

## 하계 실내 및 실외환경의 공기 중 휘발성 유기화합물 농도 및 개인노출

양원호·손부순·박종안·장봉기·박완모·김윤신·어수미·윤중섭·류인철  
대구가톨릭대학교 산업보건학과·순천향대학교 환경보건학과·  
한양대학교 환경 및 산업의학 연구소·서울특별시 보건환경연구원  
(2003년 3월 31일 접수; 2003년 9월 19일 채택)

## Volatile Organic Compounds Concentrations and Its Personal Exposure in Indoor and Outdoor Environments in Summer

Won-Ho Yang, Bu-Soon Son, Jong-An Park, Bong-Ki Jang, Wan-Mo Park,  
Yoon-Shin Kim, Soo-Mi Eo, Joong-Sup Yun and In-Cheol Ryu

Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu, Gyeongsan 712-702, Korea

\*Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University, Asan 336-745, Korea

\*\*Department of Occupational & Environmental Medicine, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

\*\*\*Seoul Metropolitan Government Research Institute of Public Health and Environment, Seoul 137-734, Korea

(Manuscript received 31 March, 2003; accepted 19 September, 2003)

Volatile organic compounds (VOCs) are present in essentially all natural and synthetic materials from petrol to flowers. In this study, indoor and outdoor VOCs concentrations of houses, offices and internet-cafes were measured and compared simultaneously with personal exposures of each 50 participants in Asan and Seoul, respectively. Also, factors that influence personal VOCs exposure were statistically analyzed using questionnaires in relation to house characteristics, time activities, and health effects. All VOCs concentrations were measured by OVM passive samplers (3M) and analyzed with GC/MS. Target pollutants among VOCs were Toluene, o-Xylene, m/p-Xylene, Ethylbenzene, MIBK, n-Octane, Styrene, Trichloroethylene, and 1,2-Dichlorobenzene.

Indoor and outdoor VOCs concentrations measured in Seoul were significantly higher than those in Asan except Ethylbenzene. Residential indoor/outdoor (I/O) ratios for all target compounds ranged from 0.94 to 1.51 and I/O ratios of Asan were a little higher than those of Seoul. Relationship between personal VOCs exposure, and indoor and outdoor VOCs concentrations suggested that time-activity pattern could affect the high exposure to air pollutant. Factors that influence indoor VOCs level and personal exposure with regard to house characteristics in houses were building age, inside smoking and house type. In addition insecticide and cosmetics interestingly affected the VOCs personal exposure. Higher exposure to VOCs might be caused to be exciting increase and memory reduction, considering the relationship between measured VOCs concentrations and questionnaire ( $p < 0.05$ ).

Key words : Volatile organic compounds, Indoor air, Exposure, Time-activity pattern

Corresponding Author : Bu-Soon Son, Department of  
Environmental Health Science, SoonchunHyang University,  
Asan 336-745, Korea  
Phone : +82-41-530-1270  
E-mail : sonbss@sch.ac.kr

### 1. 서론

인간이 생명을 유지하기 위해서는 항상 신선한 공기를 충분히 공급받아야 함에도 불구하고 세계의 주요 도시는 대기오염이 심각한 실정이며, 우리나라에서도 1970년대 이후 산업구조의 대형화로 에

너지 소비가 급증함으로써 대기오염의 발생량이 증가하여 최근에는 주요도시의 대기오염이 심각한 상태이다<sup>1)</sup>. 그러나, 대부분의 사람들은 실내공기오염이 인체에 미치는 영향은 실외 대기오염보다 더욱 중요하다는 사실을 인식하지 못하고 있다<sup>2)</sup>. 현대도시인의 경우 일상생활 중 약 80% 이상의 시간을 실내에서 생활하게 됨으로써 쾌적한 실내환경(Indoor Environment, IE)에 대한 인식이 새롭게 부각되기에 이르렀다<sup>3,4)</sup>. 실내환경의 공기질은 미국 환경청(EPA)에서 결정한 국민건강에 미치는 위해 요인의 다섯가지중 한 분야이기 때문에<sup>5)</sup>, 선진외국에서는 실내환경 공기질에 대한 연구가 과거 20년 동안 활발히 진행되고 있으나 우리나라에서는 아직까지 부족한 상태이며 실내 오염물질의 성질과 농도에 대해서는 정확히 파악하지 못하고 있다<sup>6)</sup>.

각종 건축자재와 마감재료 가구, 취사도구 등으로부터 방출되는 이산화탄소, 미세먼지, 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)이 실내환경 오염의 원인이 되며 이러한 오염물질들은 재실자에게 질병이나 빌딩증후군(Sick Building Syndrome, SBS)을 유발할 수도 있다<sup>7)</sup>. 실내환경 중에서 검출된 VOCs의 종류는 일반 실외대기 보다 많고 또 최근 계속 증가하고 있다<sup>8)</sup>. Brook et al.의 연구에 의하면 실내환경에서 900여종 이상의 화학적·생물학적인 물질 중에서 350 종류의 VOCs 농도가 1 ppb 이상의 농도를 나타낸다고 보고하였다<sup>9)</sup>. 그리고, 사무기기의 사용이 증대되어 건축 내장재들이 다양화, 고급화되었으나, 표면활성제 및 접착제 등의 사용으로 인하여 VOCs, 알데히드, 암모니아 등에 의한 노출이 인체에 미치는 영향은 점차 커지고 있다<sup>10)</sup>. 특히 VOCs가 생활 속에서 호흡기나 피부 등으로 직접 장·단기적으로 노출될 수 있다<sup>11)</sup>. VOCs가 인체에 미치는 영향은 급성적인 것과 만성적인 것으로 나눌 수 있으며, 그 증상으로는 호흡기 자극, 중추신경의 이상을 유발시킬 수 있다. Wallace의 연구에 의하면 동물실험에서 VOCs의 고농도 노출은 발암위험성이  $1/10^6$ 을 초과하는 것으로 나타났다<sup>12)</sup>.

