한국대기환경학회지 제 28 권 제 4 호
J. KOSAE Vol. 28, No. 4 (2012) pp. 435～445
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
DOI: http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.4.435

통계분석을 이용한 아파트내 휘발성유기화합물의 환경인자 분석

Analysis of VOCs Infiluencing Environment Factors Using Statistics in Apartment House

이세행 · 김난희 · 이경석 · 박강수 · 박승열 · 김도술
강영주 · 김은선 · 김동수*
광주광역시보건환경연구원 환경연구부

(2012년 5월 2일 접수, 2012년 6월 15일 수정, 2012년 7월 17일 채택)

Se-haeng Lee, Nan-hee Kim, Kyoung-soek Lee, Kang-soo Park, Seung-yeol Park, Do-sool Kim, Yeong-ju Kang, Eun-sun Kim and Dong-su Kim*
Gwangju Metropolitan Health & Environment Research Institute
Department of Environmental Engineering

(Received 2 May 2012, revised 15 June 2012, accepted 17 July 2012)

Abstract

The aim of this study is to understand the characteristics of volatile oranic compounds (VOCs) and provide information about the present Indoor Air Quality (IAQ) at residential apartments. All samples were collected in 60-min interval using the tenax absorption trap between May, 2011 and February, 2012. And the effects of environmental factors such as temperature, humidity and construction characteristics were analyzed in relation to the measured concentrations.

The results of this study showed that the mean concentration of VOCs was lower than the Ministry of the Environment's standards for maintenance of indoor air quality. The correlation analysis showed that ethylbenzene and xylene ($r=0.916$, $p<0.01$), toluene and ehtylbenzene ($r=0.810$, $p<0.01$), toluene and xylene ($r=0.803$, $p<0.01$) and toluene and styrene ($r=0.588$, $p<0.01$) were significant. The result of regression analysis was found that the influenece factors associated with the concentration of VOCs were the age and location of the apartment, remodeling, the temperature and the season.

Key words : VOCs, Environmental factor, Correlation analysis, Regression analysis

1. 서 론

요즘은 건축 기술의 발달과 건물의 성능 향상, 고단열 건물의 보급으로 실내공기 오염이 심화되고, 제어해야 할 오염물질이 늘어나고 있는 실정이다. 특히

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)62-613-7610, E-mail : kds2628@korea.kr

석유파동 이후 각 부문에서 에너지 소비절약 정책으로 건물이 기밀구조화 되면서 환기가 부족해 천식, 아토피 피부염, 두통, 현기증 등 실내공기질 관련 증상이 크게 늘어나고 있다(Montoya *et al.*, 2001; Ha, 2001; Lee *et al.*, 1996).

실내공기는 실외와는 달리 실내의 오염원과 실외 오염물질의 유입에 의해 오염될 경우 쉽게 정화되지 않을 뿐만 아니라 재실자들의 건강까지도 위협하고 있다(Nju *et al.*, 2001; John *et al.*, 1998). 실내공기는 일반 대기환경과는 달리 물리, 화학적 및 생물학적으로 매우 다양한 오염물질들이 존재하고 있는 것으로 알려져 있다. 또한 이들 오염물질들은 복합적인 배출원에서 기인되며, 그 발생량 또한 물질에 따라 상당한 편차를 보이고 있다(서병량, 2003).

실내공기질에 영향을 미치는 오염물질로는 미세먼지, 이산화탄소, 일산화탄소, 폼알데하이드, 총부유세균, 석면, 라돈, 오존, 이산화질소, 휘발성유기화합물 등이 있다. 이 중 휘발성유기화합물(VOCs)은 독성이 문제가 되고 있는 물질로 인체뿐만 아니라 자연환경에도 유해한 영향을 미치며, 대기 중에서 질소산화물과 광화학반응을 일으켜 오존 및 광화학적 산화물질을 생성시키기도 한다(신호상 등, 2004). 그 중 벤젠은 자동차의 배출가스, 담배연기, 세제 등에 많이 포함되어 있고, 톨루엔은 페인트, 등유난방기, 카페트, 자일렌은 고무접합제나 페인트 등에서 방출된다. 이러한 오염물질은 피로, 두통, 호흡곤란 등 인체에 발암성과 위해성을 갖는 물질로 거주자들의 건강을 위협하는 대표적인 실내공기 오염물질이다(Amir *et al.*, 2005; WHO, 2002; 정 용 등, 1997; Harley *et al.*, 1995).

