 VOCs 분석방법인 TO-17에서 권장하고 있는 불확도 목표치 30% 수준을 대체로 만족하는 것으로 나타났다(USEPA, 1997). 기기분석의 감도평가의 또 하나의 방법인 측정대상물질에 대한 검출한계를 파악하기 위하여 본 연구에서는 방법 검출한계(MDL)를 추정하였다. 방법검출한계에 대한 상세한 내용은 기존 문헌에서 찾을 수 있다(USEPA, 1997). MDL 추정을 위해 매우 낮은 수준인 표준물질

각 10 ng을 7개의 흡착관에 각각 함침하여 현장시료 분석조건과 동일한 조건에서 분석하였다. 이와 같이 추정된 질량 검출한계에 대하여 실제 현장 공기 시료 채취량의 평균값 15 L로 나누어 ppb 농도로 환산하여 표 2에 수록하였다. 결과적으로 개별 물질에 따라 다소 차이는 있으나 추정된 MDL의 범위는 0.01~0.17 ppb로 나타났다.

일반적으로 미국 EPA의 TO-17 방법에 의하면 시료채취과정의 타당성을 검토하기 위하여 동일한 지점에서 동일한 조건으로 시료를 채취하여 동일한 방법으로 분석된 두 시료는 이론적으로 동일한 결과를 나타내어야 한다고 언급하고 있다. 이때 두 시료 간의 일치성을 중복재현성(duplicate precision)이라 정의하며, 두 시료의 농도차이를 두 시료의 평균값에 대한 백분율로 나타낸 값을 의미한다. 본 연구에서 채취한 모든 현장시료에 대하여 중복 재현성을 평가한 결과, 34개 VOCs 중 7개 물질을 제외하고는 모두 30% 이내의 재현성을 나타내어 비교적 양호한 것으로 평가되었다. 측정물질 중 일부 할로젠화탄화수소는 대부분 검출한계 이하의 낮은 농도(검출빈도 5% 이하)로 나타나 중복재현성을 계산할 수 없었다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 흡연유무에 따른 VOCs의 계절별 농도분포

본 연구에서 측정한 총 34개 VOCs 전체 자료 중 검출빈도가 10% 이하의 물질을 제외한 20개 물질에 대한 계절별 흡연유무에 따른 통계처리의 요약된 결과 중 여름철과 겨울철 자료를 구분하여 표 3에 나타내었다. 검출한계 이하로 나타난 VOCs 자료에 대해서는 통계처리 시에 편의상 표 2에 나타낸 검출저한계값(MDL)의 1/2 값을 대입하여 계산하였다(Jenkins *et al.*, 1996).

전반적으로 사무실에서 측정된 VOCs 농도의 표준편차가 큰 것은 시료채취지점의 실내환경 규모, 환기 상태, 환기속도, 냉·난방형태, 흡연자수, 흡연담배개피수, 흡연의 시간적 간격, 다른 배출원의 공존, 조명, 온도, 상대습도, 공기혼합속도, 실내장치, 채광 등의 여러 요인들에 의한 영향을 받기 때문인 것으로 추측된다. 즉, 표준편차가 크다는 것은 실내공기질의 변화가 심하여 VOCs의 농도분포 범위가 넓다는 것을

Table 2. Performance evaluation of VOCs sampling and analytical methods used in this study.

VOC	Repeatability ^{a)} (%)	MDL ^{b)} (ppb)	Data less than MDL (%)	Duplicate precision ^{c)} (%)
Chloroform	23.0	0.06	97.8	4.9
1,2-Dichloroethane	25.6	0.11	97.8	1.4
1,1,1-Trichloroethane	23.2	0.06	35.1	26.6
Benzene	15.8	0.03	0	21.1
Carbon tetrachloride	27.8	0.05	15.7	42.1
1,2-Dichloropropane	16.8	0.09	100	N.A. ^{d)}
Bromodichloromethane	27.2	0.06	100	N.A.
Trichloroethylene	20.6	0.17	17.9	26.3
Toluene	15.0	0.02	0	18.0
Dibromochloromethane	28.2	0.07	100	N.A.
Tetrachloroethylene	16.0	0.02	76.9	16.9
Chlorobenzene	10.8	0.02	63.4	45.3
Ethylbenzene	24.6	0.01	0	25.6
Bromoform	27.0	0.04	100	N.A.
<i>m</i> + <i>p</i> -Xylenes	17.2	0.01	0	40.9
Styrene	12.1	0.02	0	42.9
<i>o</i> -Xylene	14.6	0.01	0	25.2
<i>iso</i> -Propylbenzene	23.6	0.01	3.0	36.8
Bromobenzene	10.9	0.03	100	N.A.
2-Chlorotoluene	19.6	0.03	99.3	N.A.
4-Chlorotoluene	19.2	0.03	99.3	N.A.
<i>n</i> -Propylbenzene	26.4	0.03	17.2	36.5
1,3,5-Trimethylbenzene	12.1	0.01	0	26.7
<i>tert</i> -Butylbenzene	4.8	0.04	100	N.A.
1,2,4-Trimethylbenzene	24.2	0.01	0	26.4
1,3-Dichlorobenzene	17.8	0.02	53.8	53.3
1,4-Dichlorobenzene	18.0	0.02	93.3	16.7
<i>sec</i> -Butylbenzene	14.9	0.01	26.1	26.0
<i>p</i> - <i>iso</i> -Propyltoluene	22.7	0.01	0.7	24.9
1,2-Dichlorobenzene	17.3	0.02	91.0	12.8
<i>n</i> -Butylbenzene	26.9	0.01	52.2	26.0
1,2,4-Trichlorobenzene	18.9	0.02	100	N.A.
Naphthalene	24.9	0.01	0	27.3
1,2,3-Trichlorobenzene	15.6	0.02	99.3	N.A.

^{a)}Repeatability was expressed as a range of percent relative standard deviation of response factor for 5 replicate analyses of absorbent tubes which were spiked with target analytes at a level of 100, 200, 500, and 1,000 ng per tube, respectively.

^{b)}Method detection limits were estimated based on the precision of 7 replicate analyses of absorbent tubes spiked with target analytes at a level of 10 ng per tube. Method detection limits in concentrations units were calculated for average air volume of 15 liters for field samples.

^{c)}Mean duplicate precision is an average of duplicate precision for each pair, and duplicate precision is defined as a percent value of a difference between the measured concentrations of duplicate samples for the mean concentrations of two samples. Data values below the MDL were replaced with a half of the MDL for each analyte, and then included in calculation.

^{d)}Not applicable since more than 98% of data were below the detection limits.

의미한다. 본 연구에서는 사무실 내 VOCs 농도의 변동에 영향을 주는 위와 같은 많은 잠재적 요인 중 흡연유무와 냉·난방형태를 위주로 평가하였다.

한편, 이들 자료의 전체적인 자료 분포의 이해를 돕기 위하여 주요 VOCs에 대하여 흡연을 고려하지 않은 두 계절의 측정결과의 누적확률분포를 비교한 결과는 그림 1에, 그리고 같은 방식으로 계절별 구분

없이 흡연유무에 따른 측정 결과의 비교는 그림 2에 각각 나타내었다. 자료의 분포가 광범위한 관계로 농도자료는 모두 log scale로 나타내었다. 또한 이들 두 그림을 혼합하여 흡연 유무에 따른 계절별 농도분포의 비교는 그림 3에 나타내었다.