VOCs는 탄화수소류의 석유 화학제품·유기용제 등 기타 물질로서 정의되며, 대기 중에서 태양 광선에 의해 질소산화물( $\text{NO}_x$ ) 등과 광화학적(photochemical) 산화 반응을 일으켜 지표면의 오존 농도를 증가시키고 광화학스모그 현상을 일으키는 대표적인 물질이다. VOCs의 종류로는 벤젠, 부타디엔, 휘발유 계통의 38개 물질을 환경부에서 2000년 6월에 개정·고시하였다. 우리나라의 실외대기에서 VOCs 배출량을 배출원별로 살펴보면, 도장산업의 배출량

이 46.2%로 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 자동차 등의 교통수단이 그 뒤를 이어 34.9%를 차지하고 있다<sup>13)</sup>.

본 연구의 목적은 대기환경 중 인체에의 위해성이 높은 휘발성 유기화합물을 연구 대상물질로 선정하여 일반 주택, 사무실, 인터넷 카페(PC방)의 실내·외 환경에서 VOCs 정성 및 정량, 농도의 영향 요인 및 그에 따른 건강영향을 분석하였다. 또한 상대적으로 여름철의 높은 환기율을 고려할 때 실외 대기오염 상태가 차이가 클 것으로 추정되는 아산시와 서울시간의 비교연구를 수행하여, 본 연구의 결과가 향후 공기오염물질의 노출평가와 위해성 평가에 기초자료로 활용되게 하기 위함이다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구대상 및 설문조사

아산시와 서울시의 측정 장소는 각각 일반 주택 30곳이었고, 주택 거주자 중 1명씩 총 60명의 개인 노출을 측정하였다. 측정장소는 주택 실내·외에서의 VOCs 농도 및 주택 거주자의 개인노출 농도를 24시간 동안 동시에 측정하였다. 실내환경의 특성과 농도와의 관계를 파악하기 위하여 설문조사와 개인노출의 시간활동별 행태를 평가하기 위하여 시간대별 활동을 조사하였다<sup>14)</sup>. 사무실과 PC방 참여자를 제외한, 일반 주택의 아산과 서울 참여자들에게 시간활동표(time-activity diary)와 VOCs 측정용 OVM 수동식 시료채취기(passive sampler)를 직접 설명하며 배포한 후 24시간 후 수거하였다. 시간활동표는 오전 6시(06:00)부터 오후 12시(24:00)까지는 30분 단위로 표시(√)하고, 오후 12시부터 오전 6까지는 1시간 단위로 표시(√)하도록 하였다. 시간활동표에서는 실내는 모든 집, 상점, 또는 백화점 등의 실내공간을 의미하였으며, 실외는 실외공간을 의미하였다. 실내에는 집, 사무실, 실내의 다른 공간 3부분으로 나누어 표시하도록 하였으며, 실외는 집근처, 사무실 근처, 실외의 다른 장소 3부분으로 나누었다. 또한 출·퇴근시 이용하는 버스, 개인 승용차와 지하철을 이용할 때는 차량부분에 표시하도록 설명하였다. 또한 시간단위가 30분 또는 1시간이기 때문에 참여자가 30분 또는 1시간 동안 두 장소에 있었다면 두 장소 모두에 표시하도록 하였다. 수집한 시간활동표를 장소별로 표시한 곳을 계수하여 참여자 각자의 각 장소별 보낸 시간을 산출하였다.

설문지 내용은 각 참여 주택의 대표자 1명을 대상으로 일반적인 사항(나이, 성별, 가족수, 직업 등), 주택특성(건물특성, 건축연수, 거주기간 등), 건

강 자각 증상(두통, 불안, 흥분 등)의 내용으로 작성하였다. 그리고 사무실 10곳과 PC방 10곳을 아산시와 서울시에서 각각 측정하여 비교하였고, 사무실과 PC방에서 근무하는 1명을 선정하여 개인노출을 동시에 24시간 동안 측정하였다. 측정기간은 두 도시에서 2001년 8월~9월에 수행되었다.

설문조사를 통한 일반 주택의 아산과 서울 각각 30명 참여자의 일반적인 특성은 다음과 같다 (Table 1). 성별에서는 30명당 아산시가 여자 66.7%, 남자가 33.3%이었고, 서울시는 여자가 100%이었다. 연령분포는 아산시가 20대 83.3%, 30대 13.3%, 40대 3.3%이었고, 서울시는 20대 30.3%, 30대 33%, 40대 30.3%, 50대 6.4%이었다. 직업별 분포는 아산시가 학생 83.3%, 직장인 13.3%, 주부 3.4%이었고, 서울시는 학생 0%, 직장인 66.7%, 주부가 33.3%이었다. 그리고 서울시와 아산시의 각 건물 건축 년 수를 보면 아산시가 3년 미만 70.0%, 3년 이상이 30.0%이었으며, 서울시는 3년 미만 96.7%, 3년 이상이 3.3%이었다.

한편, 사무실의 실내환경 설문지는 각 사무실의 환경을 가장 잘 알고 있는 사람을 자체 선정하여 작성토록 하였다. 아산시와 서울시의 모든 사무실에서 흡연을 허용하고 있는 곳은 11군데이었고, 건

축 년수는 2년부터 20년까지 다양하였다. PC방은 주인이 설문지를 작성하였고, PC방의 면적은 26~200 m<sup>2</sup> 범위로 다양했으며, PC 한 대당 보유면적은 1.56 m<sup>2</sup> 이었다. PC방의 내부 벽면 마감재는 주로 페인트를 사용하였으며, 팬(fan)의 보유대수는 3~16대로 면적과 특성에 따라 다양했으며, 팬의 가동 시간은 대체로 10시간 이상인 것으로 나타났다. 에어컨(air conditioner)은 사무실에서 16곳, PC방은 20곳 모두 설치되었으며 측정기간 동안 대부분 가동되고 있었다.