실내의 접착제, 페인트, 가구, 생활용품, 건축자재로부터 발생하는 휘발성유기화합물은 그 특성상 오랜 기간 실내로 방출되며, 실내온도 및 습도에 의하여 실내로의 방출속도가 다르다고 알려져 있다(심상효, 2006). 따라서 밀폐된 실내공간에서 냉방과 난방 등에 의하여 온도와 습도가 변화하면 실내 휘발성유기화합물의 발생량과 농도가 달라지게 된다(Yang *et al.*, 2001). 따라서 국내에서도 실내의 생활용품이나 건축자재에서 발생되는 휘발성유기화합물의 측정방법, 실내 농도 실태, 위해성 분석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(심상효, 2006; 손부손 등, 2005; 김창남, 2004).

또한 우리나라는 2005년 12월에 신축공동주택의 실내공기질 권고기준을 설정하여 입주하기 전 실내공기질을 관리하도록 하고 있다(환경부, 2004). 그러나 이 법규는 사람들이 거주하고 있는 공동주택은 포함되어 있지 않아 대부분의 시간을 주거공간에서 보내고 있는 어린이와 노인 등 건강 취약 계층의 건강보호를 위해서는 주거공간의 실내공기질 관리가 필요하다.

최근 선진국에서는 거주공간을 비롯한 실내공간의 오염물질과 건강 영향에 대하여 많은 연구를 진행하고 있고 대부분의 연구들은 자국의 실내공기 오염 실태조사, 실내 오염에 영향을 미치는 인자 파악, 환기를 통한 실내공기 오염 제어방법 연구, 건축자재별 오염 방출 조사, 그리고 실내공기 오염으로 인한 건강영향 평가 등을 목적으로 이루어지고 있다(Lee *et al.*, 2006; Yamaguchi *et al.*, 2006; Shun *et al.*, 2002; Mølhave *et al.*, 1996; Strachan *et al.*, 1989).

따라서 본 연구에서는 실제 사람들이 거주하고 있는 아파트에 대해 휘발성유기화합물질의 농도를 시간대별, 계절별로 조사하고, 통계프로그램을 이용하여 휘발성유기화합물질간의 상관성 및 아파트의 연면적, 경과년수, 온 · 습도 등 환경인자와의 상관성을 분석함으로써 휘발성유기화합물질로부터 내실자의 건강을 보호하고 향후 아파트 실내공기질 관리의 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 연구방법

2. 1 연구대상

본 연구에서는 아파트 실내공기질에 영향을 미칠 것으로 판단되는 항목을 조사하여 표 1과 같이 실내

Table 1. Characteristics of the studied apartments.

Site	Year of construction	Floor	Size (m^2)	Indoor staff	Remodeling
A-1	2008	1 F	142	3	×
A-2	2007	8 F	110	3	×
A-3	2006	13 F	116	4	×
A-4	2006	10 F	115	3	×
A-5	2001	15 F	160	4	×
A-6	1999	3 F	106	4	×
A-7	1995	14 F	162	4	2009
A-8	1998	18 F	125	4	2004
A-9	1995	3 F	106	4	2002

개조 유무, 건축년도별로 아파트 9개소를 선정하였으며, 또한 측정대상의 다양성을 줄이기 위해 아파트 연면적이 100 m^2 이상이고, 거주인이 3～4인인 아파트를 선정하였다. 조사기간은 2011년 3월부터 2012년 2월까지 봄(2011. 3～4), 여름(2011. 6～8), 가을(2011. 9～11), 겨울(2011. 11～2012. 2)로 나누어 계절별 1회씩 휘발성유기화합물질을 조사하였다. 조사항목은 건축자재 및 가구, 생활용품 사용으로 인해 배출가능성과 인체위해성이 높은 5개 물질(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene, Styrene)을 대상으로 조사하였다.