먼저, 그림 1을 살펴보면 카본테트라클로라이드를 제외하고는 대부분의 VOCs 농도는 겨울철이 여름철

Table 3. Comparison of VOCs concentrations (in ppb) with respect to the smoking status in summer and winter.

VOC	Summer												S/N ratio ^{a)}	t-test p	M-test ^{b)} p
	Smoking (n=42)					Non-smoking (n=32)									
	Mean	Median	S.D.	Min.	Max.	Mean	Median	S.D.	Min.	Max.					
1,1,1-Trichloroethane	0.49	0.20	0.56	<MDL	1.53	0.44	0.23	0.62	<MDL	2.04	0.9	0.817	0.837		
Benzene	1.67	1.78	0.57	0.82	2.88	1.39	1.11	0.65	0.72	3.02	1.6	0.167	0.053		
Carbon tetrachloride	1.96	0.78	3.74	<MDL	15.14	1.53	0.49	2.77	<MDL	11.16	1.6	0.705	0.806		
Trichloroethylene	0.68	0.31	0.87	<MDL	2.82	0.37	0.15	0.48	<MDL	1.51	2.1	0.207	0.126		
Toluene	20.35	16.29	20.18	5.35	103.65	14.80	12.01	10.07	4.85	43.11	1.4	0.321	0.198		
Tetrachloroethylene	0.05	0.03	0.08	<MDL	0.37	0.03	0.01	0.04	<MDL	0.11	3.0	0.327	0.183		
Chlorobenzene	0.05	0.04	0.03	<MDL	0.13	0.05	0.05	0.04	<MDL	0.12	0.8	0.727	0.733		
Ethylbenzene	3.76	1.82	8.94	0.84	42.61	1.60	1.40	1.17	0.65	4.79	1.3	0.345	0.095		
<i>m</i> + <i>p</i> -Xylenes	4.39	3.37	2.42	1.80	8.66	2.62	2.53	1.22	1.11	4.85	1.3	0.007	0.020		
Styrene	0.51	0.42	0.34	0.19	1.85	0.34	0.29	0.24	0.11	1.18	1.4	0.108	0.590		
<i>o</i> -Xylene	2.83	1.42	6.11	0.65	29.33	1.34	1.09	0.98	0.47	4.13	1.3	0.343	0.137		
<i>iso</i> -Propylbenzene	0.12	0.06	0.25	0.03	1.21	0.06	0.04	0.03	<MDL	0.11	1.5	0.299	0.093		
<i>n</i> -Propylbenzene	0.17	0.14	0.13	<MDL	0.52	0.10	0.07	0.10	<MDL	0.42	2.0	0.086	0.047		
1,3,5-Trimethylbenzene	0.24	0.23	0.09	0.04	0.42	0.21	0.14	0.14	0.07	0.53	1.6	0.403	0.145		
1,2,4-Trimethylbenzene	0.84	0.78	0.34	0.21	1.56	0.68	0.51	0.45	0.25	1.83	1.6	0.240	0.068		
1,3-Dichlorobenzene	0.06	0.03	0.07	<MDL	0.29	0.06	0.04	0.05	<MDL	0.17	0.8	0.874	0.350		
<i>sec</i> -Butylbenzene	0.02	0.02	0.02	<MDL	0.05	0.02	0.01	0.03	<MDL	0.09	2.0	0.997	0.590		
<i>p</i> - <i>iso</i> -Propyltoluene	0.08	0.07	0.03	0.03	0.16	0.07	0.06	0.04	0.03	0.14	1.2	0.625	0.477		
<i>n</i> -Butylbenzene	0.12	0.01	0.27	<MDL	0.80	0.04	0.01	0.10	<MDL	0.42	1.0	0.219	0.394		
Naphthalene	1.19	0.98	0.77	0.28	3.87	2.11	1.01	2.52	0.39	8.52	1.0	0.179	0.635		

VOC	Winter												S/N ratio	t-test p	M-test p
	Smoking (n=36)					Non-smoking (n=24)									
	Mean	Median	S.D.	Min.	Max.	Mean	Median	S.D.	Min.	Max.					
1,1,1-Trichloroethane	0.59	0.28	1.25	<MDL	5.50	0.61	0.44	0.59	<MDL	1.99	0.6	0.959	0.330		
Benzene	2.60	2.15	1.31	1.39	5.75	1.99	1.48	1.14	0.90	4.08	1.5	0.196	0.042		
Carbon tetrachloride	0.25	0.23	0.10	<MDL	0.40	0.41	0.31	0.31	<MDL	1.20	0.7	0.101	0.079		
Trichloroethylene	0.77	0.43	0.67	0.23	2.63	1.42	1.16	1.39	0.16	5.26	0.4	0.094	0.175		
Toluene	27.07	21.52	13.54	13.24	62.04	32.33	23.95	33.48	13.97	137.02	0.9	0.553	1.000		
Tetrachloroethylene	0.02	0.01	0.04	<MDL	0.19	0.02	0.01	0.02	<MDL	0.08	1.0	0.787	0.694		
Chlorobenzene	0.01	0.01	0.01	<MDL	0.04	0.01	0.01	0.01	<MDL	0.01	1.0	0.424	0.414		
Ethylbenzene	3.95	2.09	6.44	0.69	27.37	4.58	1.66	8.93	0.84	32.55	1.3	0.823	0.687		
<i>m</i> + <i>p</i> -Xylenes	3.71	3.76	1.32	1.59	5.64	3.94	3.43	1.55	2.26	7.50	1.1	0.669	0.832		
Styrene	0.40	0.35	0.17	0.20	0.78	0.29	0.25	0.10	0.16	0.49	1.4	0.042	0.068		
<i>o</i> -Xylene	3.28	1.55	5.62	0.44	24.60	2.93	1.23	6.15	0.66	22.42	1.3	0.873	0.182		
<i>iso</i> -Propylbenzene	0.20	0.09	0.28	0.03	1.06	0.15	0.09	0.20	0.03	0.76	1.0	0.578	0.899		
<i>n</i> -Propylbenzene	0.39	0.27	0.39	0.04	1.52	0.29	0.25	0.17	0.11	1.14	1.1	0.417	0.799		
1,3,5-Trimethylbenzene	0.60	0.45	0.60	0.11	2.27	0.43	0.35	0.28	0.15	1.06	1.3	0.369	0.703		
1,2,4-Trimethylbenzene	1.96	1.46	1.93	0.37	7.72	1.59	1.20	1.31	0.52	5.26	1.2	0.566	0.611		
1,3-Dichlorobenzene	0.03	0.02	0.04	<MDL	0.14	0.06	0.05	3.57	<MDL	0.12	0.4	0.057	0.009		
<i>sec</i> -Butylbenzene	0.12	0.07	0.16	<MDL	0.66	0.08	0.07	0.06	0.02	0.21	1.0	0.353	0.718		
<i>p</i> - <i>iso</i> -Propyltoluene	0.21	0.15	0.19	0.06	0.76	0.21	0.21	0.15	0.07	0.60	0.7	0.983	0.596		
<i>n</i> -Butylbenzene	0.28	0.15	0.35	0.04	1.39	0.26	0.15	0.30	0.05	1.14	1.0	0.880	0.983		
Naphthalene	2.96	2.04	2.71	0.98	12.62	3.50	3.30	2.24	0.66	8.34	0.6	0.568	0.290		

^{a)}Ratio of median concentrations of VOCs for smoking to non-smoking occurred during sampling; ^{b)}Mann-Whitney Test.