## 2.2. 측정 및 분석방법

일반적으로 공기 중 VOCs의 측정방법은 펌프를 연결한 활성탄관법(charcoal tube method), 수동식 시료채취기와 Tedlar bag법 등이 있는데, 본 연구에서는 3M사에서 제작한 OVM 수동식 시료채취기 # 3500을 이용하여 주택 실내, 실외와 개인노출을 측정하였다<sup>15)</sup>. VOCs 중 실내환경에서의 발생이 예상되는 물질과 3M OVM 수동식 시료채취기 3500으로 포집 및 분석이 가능한 물질 9개를 선정하였으며, 대상물질은 Toluene, o-Xylene, m/p-Xylene, Ethylbenzene, n-Octane, M.I.B.K, 1,2-Dichlorobenzene, Trichloethylene, Styrene이었다. 측정에

Table 1. General characteristics of participants in houses, offices and internet-cafes

	Asan(n=30)			Seoul(n=30)		
	House (n=30)	Office (n=10)	Internet-cafe (n=10)	House (n=30)	Office (n=10)	Internet-cafe (n=10)
<u>House type</u>						
Apartment	29 (96.7%)	N.A.	N.A.	16 (53.3%)	N.A.	N.A.
Tenement	1 ( 3.3%)			14 (46.7%)		
<u>Smoking</u>						
Yes	9 (30.0%)	5 (50.0%)	1(100.0%)	0 ( 0.0%)	6 (60.0%)	1(100.0%)
No	21 (70.0%)	5 (50.0%)	0 (0.0%)	30(100.0%)	4 (40.0%)	0 (0.0%)
<u>Construction</u>						
<3 year	21 (70.0%)	3 (30.0%)	4 (40.0%)	29 (96.7%)	2 (20.0%)	2 (20.0%)
≥3 year	9 (30.0%)	7 (70.0%)	6 (60.0%)	1 ( 3.3%)	8 (80.0%)	8 (80.0%)
<u>Occupation</u>						
Student	25 (83.3%)	0 ( 0.0%)	0 ( 0.0%)	0 ( 0.0%)	0 ( 0.0%)	0 ( 0.0%)
Worker	4 (13.3%)	10(100.0%)	10(100.0%)	20 (66.7%)	10(100.0%)	10(100.0%)
Housewife	1 ( 3.4%)	0 ( 0.0%)	0 ( 0.0%)	10 (33.3%)	0 ( 0.0%)	0 ( 0.0%)
<u>Residing period</u>						
< 0.5 year	6 (20.0%)	1 (10.0%)	3 (30.0%)	0 ( 0.0%)	1 (10.0%)	2 (20.0%)
0.5 ~1 year	18 (60.0%)	4 (40.0%)	4 (40.0%)	6 (20.0%)	3 (30.0%)	5 (50.0%)
1 ~ 2 year	4 (13.3%)	3 (30.0%)	3 (30.0%)	11 (36.6%)	3 (30.0%)	2 (20.0%)
2 ~ 3 year	1 ( 3.3%)	1 (10.0%)	0 ( 0.0%)	13 (43.3%)	1 (10.0%)	1 (10.0%)
≥ 3 year	1 ( 3.3%)	1 (10.0%)	0 ( 0.0%)	0 ( 0.0%)	2 (20.0%)	0 ( 0.0%)

\* N.A. : Not Applicable

이용된 OVM 수동식 시료채취기는 자연적인 기류를 이용하여 확산(diffusion)과 침투(infiltration)라는 물리적인 과정과 반응에 의한 화학적 반응을 이용하여 실내와 실외 환경에서 VOCs 농도를 측정하는 장치이다.

한편, 실외 대기환경의 시료는 주로 건물외벽에서 채취하였으며 지상 1.5m 이상에 설치하였고, 건물 환기구나 연돌과 같은 국지적 배출원의 영향을 직접적으로 받지 않는 지점을 선정하였다. 그리고 3층 이상의 실외환경의 농도 측정은 가급적 같은 높이의 공기를 포집할 수 있도록 하였다. 일반적으로 3M OVM 수동식 시료채취기의 측정시간은 8시간을 기준으로 하고 있으나, 포집용량이 허용되는 경우 24시간 내지 72시간까지도 측정이 가능하다. 이에 본 연구에서는 1일 24시간의 노출을 기준으로 측정하였다.

분석은 일반 활성탄관법의 분석과 마찬가지로 각 샘플을 2ml CS<sub>2</sub>로 탈착하여 GC/MS(가스크로마토그래피 질량분석기)를 이용하여 분석하였다. GC/MS 분석 조건은 초기 온도 31°C에서 2분간 머물도록 하였으며, 100°C까지 분당 5°C씩 승온시키고 1분간 머물도록 하였으며, 다시 200°C까지 분당 50°C씩 승온시켜 1분간 머물도록 하였다. 분석하고자 하는 10가지의 대상물질 대부분이 위의 조건에서 분리되어졌다. 3M OVM 수동식 시료채취기를 이용한 VOCs의 농도는 측정시간, GC/MS로 정량된 물질의 양( $\mu\text{g}$ ), 그리고 계산 상수를 이용하여 계산하였다. 탈착효율은 3M OVM 수동식 시료채취기의 분석가이드에서 제시한 값을 이용하였다<sup>16)</sup>.

측정에 이용된 OVM 수동식 시료채취기의 검출한계(limit of detection, LOD)는 7개의 field blank 농도의 표준편차를 3배(3 S.D.)하여 계산하였고, 측정된 농도에서 각각 빼주어 교정하였다<sup>17)</sup>. 그리고 각 물질에서 불검출로 계산된 농도 값은 검출한계 값의 1/2 값으로 추정할 수 있지만, 검출된 경우가 20% 이하인 Trichloethylene, MIBK, Styrene, 1,2-Dichlorobenzene은 본 연구의 결과에서 제외하였다<sup>18)</sup>.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 실내와 실외 VOCs 농도 및 개인노출

아산시와 서울시에서 측정된 일반 주택의 VOCs 농도와 개인노출을 Table 2에 나타내었다. 대부분의 물질에서 산술평균 값이 중앙값보다 더 크게 나타나 농도분포가 실내 및 실외공기의 전형적 분포 형태인 대수정규분포를 따르는 것으로 나타나 West Virginia와 Arizona에서 수행된 연구결과와 유사한 결과를 나타내었다.<sup>19,20)</sup> 아산시와 서울시의 농도를