2. 2 측정 및 분석방법

실내공기질 공정시험기준에서 신축아파트의 실내공기질 측정은 30분 사전환기 5시간 밀폐 후 시료채취하도록 규정하고 있으나, 본 연구에서는 실제 거주하고 있는 상태에서 휘발성유기화합물의 농도변화 추이를 조사하기 위해 24시간 동안 매시간 시료를 채취하여 분석하였다.

시료채취는 Stainless steel 재질의 Tenax 흡착관(¼ inch O.D.×3 ½ inch long)으로 MTS-32 (Markes, UK)를 사용하여 100 mL/min으로 1시간 간격으로 24시간 채취하였다. Tenex 흡착관은 사용 전 Tube Conditioner TC-20 (Markes, UK)을 이용하여 고순도 질소가스(99.999%)가 100 mL/min로 흐르는 조건하에서 320˚C에서 2～3시간 동안 전처리하여 오염 여부를 확인한 다음 사용하였다. 유량 측정은 디지털 유량계 (Alltech, U.S.A)를 이용하였고, 측정이 끝난 시료는 반드시 PTFE 패럴을 이용하여 막은 다음 운반하여 분석 전까지 냉장 보관(4˚C 이내)하였다.

시료채취 및 보관시 부가적으로 발생할 수 있는 오염의 개연성을 보정하기 위하여 현장용 바탕시료 및 실험실용 바탕시료를 실제 시료채취용과 동일한 흡착관으로 준비하여 분석하였다.

휘발성유기화합물 분석은 가스크로마토그래프에 열탈착장치(TD : Thermal Desorption, Markes, UK)가 직접 연결된 가스크로마토그래프/질량분석기 (GC/MS, 6890N, Agilent, USA) 시스템을 사용하였고, 시료 분석에 사용된 열탈착장치와 GC/MS의 운전조건은 표 2와 같다. 기기 분석용 가스는 헬륨(99.999%)을 사용하였고, 휘발성유기화합물의 표준물질은 액체상 표준혼합물질 (100 ppm, Supelco)을 사용하였다. 또한 실내공기 오염물질은 온도와 습도의 영향을 많이 받으므로 공기질을 측정하는 동안 측정지점의 온도와 습도를 Watch700 (Watchdog, DE)을 이용하여 측정하였다.

2. 3 정도관리

휘발성유기화합물질의 분석결과에 대한 정밀·정확도를 확인하기 위해 실내공기질공정시험기준(Korean Ministry of Environment, 2010)에 따라 측정 전에 시료채취시 사용된 고체흡착관의 파과용량을 평가하고, 휘발성유기화합물의 재현성, 방법검출한계 및 회수율 실험을 실시하였다.

Tenax-TA가 충진된 고체흡착관에 포집된 VOCs의 파과용량을 3차례 평가한 결과 표준물질 60,000

Table 2. The analysis conditions of TD and GC/MS.

	Parameter	Condition
Markes TD	Desorption temperature	270˚C
	Desorption time	8 min
	Cold trap	Hydrophobic (Tenax/Carbopack B)
	Cold trap low temperature	−10˚C
	Cold trap high temperature	300˚C
	Cold trap hold time	3 min
	Transfer line temperature	150˚C
	In split	No
Agilent GC/MS	Column	DB-1 (60 m × 0.32 mm × 3.0 μm)
	Carrier gas and flow	He (99.999%), 1.0 mL/min
	GC temperature program	40˚C (5 min)→10˚C/min→250˚C (4 min)
	Detector type	EI (Quadrupole)
	MS source temperature	230˚C
	Electron energy	70 eV
	Mass range	35～350 amu

ng에서 실내공기질 공정시험기준에서 정한 파과기준인 5%를 초과하였다. 따라서 본 연구의 조사대상인 아파트에서는 휘발성유기화합물질 농도가 60,000 ng 이하이므로 파과는 발생하지 않는다고 볼 수 있다.