에 비해 농도가 높았으며, 특히 표 3에서 볼 수 있듯이 겨울철 흡연 사무실의 경우 몇몇 할로겐화탄화수소를 제외하고는 대부분 VOCs의 농도가 비흡연 사

무실에 비해 높은 것을 알 수 있다. 할로겐화탄화수소는 주로 유기용제 사용과 관련있는 물질이므로 흡연과는 비교적 무관한 것으로 사료된다. 이와 같이 전

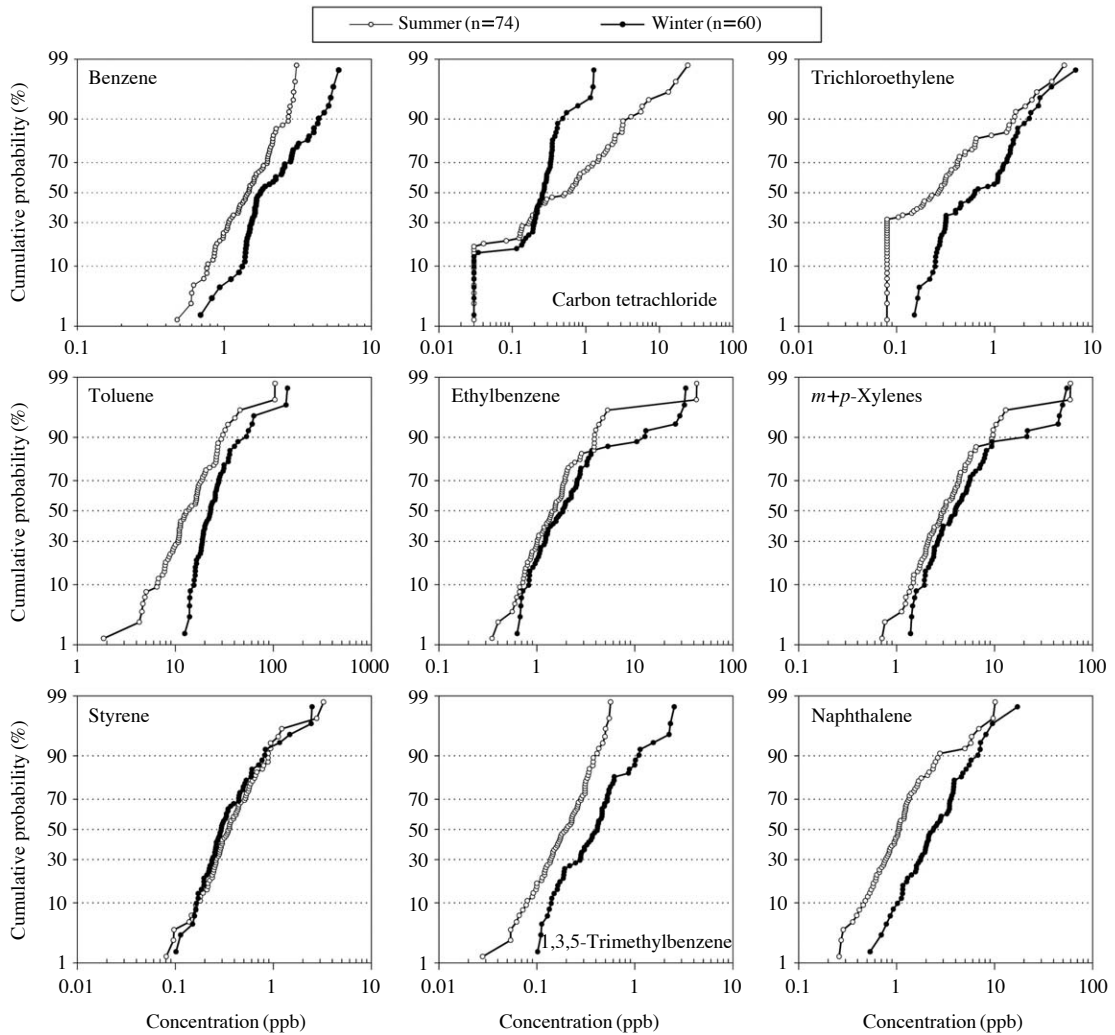


Fig. 1. Comparison of cumulative distributions of VOCs concentrations in summer and winter.

반적으로 겨울철 VOCs 농도가 여름보다 높은 것은 겨울철은 비교적 환기가 억제된 상태에서 흡연 이외의 난방관련 연소원에서 배출되는 VOCs의 영향이 있는 것으로 추정된다. 겨울철 비흡연 그룹의 VOCs 농도(표 3의 하단)가 여름철 흡연그룹의 VOCs 농도(표 3의 상단)보다 오히려 높게 나타나는 경향이 있다는 점도 이러한 추정의 타당성을 뒷받침하고 있다.

측정대상 VOCs 중 톨루엔은 20 ppb 내외의 농도로 배출강도가 다른 물질에 비해 높았으며, 그 분포 범위 또한 5~139 ppb로 나타나 사무실 환경에 따라 톨루

엔의 배출원(실외 유입 포함)이 매우 다양함을 알 수 있었다. 매우 중요한 VOCs 중의 하나인 벤젠은 겨울철 흡연 사무실 그룹의 평균농도가 2.60 ppb로서 4개의 그룹 중 가장 높은 농도로 나타나 인체에 암을 유발시킬 수 있는 VOCs 물질의 농도 증가에 흡연이 기여할 수 있다는 것을 시사한다. 비교적 독성이 강한 할로겐화탄화수소 19개 물질 중 12개 물질의 검출빈도가 0~10% 수준이었으며, 나머지 7개 물질은 10~20%의 검출빈도를 보였다. 검출된 물질의 경우 대부분이 1 ppb 이하로서 매우 낮은 수준이었으나 카