비교하면 실내·외 환경에서 Ethylbenzene을 제외한 모든 물질이 유의하게 서울시의 농도가 높았다( $p < 0.001$ , Mann-Whitney test). 특히 아산시와 서울시 평균 실내 톨루엔의 농도는 10배까지의 차이를 보였다. 이것은 아산시와 서울시의 주택 실내특성에 따른 실내 VOCs 발생량의 차이로 설명될 수 있지만, 여름철을 고려하면 주택 실내·외 환기량의 증가로 인한 실외 VOCs의 실내 유입으로 생각할 수 있다<sup>21)</sup>. 실내와 실외의 농도비(I/O)를 비교하면 아산시는 대상물질 중 Ethylbenzene을 제외하고 주택 실내의 농도가 높게 나타났으며, 서울에서는 m/p-Xylene, Ethylbenzene에서는 실외농도가 실내농도보다 다소 높게 나타났다. 대부분의 물질에서 실내농도가 실외농도에 비해서 높게 나타나는 것은 실내 NO<sub>2</sub> 발생원이 없을 때 실내공기 오염물질의 농도는 대략 실외농도의 0.6배라고 발표한 Sexton et al.의 연구결과를 고려할 때 실내환경에서의 발생원이 있는 것으로 생각할 수 있다<sup>22)</sup>.

본 연구가 1년 중 하루 24시간 동안의 농도로 주별, 월별, 계절별 차이를 나타낼 수 있지만 일본 전국에서 2년 동안 계절별로 측정된 VOCs 농도와 비교할 때, 일본에서 측정된 VOCs 농도는 서울시와 아산시 사이의 농도를 나타내었다<sup>23)</sup>. 독일에서 수행된 연구에 의하면 겨울철 7일 동안 실내 거실에서 측정된 VOCs 농도도 서울시와 아산시 사이의 값을 나타내었다<sup>24)</sup>. 서울시에서 측정된 VOCs 농도는 백성욱과 김윤신이 대구시와 서울시에서 일반 주택을 대상으로 측정된 값보다 높게 나타났으며, 특히 Toluene의 실내·외 농도는 상당히 높았다<sup>25)</sup>. 실내공기는 실내 발생원 뿐만 아니라 환기를 통한 실외공기 유입에 영향을 받으며, 본 연구에서 실외 VOCs 농도를 고려할 때 그 영향이 큰 것으로 생각할 수 있다. 개인농도의 경우 아산시에서 n-Octane은 주택 실내농도와 실외농도의 사이의 값을 나타내었으며, 서울시에서는 o-Xylene, m/p-Xylene, n-Octane이 실내와 실외농도 사이의 값을 나타내었다. 나머지 물질들은 실내·실외농도보다 높게 나타났는데, 이것은 개인농도의 경우 측정시간 동안의 개인 활동행태에 영향을 받기 때문이다<sup>26)</sup>. 그리고 서울시의 VOCs 개인노출은 대기오염이 심각한 것으로 알려져 있는 멕시코시티에서 측정된 개인노출 정도 범위 및 평균이 비슷한 수준을 나타내어 공기오염 정도가 심각한 것으로 나타났<sup>27)</sup>.

한편, 사무실에서 측정된 VOCs 농도는 적은 측정수와 불검출로 대표성을 나타내기 어렵지만, 일반 주택 측정값과 마찬가지로 실내농도가 대부분

실외농도보다 높았다. Ethylbenzene을 제외한 모든 물질에서 서울시가 아산시보다 통계적으로 유의하게 높았다 ( $p < 0.001$ , Mann-Whitney test) (Table 3). PC방도 사무실과 비슷한 결과를 나타내었다 (Table 4). 일반 주택에서 측정된 VOCs 농도값과 직접적으로 비교하기는 어렵지만, 대체적으로 실내

및 실외환경에서 사무실과 PC방이 일반 주택보다 다소 높은 농도를 나타내었다. 이와 같은 결과의 하 나로서 사무실과 PC방이 주로 도로변에 위치하기 때문이며 실내 흡연이 허용된 곳이 많았기 때문으로 판단된다.

Table 2. Measured VOCs concentrations of indoor, outdoor and personal exposure in houses

	Asan (n=30)				Seoul (n=30)			
	Indoor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Outdoor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	I/O	Personal ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Indoor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Outdoor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	I/O	Personal ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
	Mean±S.D. (Median)				Mean±S.D. (Median)			
Toluene (LOD: 1.92)	17.31 ±13.11 (13.90)	18.13 ±14.12 (11.16)	1.12 ±1.00	33.12 ±65.56 (16.84)	170.67 ±183.32 (54.44)	147.87 ±179.45 (46.41)	1.03 ±0.31	193.34 ±211.76 (48.63)
o-Xylene (LOD: 1.93)	9.32 ±6.78 (8.28)	9.12 ±7.98 (6.66)	1.49 ±0.97	11.43 ±11.87 (8.98)	33.45 ±72.23 (9.29)	50.52 ±85.12 (9.29)	1.96 ±2.16	39.49 ±92.25 (8.08)
m/p-Xylene (LOD: 1.88)	10.43 ±7.54 (8.48)	8.87 ±7.36 (6.66)	1.51 ±1.05	10.57 ±7.63 (7.98)	27.49 ±64.95 (8.69)	38.99 ±76.16 (8.70)	0.90 ±0.49	35.49 ±81.58 (7.78)
Ethylbenzene (LOD: 1.45)	1.33 ±1.14 (0.83)	1.69 ±1.75 (0.89)	0.94 ±2.13	1.77 ±1.79 (0.99)	1.33 ±0.71 (1.22)	1.64 ±0.85 (1.43)	0.97 ±0.54	1.97 ±2.28 (1.22)
n-Octane (LOD: 2.66)	8.02 ±10.73 (1.40)	2.47 ±2.43 (2.52)	1.36 ±1.38	4.78 ±6.53 (0.93)	52.7 ±108.5 (0.75)	24.72 ±62.18 (0.84)	1.04 ±0.85	28.00 ±35.72 (0.68)

\* Mean, S.D. and personal are not reported if detection in <20% of samples

Table 3. Measured VOCs concentrations of indoor, outdoor and personal exposure in offices