검량선은 표준시료 함침 장치를 이용하여 액상 표준물질(50 ng, 100 ng, 200 ng, 400 ng)을 흡착관에 함침받아 실제 시료 분석시와 동일한 조건으로 분석하였다. 시료분석시 매번 검량선을 작성하였으며, 직선성 평가 결과 결정계수(R^2)가 0.999 이상으로 나타났다.

GC/MS에 의한 휘발성유기화합물의 재현성, 방법검출한계, 회수율을 4번 평가한 결과, 재현성은 머무름 시간에 대한 상대표준편차가 0.2% 이하, 피크면적에 대한 상대표준편차는 8.0% 이하로 재현성이 좋게 나타났다. 방법검출한계는 벤젠은 0.62～0.95 μg/m^3, 톨루엔은 0.70～3.28 μg/m^3, 에틸벤젠은 0.24～0.65 μg/m^3, 자일렌은 0.22～0.65 μg/m^3, 스티렌은 0.16～1.03 μg/m^{3}으로 분석되었으며, 열탈착 장치의 회수율도 90～100%로 양호하게 나타났다.

2. 4 결과 분석

본 연구에서는 조사대상 아파트의 실내공기중 휘발성유기화합물질의 측정지점별, 계절별, 시간대별 농도를 산출하여 평균, 표준편차, 최소값, 최대값 등을 기술통계량을 산출하였으며, 총휘발성유기화합물(TVOC)은 실내공기질공정시험기준에 C6～C16 사이의 휘발성유기화합물질을 톨루엔으로 정량토록 되어 있으나 본 연구에서는 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 합으로 TVOC를 산출하여 분석하였다.

또한 휘발성유기화합물질과 주변 환경인자들과의 관계를 분석하기 위해 다변량 통계분석을 이용하였다. 다변량 통계분석은 조사한 변수가 여러 개인 경우 한 변수와 다른 여러 변수간의 관계를 파악할 때 사용하는 분석방법으로 통계프로그램 SPSS 20.0을 이용하여 t-검정, 분산분석, 상관분석, 다중회귀분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 VOCs의 농도분포

입주자가 거주중인 아파트 거실에서의 VOCs 농도를 조사한 결과 표 3과 같으며, toluene＞xylene, ethylbenzene＞styrene＞benzene 농도 순으로 조사되었다. 이는 건축자재, 가구 등에서 방출되는 휘발성유기화합물질을 조사한 연구결과와 신설학교, 신축아파트의 실내공기 중 휘발성유기화합물을 조사한 연구자료에서와 같이 톨루엔이 가장 높게 나타났으며, 또한 전체 휘발성유기화합물질의 농도 중 톨루엔이 50% 이상을 차지하고 있음을 알 수 있었다(박지연 등, 2010; 최진수 등, 2010; 조장재 등, 2004).

Table 3. Distribution of VOCs concentration in apartment house. (unit: μg/m^3)

	Standard	Concentration (n=864)			
		Mean	S.D.	Min	Max
Benzene	30	1.77	1.07	0.10	6.83
Toluene	1,000	23.19	20.55	1.25	171.79
Ethylbenzene	360	5.92	15.52	0.30	124.61
Xylene	700	5.93	6.99	0.44	51.53
Styrene	300	2.00	1.39	0.13	9.21
TVOC	–	38.81	41.84	2.60	333.29

우리나라의 경우 실제 거주하고 있는 아파트에 대한 VOCs의 기준이 마련되어 있지 않아 「다중이용시설 등의 실내공기질 관리법」에서 규정한 신축공동주택의 VOCs 권고기준과 비교한 결과, 벤젠은 평균 1.77 μg/m^3, 톨루엔은 평균 23.19 μg/m^3, 에틸벤젠은 평균 5.92 μg/m^3, 자일렌은 5.93 μg/m^3, 스티렌은 평균 2.00 μg/m^{3}으로 9개 아파트 모두 권고기준 이내로 적합하였다. 하지만 심상효 등(2006)의 신축공동주택 VOCs 연구결과를 보면 실내공기중 휘발성유기화합물의 농도가 낮더라도 어린이, 노약자들은 주로 실내 주거공간에서 생활하기 때문에 건강에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 보고하고 있다.