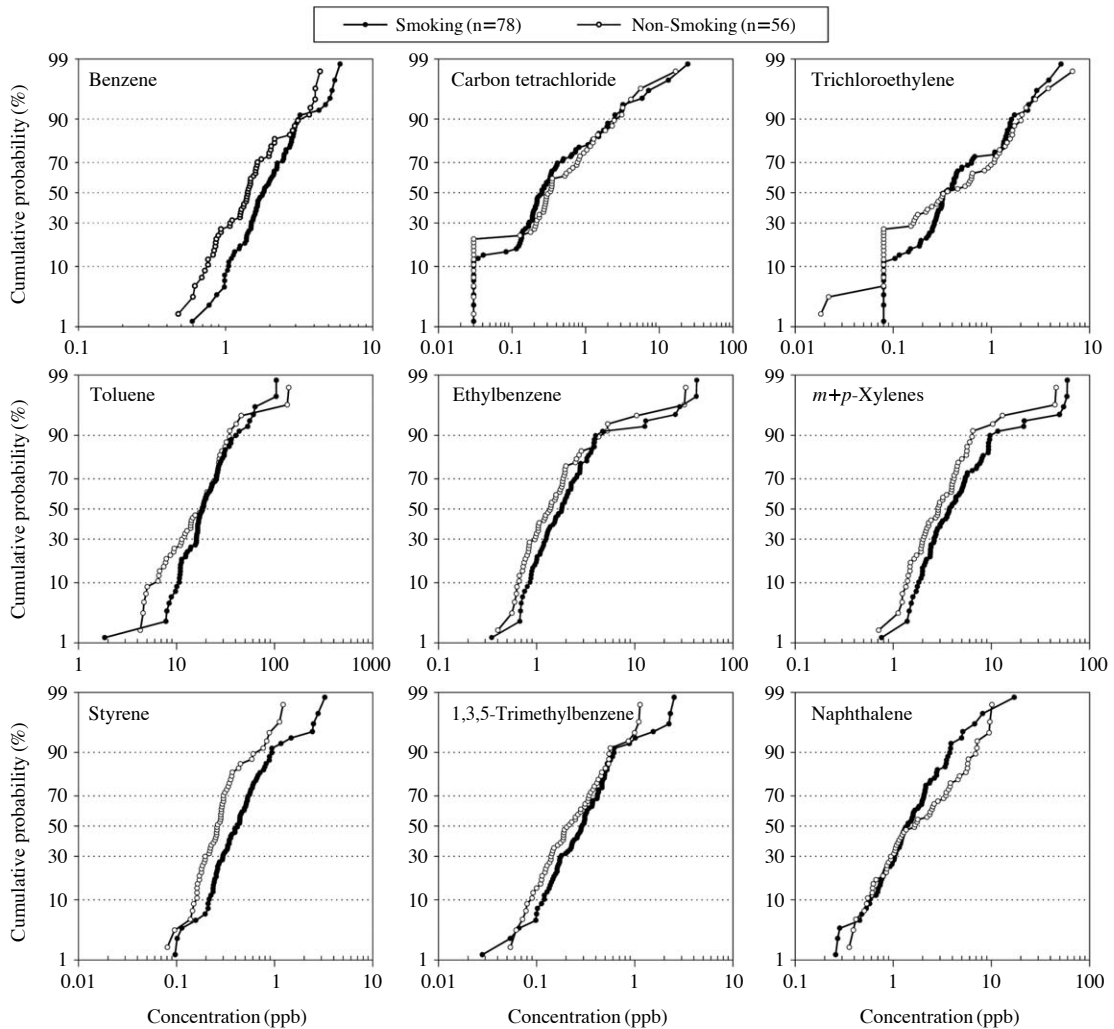


Fig. 2. Comparison of cumulative distributions of VOCs concentrations in smoking and non-smoking offices.

본테트라클로라이드의 경우 여름철의 농도가 2 ppb 내외로 겨울철에 비해 농도가 높은 것으로 나타났다. 이 물질은 주로 냉매나 소화제로 사용되는 물질로서 흡연과는 무관하며 연소원에서 배출되는 물질도 아닌 것으로 알려져 있다(Baek and Jenkins, 2004). 따라서 측정 당시에는 아직 에어컨 냉매로 카본테트라클로라이드가 사용되고 있었으며 사무실 에어컨의 냉매 누기 등으로 인하여 농도가 높게 나타난 것으로 사료된다.

실내환경에서 검출된 VOCs 물질 중 BTEX 계통(15개 물질)은 70~100%의 검출빈도를 보였으며, 그

중 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스타이렌, 트리메틸벤젠(1,3,5-, 1,2,4-), 나프탈렌은 100%의 검출빈도를 보였으며 농도 또한 다른 물질에 비해 높아 실내 공기질을 제어하는 데 있어 이러한 물질들에 대한 우선 관리가 되어야 한다고 사료된다.

본 연구에서는 두 그룹 간의 대표값을 비교함에 있어서 산술평균값은 t-test를 적용하고, 중앙값은 Mann-Whitney test(일명 Wilcoxon Rank Sum test, 이하 M-W test)라는 비모수검정법을 이용하여 두 그룹 간의 대표값의 차이에 대한 통계적 유의성($\alpha=5\%$)을 검정하였으며, 그 결과는 표 3에 수록하였다. 여름철과 겨

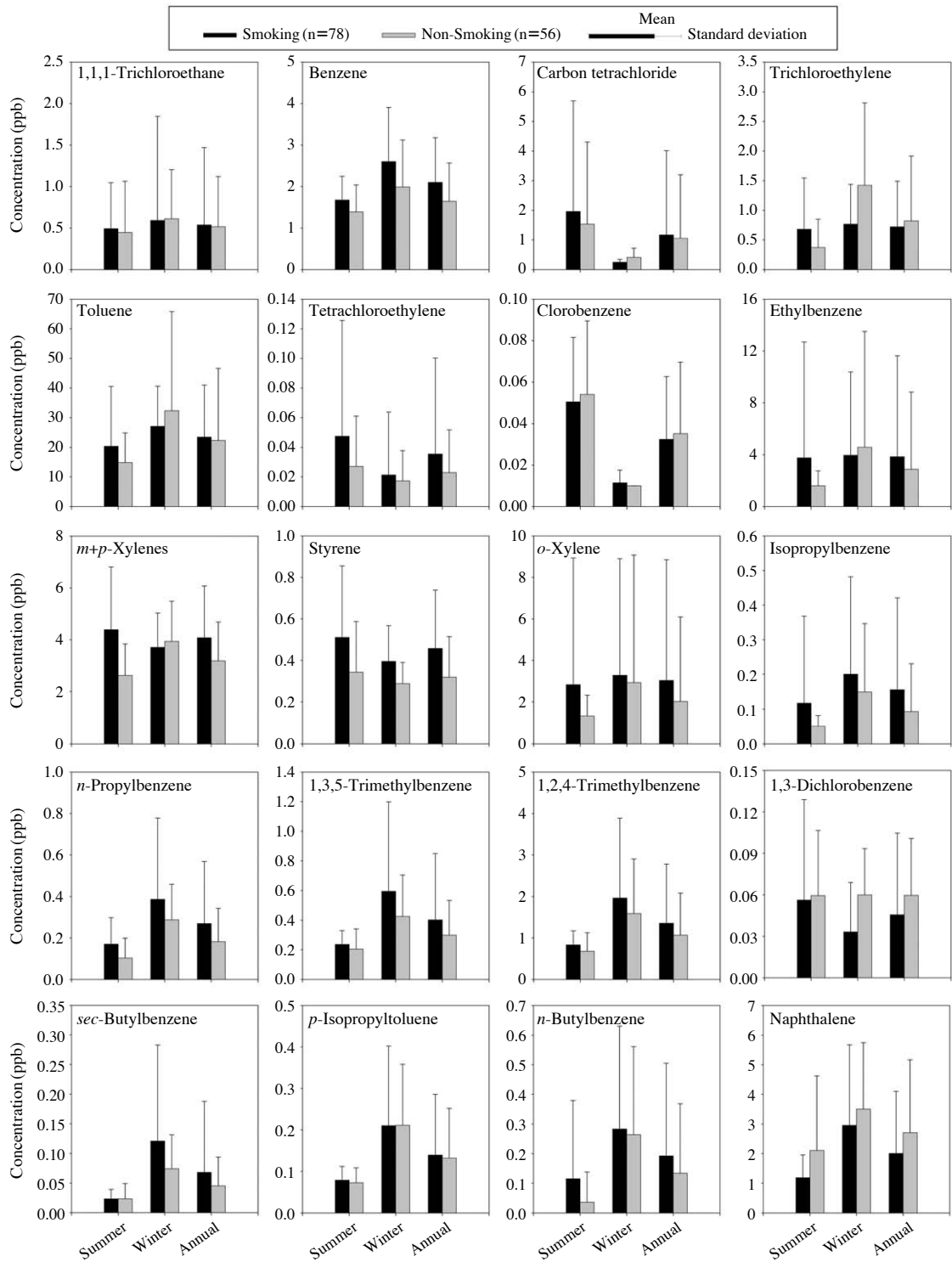


Fig. 3. Comparison of seasonal concentrations of VOCs in smoking and non-smoking offices.