	Asan (n=10)				Seoul (n=10)			
	Indoor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Outdoor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	I/O	Personal ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Indoor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Outdoor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	I/O	Personal ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
	Mean±S.D. (Median)				Mean±S.D. (Median)			
Toluene (LOD: 1.92)	28.76 ±20.55 (21.35)	26.07 ±22.35 (16.55)	1.47 ±0.67	29.10 ±23.39 (20.07)	238.39 ±129.80 (206.02)	195.31 ±160.76 (181.73)	1.57 ±1.18	190.09 ±110.42 (165.67)
o-Xylene (LOD: 1.93)	17.57 ±15.15 (11.72)	9.79 ±6.59 (7.17)	2.29 ±1.77	13.87 ±8.23 (10.91)	29.07 ±9.42 (28.44)	29.94 ±11.64 (24.24)	0.92 ±0.28	26.49 ±15.13 (26.82)
m/p-Xylene (LOD: 1.88)	13.12 ±7.61 (12.60)	7.86 ±5.07 (5.96)	2.19 ±1.27	12.40 ±6.09 (10.30)	29.43 ±8.12 (29.49)	29.88 ±16.49 (24.24)	1.17 ±0.53	30.94 ±14.70 (30.10)
Ethylbenzene (LOD: 1.45)	7.46 ±9.32 (3.06)	2.42 ±1.93 (2.45)	2.30 ±2.05	4.35 ±3.71 (3.78)	4.05 ±2.13 (3.74)	3.87 ±2.24 (3.37)	1.15 ±0.45	2.99 ±2.35 (2.45)
n-Octane (LOD: 2.66)	15.33 ±14.57 (13.06)	7.41 ±8.22 (3.54)	5.72 ±8.78	9.43 ±8.64 (6.87)	31.87 ±49.68 (11.19)	30.07 ±49.68 (11.19)	4.93 ±8.14	22.94 ±26.42 (8.39)

\* Mean, S.D. and personal are not reported if detection in <20% of samples

3.2. 주택 실내, 실외 및 개인노출 VOCs 농도의 상관성 분석

동시에 측정된 실내, 실외 및 개인노출의 VOCs 농도 사이의 상관성은 동일한 배출원의 영향을 추정할 수 있기 때문에 아산시와 서울시에서 측정된 일반 주택 실내 및 실외의 VOCs 농도와 그 주택에 거주하는 사람의 VOCs 개인노출 농도를 연관하여 상관성 분석을 하였다(Table 5와 Table 6). 한편, 서

울시와 아산시에서 측정된 사무실과 PC방의 VOCs 농도는 적은 측정수와 불검출로 분석에서 제외하였다. 아산시와 서울시의 참여자들은 측정기간 동안 주택 실내에서 하루 24시간 중 소요시간은 아산 51.4%, 서울 60.7%를 나타내었다. 가장 많은 시간을 보냈다. 전체 참여자들은 실내환경에서 하루 24시간 중 평균 76.8%, 실외에서 평균 9.8%를 나타내었다. Toluene은 아산시에서 실내·외 Spearman 상관

Table 4. Measured VOCs concentrations of indoor, outdoor and personal exposure in internet-cafes

	Asan (n=10)				Seoul (n=10)			
	Indoor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Outdoor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	I/O	Personal ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Indoor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Outdoor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	I/O	Personal ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
	Mean±S.D. (Median)				Mean±S.D. (Median)			
Toluene (LOD: 1.92)	29.88 ±11.78 (30.40)	18.51 ±10.09 (17.23)	1.75 ±0.72	32.12 ±14.48	358.97 ±469.20 (212.09)	218.07 ±115.68 (253.65)	1.59 ±1.42	230.52 ±64.52 (240.60)
o-Xylene (LOD: 1.93)	15.90 ±10.19 (12.90)	9.79 ±4.71 (10.29)	1.66 ±0.61	14.41 ±8.26 (12.32)	38.11 ±56.96 (21.30)	17.04 ±11.84 (14.55)	1.31 ±1.03	20.99 ±13.65 (20.60)
m/p-Xylene (LOD: 1.88)	15.06 ±11.09 (10.51)	8.88 ±4.31 (9.48)	1.71 ±0.76	13.68 ±8.85 (10.90)	46.91 ±27.46 (49.09)	39.03 ±24.34 (42.07)	1.10 ±0.56	41.16 ±17.86 (45.00)
Ethylbenzene (LOD: 1.45)	4.26 ±3.08 (3.67)	2.53 ±1.67 (3.26)	2.61 ±1.94	4.56 ±2.57 (4.69)	6.02 ±7.30 (3.26)	2.57 ±1.30 (2.65)	1.40 ±1.18	3.49 ±1.59 (3.50)
n-Octane (LOD: 2.66)	13.36 ±5.44 (12.65)	11.19 ±3.88 (12.31)	1.38 ±0.80	10.58 ±5.12 (8.95)	29.19 ±24.97 (18.00)	24.55 ±15.26 (18.27)	2.83 ±4.07	22.39 ±8.31 (20.95)

\* Mean, S.D. and personal are not reported if detection in <20% of samples

Table 5. Correlation (Spearman's coefficient) among indoor, outdoor and personal exposure in relation to VOCs concentrations in houses, Asan

Component	Asan		
	Indoor/outdoor	Outdoor/personal	Indoor/personal
Toluene	r = 0.355 (p = 0.097)	r = 0.472 (p = 0.031)	r = 0.449 (p = 0.032)
o-Xylene	r = 0.538 (p = 0.021)	r = 0.414 (p = 0.088)	r = 0.284 (p = 0.201)
m/p-Xylene	r = 0.449 (p = 0.035)	r = 0.474 (p = 0.035)	r = 0.280 (p = 0.232)
Ethylbenzene	r = 0.269 (p = 0.313)	r = 0.724 (p = 0.002)	r = 0.405 (p = 0.096)
n-Octane	r = 0.400 (p = 0.505)	r = 0.286 (p = 0.535)	r = 0.821 (p = 0.023)

\* Correlation coefficients are not reported if detection in <20% of samples

Table 6. Correlation (Spearman's coefficient) between indoor, outdoor and personal exposure in relation to VOCs concentrations in houses, Seoul