VOCs의 각 항목별로 평균 농도를 분석한 결과 벤젠은 A-2 지점이 2.24 μg/m^{3}로 가장 높았고, 톨루엔은 A-1 지점이 43.04 μg/m^3, 에틸벤젠은 A-1 지점이 29.16 μg/m^3, 자일렌은 A-1 지점이 15.27 μg/m^3, 스티렌은 A-1 지점이 3.99 μg/m^3, TVOC는 A-1 지점이 93.04 μg/m^{3}으로 가장 높게 나타났다. 대체로 A-1 지점은 다른 지점보다 VOCs의 농도가 높게 나타났는데, 이는 A-1 지점이 2008년에 준공된 아파트로 경과년수가 짧고, 1층에 위치하고 있어 사생활 보호와 보안 문제로 다른 지점보다 적절한 실내공기질 관리를 못하고 있는 것으로 확인할 수 있었다.

실외 공기오염에 의한 실내공기 오염도 영향 및

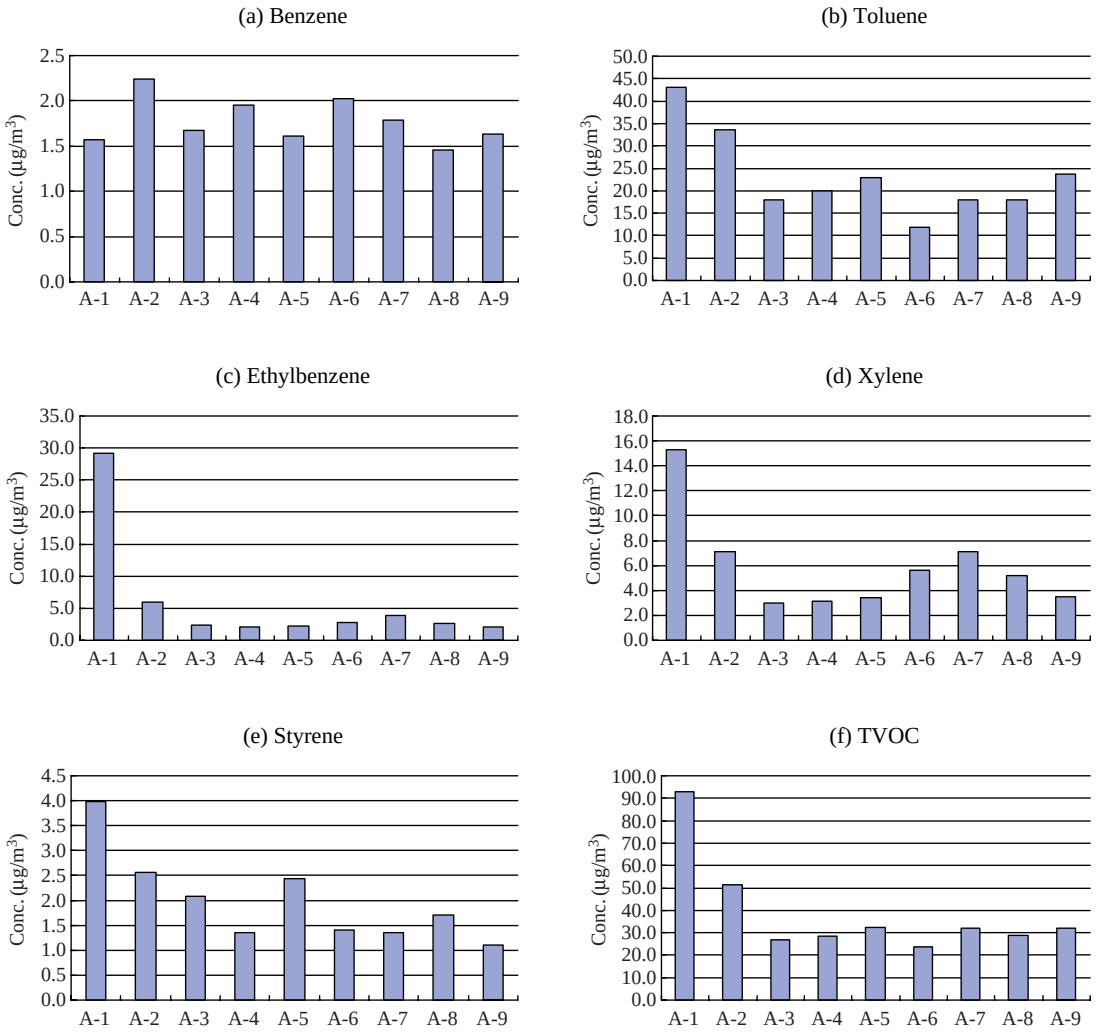

Fig. 1. Variation of VOCs concentration in apartment house.

실내오염원의 존재 유무를 파악하기 위하여 VOCs의 실내/외 농도비를 분석하여 표 4에 나타내었다. VOCs의 실내/외 농도비는 0.69～13.20 범위로 나타나 대부분 실내 오염물질 농도가 실외보다 높게 나타났으며, 특히 에틸벤젠은 0.94～13.20으로 실외보다 실내 방출원에서 더 많이 발생하는 것으로 나타났으며, 자일렌 (0.93～4.80)과 톨루엔 (0.98～3.57), 스티렌 (0.85～2.50)도 실내 방출원에서 더 많이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 국립환경과학원 (2006)과 Lioy (1991) 등의 연구결과에서와 같이 실내에 존재하는 가구, 아파트 내부의 벽지 및 접착제, 각종 생활용품 등으로부터 VOCs 물질의 배출로 실내가 실외보다 높게 검출된다는 것을 알 수 있었다.

3. 2 계절별, 시간대별 VOCs 농도분포