울철 각각 흡연과 비흡연 그룹 간에 평균값과 중앙값 등 그룹 대표값 자체는 차이를 보였으나 t-test와 M-W test에 의한 검증을 통해 벤젠과 스타이렌 등 일부 물질을 제외하고는 많은 물질들의 대표값은 통계적으로 유의적인 차이를 보이지는 않았다. 이러한 이유는 일부 물질들(특히, 할로겐화탄화수소)의 측정된 농도가 매우 낮다는 점과 조사 당시 시료채취지점의 확인된 흡연담배개피수의 평균값이 단위면적(m^2)당 0.2개피 이하로 비교적 적었다는 점, 그리고 톨루엔과 자일렌 등 일부 VOCs의 배출원은 실내·외 어디에서나 존재할 수 있으므로 흡연 이외의 요인(특히, 외부공기의 유입 등)에 영향을 동시에 받고 있다는 점 등과 연계하여 설명할 수 있다. 이와는 대조적으로 흡연의 보다 확실한 지표물질인 솔라네솔, 3-에트닐과 이리딘 및 니코틴의 경우 동일한 사무실에서의 조사한 결과 흡연유무에 따라 유의적인 차이가 뚜렷이 나타났다으며, 이들 흡연 지표물질에 대한 상세한 설명은 기존 문헌에 보고된 바 있다(Baek and Park, 2004).

사무실 내 VOCs 농도에 미치는 흡연의 영향을 보다 확실하게 파악하기 위하여 본 연구에서는 단순히 대표값의 비교에서 나아가 흡연유무에 따른 측정된 농도의 발생빈도를 계급별로 나누어 분석하였다. 10개의 주요 VOCs에 대한 빈도그래프는 그림 4에 나타내었으며, 발생빈도가 높은 막대그래프의 농도가 사무실 내 VOCs 농도의 평균값을 잘 대변하고 있음을 알 수 있다.

그림 4에서 볼 수 있듯이 나프탈렌을 제외하고는 대부분 VOCs는 흡연행위가 있는 사무실에서 고농도가 발생하는 가능성이 매우 높은 것으로 나타났다. 따라서 흡연과 비흡연의 두 그룹 간의 평균값 비교에서는 유의적인 차이를 나타내지는 않았으나 측정된 농도의 발생빈도 분석을 통해 짧은 시간 동안 고농도에 노출될 가능성은 흡연 그룹이 비흡연 그룹에 비해 높음을 알 수 있다. 나프탈렌의 경우 저농도 그룹에서는 흡연군이 비흡연군보다 흡연의 영향을 많이 받지만 농도가 높게 나타나는 경우에는 흡연 이외의 더 큰 요인이 작용하는 것으로 추정된다. 흥미롭게도 현장 조사일지를 재검토한 결과, 나프탈렌이 고농도로 관측된 비흡연 사무실의 경우 겨울철에 환기가 억제된 상태에서 등유난로를 사용하고 있는 것으로 파악되었다. 나프탈렌과 같은 다환방향족탄화수소류(PAHs)는 물론 담배연기와 무관하지는 않지만(Baek and Jen-

ins, 2004) 주로 화석연료의 불완전연소과정에서 많이 발생하는 것으로 알려져 있다(Baek, 1999).

3.2 사무실 환기 및 냉·난방 특성에 따른 VOCs 농도분포

계절요인과 흡연유무에 상관없이 사무실 환경에서의 여름철 냉방방식과 겨울철 난방형태에 따른 VOCs 농도를 비교한 결과는 표 4에 요약하였다. 여름철 조사대상 사무실 37개소를 냉방방식에 따라 창문만 열어두는 자연환기(3개소) 그룹과 에어컨이나 선풍기 등의 냉방장치를 가동하는 인위적 냉방(34개소) 그룹으로 나누었다. 자연환기 그룹의 표본 수가 적어서 양자 간의 적절한 비교는 될 수 없지만 전반적으로 자연환기 그룹의 VOCs 농도가 대체로 낮게 나타났다. 일부 물질들은 강제환기 시 농도가 자연환기 사무실보다 다소 높게 나타났으나 그 차이가 크지는 않았다. 자연환기 시 흡연과 비흡연 사무실 비율은 2:1이었으며, 강제환기 시는 1.3:1로 나타나 자연환기 형태 사무실의 흡연 비율이 조금 더 높았다. 일반적으로 실내에서의 에어컨 사용은 공기질을 개선하는 것으로 알려져 있으나 적절한 유지관리가 이루어지지 않을 경우 실내공기질 관리에 있어 부정적인 영향을 끼칠 수도 있다(Berg, 1993). 따라서 강제환기 시 환기시설에 대한 적절한 유지관리가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 카본테트라클로라이드의 경우 여름철에 농도가 높게 나타났으며, 그 중 에어컨을 사용하는 사무실 그룹에서 1.82 ppb로 높게 나타나 측정 당시의 에어컨 냉매로 사용된 물질들의 누기로 인한 영향이었을 것으로 추정된다.

겨울철 난방방식은 조사대상 30개소 사무실을 등유나 가스 난방기구 등의 연소형 난방 그룹(10개소)과 중앙집중식 스팀, 전열기구 등의 비연소형 난방 그룹(20개소)으로 구분하였다. 흡연과 비흡연 사무실의 수는 연소방식과 비연소방식 모두 3:2로 나타나 두 그룹의 VOCs 농도비교 시 흡연으로 인한 영향은 비슷한 수준일 것으로 판단하였다. 두 그룹 간의 대표값(평균값과 중앙값)은 t-test와 M-W test를 적용한 결과, 일부 물질을 제외하고는 양자 간에 유의적인 차이를 보이지는 않았다. 그러나 BTEX(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠 및 자일렌)를 포함하는 방향족화합물은 모두 연소식 난방 사무실에서의 농도가 비연소 난방 그룹보다 통계적으로 유의적인 차이를 보이면서 높은