Component	Seoul		
	Indoor/outdoor	Outdoor/personal	Indoor/personal
Toluene	r = 0.605 (p = 0.001)	r = 0.641 (p = 0.000)	r = 0.804 (p = 0.000)
o-Xylene	r = 0.653 (p = 0.001)	r = 0.335 (p = 0.000)	r = 0.560 (p = 0.000)
m/p-Xylene	r = 0.420 (p = 0.023)	r = 0.298 (p = 0.109)	r = 0.546 (p = 0.002)
Ethylbenzene	r = 0.279 (p = 0.197)	r = 0.139 (p = 0.517)	r = 0.369 (p = 0.076)
n-Octane	r = 0.412 (p = 0.555)	r = 0.630 (p = 0.028)	r = 0.521 (p = 0.083)

\* Correlation coefficients are not reported if detection in <20% of samples

계수(r)는 0.355로 실내농도가 실외농도에 영향이 적은 반면, 서울시의 경우는 0.605로 실외농도가 실내농도에 통계적으로 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다(p= 0.001). 아산시의 Toluene 개인노출 농도와 실내·외 농도간의 상관성은 각각 0.472 (p<0.031), 0.449 (p<0.032)로 큰 차이를 보이지는 않았으나, 서울시에서는 개인노출 농도가 실외보다는 실내농도에 높은 상관성을 나타내었다. o-Xylene 상관성 분석에 의하면, 아산시와 서울시 실내·외 농도의 상관성은 각각 0.538 (p=0.021), 0.653 (p=0.001)로 통계적으로 유의한 관련성을 나타내고 있다. 아산시 o-Xylene 개인노출은 실외농도와 연관성이 실내농도 보다 높았으며, 반면에 서울시에서는 실외농도보다 실내농도에 높은 연관성을 나타내었다. 또한 m/p-Xylene도 o-Xylene과 마찬가지로 아산에서는 개인노출이 실외농도와 연관성이 높았으며, 서울시에서는 실내농도와 높은 연관성을 나타내었다.

종합적으로 상관성 분석을 고려하면, VOCs의 실내와 실외농도의 관련성은 아산시보다 서울시가 o-Xylene을 제외한 모든 화합물에서 높았다. 그 이유는 실내/실외 VOCs 농도비와 같이 아산시의 측정 주택이 주로 아파트(96.7%)였고 서울시는 연립주택(46.7%)에 의한 환기량의 차이 때문인 것으로 생각한다. 대상 VOCs 개인노출은 아산시에서 대상자인 대학생들의 높은 실외활동 행태와 서울시의 전업주부 등의 상대적인 활동행태 때문에, 아산시는 n-Octane을 제외한 모든 화합물에서 개인노출은 실외농도와 높은 상관성을 나타내었고 서울시는 n-Octane을 제외한 화합물에서 실내농도와 높은 상관성을 나타내었다. 한편, VOCs 개인노출 참여자들이 아산시는 주로 대학생이었고 서울시는 직장인 및 전업주부여서 각 지역의 거주민을 대표하기에는 부적절할 수 있으며 두 인구집단의 성별, 연령별 차이로 직접적 비교는 어렵지만, 오히려 각 참여자들의 VOCs 개인노출 결과는 활동행태의 중요성에 대하여 Johnson et al.의 연구결과에서 지적한 바와 같은 결과를 나타내고 있는 것으로 확인되었다<sup>28)</sup>.

### 3.3. 시간가중치 모델을 이용한 개인노출 예측

누적 VOCs 개인노출량은 각 개인이 시간을 보낸 미세환경(micro-environment)의 농도와 시간을 곱하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다<sup>29)</sup>.

$$E_c = \sum C_k \cdot T_k \quad (1)$$

(K= 1, ..., N : microenvironment types)

여기서, C<sub>k</sub>는 각 미세환경의 VOCs 농도, T<sub>k</sub>=

각 미세환경에서 보낸 시간이다. 식 (1)을 이용하여 참여자의 공기오염물질의 누적 VOCs 노출량은 개인 주택 실내 및 실외의 VOCs 농도 및 각 장소에서 머무른 시간을 곱하여 식 (2)로 나타낼 수 있다. 식 (2)는 시간가중 평균모델(Time Weighted Average, TWA)로 정의할 수 있다.

$$P_i = (IH_i \cdot I_i + OH_i \cdot O_i) / (IH_i + OH_i) \quad (2)$$

여기서, P<sub>i</sub>= 참여자 i의 시간가중 평균치에 의해 예측된 VOCs 개인노출농도 (μg/m<sup>3</sup>), IH<sub>i</sub>= 참여자 i의 측정기간 동안 주택 실내에서 보낸 시간 (hr), OH<sub>i</sub>= 참여자 i의 측정기간 동안 주택 실외에서 보낸 시간 (hr), I<sub>i</sub>= 참여자 i의 주택 실내에서 측정된 VOCs 농도 (μg/m<sup>3</sup>), O<sub>i</sub>= 참여자 i의 주택 실외에서 측정된 VOCs 농도 (μg/m<sup>3</sup>).

서울에서 시간가중 평균모델 식 (2)를 이용하여 예측된 평균 VOCs 개인노출과 VOCs OVM 수동식 시료채취기를 이용하여 실측된 개인노출을 Table 7에 나타내었다. 참여자들이 시간을 보낸 모든 실내환경 및 실외환경의 VOCs 농도가 측정된 것은 아니었기 때문에, 식 (2)에서 예측된 VOCs 개인노출과 실측된 VOCs 개인노출간의 결정계수 (r<sup>2</sup>)가 통계적으로 유의하게 연관성을 나타낸 것은 Toluene (p=0.05)과 n-Octane (p<0.05) 이었다.

### 3.4. 설문조사와 VOCs 농도의 상관성 분석

#### 3.4.1. Toluene

주거형태에 따른 실내 및 개인노출 Toluene 농도는 연립이 아파트보다 통계적으로 유의하게 높았으며, 실내농도 역시 연립이 아파트보다 매우 통계적으로 유의하게 높게 나타났다(p<0.05). 이 결과는

Table 7. Relationship between expected and measured VOCs personal exposures

	VOCs exposure			
	Measured (μg/m <sup>3</sup> ) (Median)	Expected (μg/m <sup>3</sup> ) (Median)	r <sup>2</sup>	p-value
Toluene	120.1±179.9 (37.2)	110.9±156.9 (31.7)	0.1679	0.05
o-Xylene	12.75±18.26 (8.09)	8.95±5.91 (7.78)	0.0868	0.1912
m/p-Xylene	24.18±61.4 (7.88)	9.12±6.56 (7.07)	0.0359	0.4374
Ethylbenzene	1.79±2.06 (1.12)	1.36±1.17 (1.15)	0.1372	0.1924
n-Octane	7.88±27.64 (0.56)	9.04±18.45 (2.68)	0.3057	0.0345

Benzene과 비슷한 결과로 아산시는 아파트가 서울시는 상대적으로 연립주택이 조사대상에 많아 분포되어 있기 때문일 것으로 생각한다. 또한 건축 년수에 관련된 개인과 실내 모두 3년 미만의 주택이 3년 이상의 주택보다 높게 나타났으나 통계적으로는 유의하지 않았다. 주거환경과 관련한 통계분석 결과에서는 개인, 실내 모두 도로변 주변이 높게 나타났으나 통계적으로 유의하지는 않게 나타났지만(p=0.075), 도로변 주변의 주택은 차량으로 인한 실외 VOCs에 영향을 받을 수 있음을 의미하였다.

3.4.2. o-Xylene

주거형태와 관련된 개인노출 농도는 연립이 아파트보다 통계적으로 유의하게 높았으며, 실내농도 역시 연립이 아파트보다 통계적으로 유의하게 높게 나타났었다(p<0.05). Benzene, Toluene과 같은 결과를 나타내었다. 건축 년수와 관련해서는 개인노출, 실내농도 모두 3년 이하의 농도가 높게 나타났으나 통계학적으로 유의한 차이를 나타내지는 못하였다. 살충제 사용과 관련한 통계 분석결과에서는, 살충제의 사용은 o-Xylene 개인노출 농도의 경우 유의한 차이를 보이지 않았으나, 실내농도에서는 살충제를 사용할수록 통계적으로 유의하게 높게 나타났었다(p<0.05).

3.5. VOCs 노출에 따른 건강영향

본 연구에서는 아산시와 서울시에서 측정된 휘발성 유기화합물질과 설문지를 통한 건강영향과의 관련을 통계학적으로 분석(ANOVA)하였다. 설문지는 두통, 피로함, 불안 · 흥분, 피부염, 시력, 기억력, 눈통증, 목 통증과 신경질 항목이었다. 비록 VOCs 노출에 따른 건강영향이 의학적 측정은 아니었지만, 설문지 항목 중 o-Xylene과 연관하여 건강영향

을 준 것은 흥분과 기억력이었다. 주택의 실내 o-Xylene 농도와 개인 o-Xylene 노출이 증가할수록 흥분상태가 증가하고 기억력이 나빠진다고 참여자들은 응답하였다 (Table 8).

공기오염물질에 의한 건강영향은 단기간에 발생하는 것보다는, 대부분 장기간의 노출에 의한 만성질환이다. 본 결과는 순간점 공기오염물질 농도와 건강영향에 관한 연구로 장기간의 만성질환을 파악하기 어려운 점을 나타내었다. 향후 연구 참여자의 장기간의 추적조사가 수행되는 것이 필요하다. 따라서, 공기오염물질과 그에 따른 건강영향을 파악하기 위해서는 좀 더 대규모로 수행되어야 할 것이다. 그리고, 설문사항 중 건강자각 증상부분에서는 실질적인 의학적 조사가 아니라는 한계가 있다.

4. 결 론

본 연구는 2001년 8월~9월 아산지역과 서울지역의 일반주택, 사무실, PC방의 실내, 실외 그리고 개인노출에 대한 휘발성 유기화합물(VOCs)의 농도와 각 농도에 영향을 미치는 요인을 분석하였다. 아산시와 서울시의 농도를 비교하면 실내 · 외 환경에서 대상 VOCs 대부분이 서울시의 농도가 높았다. 주택, 사무실, PC방의 실내/실외 농도비(I/O)는 Ethylbenzene을 제외하고 1 이상을 나타내었다. VOCs 개인노출은 아산시의 경우 n-Octane을 제외하고 실내농도보다는 실외농도와 높은 상관성을 나타내었고, 서울시는 n-Octane을 제외하고 실내농도와 더 높은 상관성을 보였다. 그 이유는 아산시의 참여자가 주로 대학생이었고, 서울시는 전업주부인 여성이 상대적으로 많았기 때문이다. 이 결과는 시간에 따른 활동행태는 개인의 고노출(high exposure) 또는 저노출(low exposure)을 야기시킬 수 있음을 나타낸다. 설문지를 이용한 측정농도와 통계분석 결과는 주거 형태에서는 연립주택이, 주거 년수에서는 3년 미만의 주택이, 흡연, 살충제와 모기향의 사용에서는 사용 빈도가 높을수록, 화장품의 사용회수가 많을수록 농도가 높게 나타나는 경향을 나타내었다. 실내농도와 개인노출농도에 따른 건강자각증상의 영향에 대한 분석에서는 VOCs에 대한 노출은 기억력 감소, 불안과 흥분의 증상을 야기시킬 가능성이 있는 것으로 나타났다. 국내에서는 1970년대 이후 산업의 발달과 도시화 등으로 인한 실내공간의 사용증가와 밀폐화가 가속됨에 따라 실내공기질에 대한 연구가 활발히 진행되어야 할 것이다. 실내에서 발생하는 오염물질도 다양화되어 이제 작업장 실내환경만이 중요한 것이 아니라 현대인의 주생활 공간인 주택 등의 실내환경의 공기

Table 8. Relationship between o-Xylene concentration, and exciting and memory effect

	Mean ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	F-value	p-value
<b>Exciting</b>			
Very frequent (n=2)	43.28	3.203	.032
Frequent (n=6)	24.44		
Seldom (n=20)	13.33		
No effect (n=21)	5.74		
<b>Memory</b>			
Severe (n=10)	65.51	4.309	.019
Seldom (n=20)	10.42		
No effect (n=18)	0.40		



질에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 필요성이 있는 것으로 밝혀졌다.