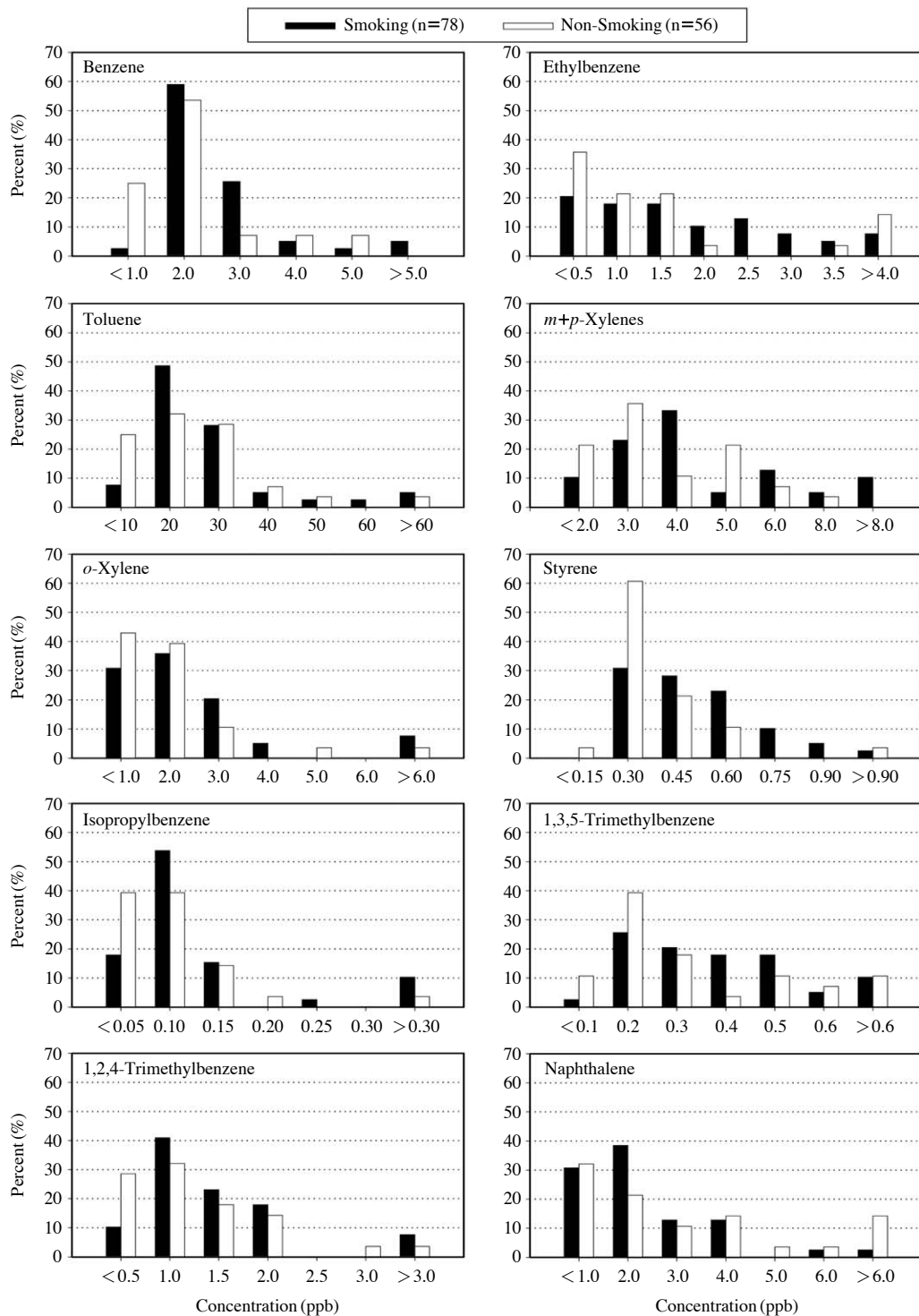


Fig. 4. Frequency distributions of VOCs in indoor sites.

Table 4. Comparison of mean concentrations (in ppb) of VOCs with respect to ventilation and heating types in the office environments.

	Ventilation type				Heating type			
	Natural (n=6)	Forced (n=68)	Total (n=74)	N/F ratio ^{a)}	Combustion (n=20)	Non-combustion (n=40)	Total (n=60)	C/N ratio ^{b)}
1,1,1-Trichloroethane	0.70	0.45	0.47	1.5	0.74	0.53	0.60	1.4
Benzene	1.70	1.54	1.55	1.1	3.30	1.89	2.36	1.7
Carbon tetrachloride	1.26	1.82	1.78	0.7	0.29	0.32	0.31	0.9
Trichloroethylene	1.12	0.50	0.55	2.2	1.47	0.81	1.03	1.8
Toluene	20.15	17.76	17.95	1.1	43.76	21.89	29.18	2.0
Tetrachloroethylene	0.04	0.04	0.04	1.0	0.02	0.02	0.02	1.0
Chlorobenzene	0.06	0.05	0.05	1.2	0.01	0.01	0.01	1.0
Ethylbenzene	1.80	2.91	2.82	0.6	7.26	2.67	4.20	2.7
<i>m</i> + <i>p</i> -Xylenes	2.54	3.72	3.62	0.7	5.94	2.73	3.80	2.2
Styrene	0.39	0.44	0.44	0.9	0.37	0.34	0.35	1.1
<i>o</i> -Xylene	1.27	2.27	2.19	0.6	5.44	1.99	3.14	2.7
<i>iso</i> -propylbenzene	0.05	0.09	0.09	0.6	0.16	0.19	0.18	0.8
<i>n</i> -Propylbenzene	0.10	0.15	0.14	0.7	0.25	0.40	0.35	0.6
1,3,5-Trimethylbenzene	0.25	0.22	0.22	1.1	0.57	0.51	0.53	1.1
1,2,4-Trimethylbenzene	0.72	0.77	0.77	0.9	1.95	1.74	1.81	1.1
1,3-Dichlorobenzene	0.05	0.06	0.06	0.8	0.04	0.05	0.04	0.8
<i>sec</i> -Butylbenzene	0.02	0.02	0.02	1.0	0.08	0.11	0.10	0.7
<i>p</i> - <i>iso</i> -propyltoluene	0.07	0.08	0.08	0.9	0.23	0.20	0.21	1.2
<i>n</i> -Butylbenzene	0.01	0.09	0.08	0.1	0.28	0.28	0.28	1.0
Naphthalene	3.03	1.46	1.59	2.1	4.72	2.41	3.18	2.0

^{a)}Ratio of mean concentrations of VOCs for natural ventilation to forced ventilation occurred during sampling.

^{b)}Ratio of mean concentrations of VOCs for non-combustion to combustion occurred during sampling.

것으로 나타났다. 겨울철 시료채취장소 30개소 중 공공건물 11개소가 포함되어 있으며, 그 중 8개소에서는 스티름을 이용한 중앙난방을 하고 있었으며 연소방식의 경우 비교적 넓은 공간에서도 다수의 등유난로나 가스 난방기구를 사용한 경우가 많았다. 따라서 일반 사무실 환경에서 공기 중 VOCs 농도는 연소나 흡연과 같은 1차 배출원에 의해 좌우될 수 있으며, 특히 겨울철에는 난방방식과 함께 환기시설의 적정 가동 및 공조설비의 적절한 유지관리가 사무실 내 공기질을 적절히 유지하는 데 중요한 역할을 할 수 있다고 보아진다. 겨울철 비연소방식의 경우에도 공조설비의 유지관리가 제대로 되지 않을 경우 설비자체가 오히려 잠재적 오염원이 될 수 있으므로 냉·난방기구와 환기설비의 적절한 유지관리가 매우 중요한 사안이라고 사료된다.

3. 3 다양한 실내·외 공간에서의 VOCs 농도 비교

본 연구에서 측정한 VOCs 농도를 다른 연구(Baek *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2002; Baek and Jenkins 2001;

Daisey *et al.*, 1994)에서 보고된 다양한 실내·외 공간에서의 VOCs 농도와 비교하여 표 5에 그 결과를 요약하였다. 각 측정지점별로 분석된 항목에 대해서만 산술평균값으로 표현하였다. VOCs의 농도는 사무실>대도시 도로변>가정집>교외지역 순으로 나타나 사무실 환경에서의 오염정도가 실외보다 심함을 알 수 있다. 미국 캘리포니아의 사무실 환경에서 측정된 VOCs 역시 국내 사무실과 대체로 유사한 수준이었으나 트리클로로에틸렌은 월등히 높게 나타났다. 환경 중 검출빈도가 높은 BTEX 계통의 VOCs는 다른 물질에 비해 농도가 높았으며 유기용제로서의 사용량이 많을 뿐 아니라 자동차 배가스에서도 많이 배출되는 톨루엔은 실내·외에서 모두 측정된 VOCs 전체 농도의 약 절반 가량의 점유율을 보이고 있어 실내·외 어디에서나 VOCs 중에서는 가장 높은 농도로 관측되는 물질임을 알 수 있다.

3. 4 사무실 내 VOCs 항목 간의 상관분석

여름철과 겨울철 동안 측정된 VOCs 자료 중 검출빈도가 80% 이상인 자료에 대하여 SPSS 프로그램을

Table 5. Comparison of VOCs concentrations (in ppb) in various indoor and outdoor sites.