참고문헌

- 1) Lee, J. T., D. Shin and Y. Chung, 1999, Air pollution and daily mortality in Seoul and Ulsan, Korea, *Environment Health Perspective*, 107(2), 149-154
- 2) Sohn, J. Y., 1996, Research activities on indoor air quality in Korea, *The 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, 17-26pp.
- 3) Lee, K., W. Yang and N. Bofinger, 2000, Impact of microenvironmental nitrogen dioxide concentrations on personal exposure in Australia, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50, 1739-1744.
- 4) Wade, W. A., W. A. Cote and J. E. Yocom, 1975, A study of indoor air quality. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 25(9), 933-939.
- 5) US. EPA., 1990, Science Advisory Board : Reducing risk-setting priorities and strategies for environmental protection, SAB-EC-90-021, 9-12pp.
- 6) 환경부, 1999, 실내공기질 관리방안에 관한 연구, 10-16pp.
- 7) Jones, A. P., 1999, Indoor air quality and health, *Atmospheric Environment*, 33, 4535-4564.
- 8) Bloemen, H. J. and J. Burn, 1993, Chemistry and analysis of volatile organic compounds in the environment, Blackie Academic & Professional, 35-74pp.
- 9) Brooks, B. O., G. M. Utter, J. A. DeBroy and R. D. Schimke, 1991, Indoor air pollution: an edifice complex, *Clinical Toxicology*, 29(3), 315-374.
- 10) Sack, T. M., D. H. Steele, K. Hammerstrom, and J. Remmers, 1992, A Survey of Household Products for Volatile Organic Compounds, *Atmospheric Environment*, 26A(6), 1063-1070.
- 11) Flint, P. and R. Otson, 1994, Assessment of the influence of climatic factors on concentration levels of volatile organic compounds (VOCs) in Canadian homes, *Atmospheric Environment*, 28(22), 3581-3586.
- 12) Wallace, L. A., 1991, Comparison of risks from outdoor and indoor exposure to toxic chemicals, *Environment Health Perspective*, 95(1), 7-13.
- 13) 환경부, 2001, 환경백서, 365-366pp.
- 14) Schwab, M., S. D. Colome, J. D. Spengler, B. P. Ryan and I. H. Billick, 1990, Activity patterns applied to pollutant exposure assessment: data from a personal monitoring study in Los Angeles, *Toxicology and Industrial Health*, 6(6), 517-532.
- 15) Chung, C. W., M. T. Morandi, T. H. Stock and M. Afshar, 1999, Evaluation of a passive sampler for volatile organic compounds at ppb concentrations, varying temperature, and humidities with 24-h exposures. 2. sampler performance, *Environ. Sci. Technol.*, 33, 3666-3671.
- 16) 3M, Organic Vapor Monitor #3500 Analysis Guide, Occupational Health and Safety. Products Division/3M (<http://www.3m.com>).
- 17) Uchiyama, S., M. Asai and S. Hasegawa, 1999, A sensitive diffusion sampler for the determination of volatile organic compounds in ambient air, *Atmospheric Environment*, 33, 1913-1920.
- 18) Edwards, R. D., J. Jurvelin, K. Saarela and M. Jantunen, 2001, VOC concentrations measured in personal samples and residential indoor, outdoor and workplace microenvironments in EXPOLIS-Helsinki, Finland, *Atmospheric Environment*, 35, 4531-4535.
- 19) Cohen, M. A., P. B. Ryan, H. Ozkaynak and P. S. Epstein, 1989, Indoor/outdoor measurements of volatile organic compounds in the Kanawha valley of west Virginia, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 39, 1086-1093.
- 20) Gordon, S. M., P. J. Callahan, M. G. Nishioka, M. C. Brinkman, M. K. O'rourke, M. D. Lebowitz, and D. J. Moschandreas, 1999, Residential environmental measurements in the National Human Exposure Assessment Survey (NHEXAS) pilot study in Arizona: preliminary results for pesticides and VOCs, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 9, 456-470,
- 21) 양원호, 배현주, 정문호, 2002, 거주지역 실내공

- 기 특성 및 이산화질소 노출에 관한 연구, 한국 환경위생학회, 28(2), 183-192.
- 22) Sexton, K., R. Letz and J.D. Spengler, 1983, Estimating human exposure to nitrogen dioxide: An indoor/outdoor modeling approach. *Environmental Research*, 32, 151-166.
- 23) Takekito, O., 2000, 2000년 국제 학술 심포지움 및 총회, 2002년 월드컵을 대비한 실내공기오염 관리방, 대한위생학회, 1-21pp.
- 24) Schneider, P., G. Lorinci, I.S. Gebeffugi, J. Heinrich, A. Ketterup and H.E. Wichmann, 1999, Vertical and horizontal variability of volatile organic compounds in home in eastern Germany, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 9(4), 282-292.
- 25) 백성욱, 김윤신, 1998, 도시지역 실내환경 유형별 공기질 특성 평가 -가정, 사무실 및 식당을 중심으로-, 한국대기보전학회지, 14(4), 343-360.
- 26) 양원호, 이선화, 백도명, 2001, 시간가중치 평균 모델을 이용한 이산화질소 노출 평가 및 예측, 한국대기환경학회지, 17(3), 251-258.
- 27) Ortiz, E., E. Alemn, D. Romero, J.L. Arriaga, P. Olaya, F. Guzman and C. Rios, 2002, Personal exposure to benzene, toluene and xylene in different microenvironments at the Mexico city metropolitan zone, *The Science of the Total Environment*, 287, 241-248.
- 28) Johnson, T., T. Long and W. Ollison, 2000, Prediction of hourly microenvironmental concentrations of fine particles based on measurements obtained from the Baltimore scripted activity study, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 10, 403-411.
- 29) Levy, J. I., K. Lee, J. D. Spengler and Y. Yanagisawa, 1998, Impact of residential nitrogen dioxide exposure on personal exposure: An international study, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 48, 553-560.