	Indoor			Outdoor		
	Home ^{a)} (n=238)	Office ^{b)} (n=134)	Office ^{c)} (n=32)	Road side ^{d)} I (n=658)	Road side ^{e)} II (n=221)	Suburban sites ^{f)} (n=96)
Benzene	1.99	1.91	2.66	1.82	1.18	0.89
Carbon tetrachloride	0.20	1.12	—	—	—	—
Trichloroethylene	0.32	0.76	6.05	—	0.41	0.20
Toluene	9.78	22.98	13.46	18.4	20.38	4.31
Tetrachloroethylene	0.14	0.03	—	—	0.06	0.05
Chlorobenzene	0.09	0.03	—	—	—	—
Ethylbenzene	1.22	3.44	1.65	1.79	0.58	0.31
<i>m</i> + <i>p</i> -Xylenes	2.60	3.70	8.33	3.77	1.87	0.87
Styrene	0.66	0.40	1.49	0.20	0.12	0.10
<i>o</i> -Xylene	1.11	2.61	1.93	1.29	0.57	0.27
<i>Iso</i> -propylbenzene	0.06	0.13	—	—	—	—
<i>n</i> -Propylbenzene	0.03	0.23	—	—	—	—
1,3,5-Trimethylbenzene	0.22	0.36	1.46	0.19	0.20	0.10
1,2,4-Trimethylbenzene	0.75	1.24	2.14	0.66	0.88	0.40
1,3-Dichlorobenzene	0.02	0.05	—	—	—	—
<i>sec</i> -Butylbenzene	0.03	0.06	—	—	—	—
<i>p</i> - <i>iso</i> -Propyltoluene	0.11	0.14	—	—	—	—
<i>n</i> -Butylbenzene	0.07	0.17	—	—	—	—
Naphthalene	3.05	2.30	—	0.33	—	—

^{a)}VOCs data from smoking and non-smoking homes during a 24 hours period each of summer and winter (Baek and Jenkins, 2001).

^{b)}This study

^{c)}VOCs data from 32 areas within 12 office buildings in California, where smoking was prohibited during summer in 2000 (Daisey *et al.*, 1994).

^{d)}VOCs data from a heavy-traffic site I in Daegu city for two weeks period during four season in 1999~2000 (Kim *et al.*, 2002).

^{e)}VOCs data from a heavy-traffic site II in Daegu city for two weeks period during spring and summer in 2000 (Baek *et al.*, 2002).

^{f)}VOCs data from a suburban site in Gyeongsan city for two weeks period during spring and summer in 2000 (Baek *et al.*, 2002).

이용하여 상관분석을 수행하였으며, 그 결과를 표 6에 나타내었다. 트리클로로에틸렌의 경우 다른 물질과의 상관계수는 0.2 이하로 상관성이 낮은 것으로 나타나 일반적인 배출원이 아닌 특유의 발생원(예로써 유기용제 사용)과 관련이 있는 것으로 보아진다. 그 외 VOCs 상호 간의 상관계수는 대체적으로 0.40~0.98의 유의적인 상관성을 나타내었다. 에틸벤젠과 자일렌, 1,3,5-트리메틸벤젠과 1,2,4-트리메틸벤젠, 그리고 *n*-프로필벤젠과 1,3,5-트리메틸벤젠, 1,2,4-트리메틸벤젠은 각각 0.94~0.98의 높은 상관성이 있는 것으로 조사되었다. 이들 상호 간에 상관성이 높은 VOCs의 경우 환경 대기 중 검출빈도 역시 높은 것을 알 수 있었으며, 또한 동일한 배출원에서 배출된 오염물질일 가능성이 크다는 사실을 알 수 있었다. 지면관계상 표에는 수록하지 않았지만 자료를 흡연과 비흡연 그룹으로, 그리고 겨울철과 여름철 그룹으로 나누어 상관분석을 반복 수행한 결과 흡연 그룹이 비흡연 그룹에 비해 대체적으로 양호한 상관성을 보여주었으며, 겨울철이 여름철에 비해 서로 간의 상관

성이 높아지는 것으로 나타났다. 계절별과 흡연유무의 두 가지 경우를 비교해 볼 때 계절별로 구분한 경우의 상관성이 더 좋게 나와 사무실의 VOCs 농도에 영향을 주는 인자는 흡연유무보다 실내공기의 환기여부가 조금 더 영향을 미침을 알 수 있다. 겨울철에 흡연행위가 있었던 사무실에 대한 상관 분석결과 앞서 언급한 경우보다 더 좋은 양의 상관을 보여 환기설비의 부적절한 관리와 흡연이 VOCs 농도변동에 중요한 요인으로 작용함을 알 수 있었다. 이러한 사실로부터 사무실과 같은 실내공간의 경우 환기시설의 부적절한 관리와 좁은 공간으로의 담배연기와 같은 배출원의 유입은 실내공기질에 큰 영향을 줄 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

1) 사무실 VOCs 농도는 겨울철 비연소방식에서 흡연행위가 이루어진 그룹이 가장 농도가 높은 것으

Table 6. Correlation coefficients between VOCs values for annual data at a office site (n=134).

	BZ	TCE	TOL	EBZ	MPX	OX	iPBZ	nPBZ	135T	124T	sBBZ	pIPT	nBBZ	NAPT
Benzene (BZ)	1.00													
Trichloroethylene (TCE)	0.14	1.00												
Toluene (TOL)	0.50*	0.20*	1.00											
Ethylbenzene (EBZ)	0.28*	0.01	0.85*	1.00										
<i>m</i> + <i>p</i> -Xylenes (MPX)	0.22*	0.17	0.30*	0.30*	1.00									
<i>o</i> -Xylene (OX)	0.28*	0.02	0.83*	0.98*	0.32*	1.00								
<i>iso</i> -Propylbenzene (iPBZ)	0.24*	-0.01	0.68*	0.85*	0.27*	0.87*	1.00							
<i>n</i> -Propylbenzene (nPBZ)	0.36*	0.09	0.46*	0.57*	0.25*	0.61*	0.68*	1.00						
1,3,5-Trimethylbenzene (135T)	0.38*	0.12	0.40*	0.48*	0.20*	0.53*	0.60*	0.95*	1.00					
1,2,4-Trimethylbenzene (124T)	0.41*	0.13	0.49*	0.52*	0.22*	0.56*	0.61*	0.94*	0.98*	1.00				
<i>sec</i> -Butylbenzene (sBBZ)	0.19*	0.10	0.20*	0.32*	0.15	0.36*	0.49*	0.89*	0.91*	0.88*	1.00			
<i>p</i> - <i>iso</i> -Propyltoluene (pIPT)	0.29*	0.14	0.31*	0.36*	0.15	0.42*	0.49*	0.79*	0.82*	0.78*	0.77*	1.00		
<i>n</i> -Butylbenzene (nBBZ)	0.22*	0.03	0.33*	0.37*	0.17*	0.38*	0.41*	0.69*	0.65*	0.69*	0.60*	0.56*	1.00	
Naphthalene (NAPT)	0.14	0.11	0.29*	0.27*	0.03	0.32*	0.33*	0.41*	0.45*	0.41*	0.32*	0.50*	0.24*	1.00

* : Correlation coefficients are significant at level of 0.05 (two tailed test, n=134).

로 나타났으며 BTEX 계통의 물질들은 검출빈도와 농도 측면에서 다른 물질들에 비해 높게 나타나 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스타이렌, 트리메틸벤젠 (1,3,5-, 1,2,4-), 나프탈렌을 실내공기질 제어를 위한 우선관리물질로 선정하여야 하며, 할로겐화탄화수소류 중에서는 검출빈도가 80% 이상인 트리클로로에틸렌과 카본테트라클로라이드 물질의 관리가 우선되어야 할 것으로 사료된다.

2) EPA에 발암 1등급으로 등재된 벤젠은 겨울철 흡연의 경우 2.60 ppb (약 8.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 여름철 비흡연의 경우 1.39 ppb (약 4.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 약 2배 정도 높게 나타나 실내환경에서의 벤젠 농도증가에 흡연이 기여할 수 있다는 사실을 유추할 수 있다.

3) 흡연과 비흡연 그룹 간의 평균비교를 통해 벤젠과 스타이렌을 제외한 나머지 VOCs 농도 간에는 유의적인 차이를 보이지는 않았으나 짧은 시간 동안 고농도에 노출될 가능성은 흡연 그룹이 비흡연 그룹에 비해 높음을 알았다.

4) 본 논문에서는 VOCs 농도변동에 영향을 주는 요인으로서 흡연유무 이외에 실내환경의 환기상태 및 냉·난방형태에 따른 영향도 파악하였으며, 그 결과 여름철은 자연환기보다 강제환기 방식의 사무실이, 겨울철은 중앙난방방식보다 실내 연소식난방방식의 사무실에서 농도가 높게 나타났다. 따라서 VOCs 농도에 영향을 미치는 흡연의 제어도 중요하지만 그에 못지 않게 사무실 실내공간에 설치되어 있는 냉·난방설비와 환기시설의 적절한 유지관리가 실내공기

질을 개선하는 데 중요한 관건인 것으로 사료된다.

5) 실내공간에서 측정된 VOCs 자료를 이용하여 물질별 상호간 상관성을 분석한 결과, 배출원의 강도가 여름철보다 상대적으로 강한 겨울철 흡연이 행해진 사무실의 경우 상관성이 더 높게 나타나 실내 흡연 행위와 함께 환기설비의 부적절한 관리가 VOCs 농도 상승에 중요한 요인으로 작용함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구를 위하여 현장실측 및 실험실 분석 작업에 도움을 준 정진욱 군, 김미현 양, 서영교 군 등 당시 영남대학교 대기환경연구실의 대학원생들에게 감사드립니다.

References

- Baek, S.O. (1999) Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons-environmental implications. J. Kor. Soc. Atmos. Environ., 15(5), 525-544.
- Baek, S.O., H.B. Song, D.C. Shin, S.H. Hong, and H.S. Chang (1998) Seasonal and locational concentrations of particulate air pollutants in indoor air of public facilities in Taegu area, J. Kor. Air Pollution Res. Assoc., 14(3), 163-175. (in Korean with English abstract)
- Baek, S.O., B.K. Kim, and S.K. Park (2002) Characteristics of

- atmospheric concentrations of toxic volatile organic compounds in Korea (II)-seasonal and locational variations, *Kor. J. Environ. Toxicol.*, 17(3), 207-217. (in Korean with English abstract)
- Baek, S.O., M.H. Kim, S.H. Kim, and S.G. Park (2002) Characteristics of atmospheric concentrations of toxic volatile organic compounds in Korea (I)-evaluation of sampling and analytical methodology, *Kor. J. Environ. Toxicol.*, 17(2), 95-107. (in Korean with English abstract)
- Baek, S.O. and R.A. Jenkins (2004) Characterization of trace organic compounds associated with aged and diluted sidestream tobacco smoke in a controlled atmosphere-volatile organic compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Atmos. Environ.*, 38, 6583-6599.
- Baek, S.O. and R.A. Jenkins (2001) Performance evaluation of simultaneous monitoring of personal exposure to environmental tobacco smoke and volatile organic compounds, *Indoor and Built Environ.*, 10, 200-208.
- Baek, S.O. and S.G. Park (2004) Measurement of environmental tobacco smoke in the air of offices in urban areas-focusing on the impact of smoking on the concentrations of suspended particles, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 20(6), 715-727. (in Korean with English abstract)
- Baek, S.O., S.M. Hwang, S.G. Park, S.J. Jeon, B.J. Kim, and G.S. Heo (1999a) Evaluation of methodology for the measurement of volatile organic compounds using adsorption sampling coupled with thermal desorption and GC/MS, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 15(2), 121-138. (in Korean with English abstract)
- Baek, S.O., Y.J. Hwang, Y.M. Kim, S.M. Hwang, S.G. Park, and H.B. Song (1999b) Characterization of indoor air quality at the public places in Taegu area-focusing on volatile organic compounds, *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, 21(5), 869-885. (in Korean with English abstract)
- Baek, S.O., Y.S. Kim, and R. Perry (1997) Indoor air quality in homes, offices, and restaurants in Korean urban areas-indoor/outdoor relationships, *Atmos. Environ.*, 31, 529-544.
- Berg, D.W. (1993) *Indoor Air Quality and HVAC Systems*, Lewis Pub., 220 pp.
- Daisey, J.M., A.T. Hodgson, W.J. Fisk, M.J. Mendell, and J. Ten Brinke (1994) Volatile organic compounds in twelve California office buildings: classes, concentration, and sources, *Atmos. Environ.*, 28, 3557-3562.
- Jenkins, R.A., A. Palausky, R.W. Counts, C.K. Bayne, A.B. Dindal, and M.R. Guerin (1996) Exposure to environmental tobacco smoke in sixteen cities in the United States as determined by personal breathing zone air sampling, *J. Exp. Anal. Environ. Epidemio.*, 6, 473-502.
- Kim, K.S., H.S. Lee, S.Y. Gong, and H.J. Ku (2001) Public Survey for Indoor Air Pollution and Management Policy Study, Report to Korean Environmental Institute, KEI/2002/RE-07, 70 pp.
- Kim, M.H., S.G. Park, and S.O. Baek (2002) Characteristics of atmospheric concentrations of volatile organic compounds at a heavy-traffic site in a large urban area, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 18(2), 113-126. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.S. (1993) A perspective on indoor air pollution, *J. Kor. Air Pollution Res. Assoc.*, 9(1), 33-43. (in Korean with English abstract)
- National Research Council (1986) *Environmental Tobacco Smoke-Measuring Exposures and Assessing Health Effects*, Washington DC, National Academy Press., 360 pp.
- Shin, D.C., H.M. Lee, J.M. Kim, and Y. Chung (1990) A study on the indoor air pollution level and its health significance in working and living spaces, *J. Kor. Air Pollution Res. Assoc.*, 6(1), 73-84. (in Korean with English abstract)
- Song, H.B., K.S. Min, G.H. Han, J.W. Kim, and S.O. Baek (1996) Concentrations of criteria pollutants in indoor and ambient air of public facilities in Taegu area, *J. Kor. Air Pollution Res. Assoc.*, 12(4), 429-439. (in Korean with English abstract)
- Song, H.B., T.K. Kwon, S.H. Hong, and S.O. Baek (1998) Evaluation of indoor air quality in large underground parking lots in Taegu area, *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, 20(9), 1315-1330. (in Korean with English abstract)
- USEPA (1997) *Compendium of methods TO-17 Determination of Toxic Organic Compounds in Ambient air*, 2nd Ed., 1-51.
- WHO (1991) *Indoor air pollution from biomass fuel*, WHO/PEP/92-3 A. WHO, Geneva.
- WHO (2000) *Guidelines for Air Quality*, WHO, Geneva.