아파트 내 VOCs 물질의 계절별 특성을 파악하기 위해 4계절 (봄, 여름, 가을, 겨울)에 대해 조사한 결과는 표 5와 같다. 계절별로 VOCs의 평균 농도를 살펴보면, 봄철에 톨루엔 (34.46 μg/m^3), 에틸벤젠 (13.84 μg/m^3), 자일렌 (9.26 μg/m^3), 스티렌 (2.47 μg/m^3)이 높

Table 4. Distribution of VOCs concentration in outdoor and I/O ratio.

	Outdoor (μg/m^3)				I/O Ratio			
	Mean	S.D.	Min	Max	Mean	S.D.	Min	Max
Benzene	1.54	0.53	0.66	2.34	1.15	0.16	0.95	1.46
Toluene	12.05	8.11	1.64	29.45	1.92	0.79	0.98	3.57
Ethylbenzene	2.21	1.22	0.41	3.60	2.68	3.99	0.94	13.20
Xylene	3.18	1.80	0.76	5.54	1.86	1.22	0.93	4.80
Styrene	1.60	0.65	0.46	2.30	1.25	0.57	0.69	2.50
TVOC	20.57	10.00	10.68	42.39	1.89	1.06	1.15	4.52

Table 5. Seasonal variation of VOCs concentration in apartment house. (unit: μg/m^3)

	Spring	Summer	Autumn	Winter
Benzene	1.67±0.65	0.66±0.31	1.72±0.56	3.02±0.95
Toluene	34.46±31.28	11.57±11.69	22.54±15.12	24.31±9.40
Ethylbenzene	13.84±29.28	1.70±1.44	4.05±4.06	4.09±1.92
Xylene	9.26±11.77	2.60±2.78	5.61±3.63	6.24±3.78
Styrene	2.47±1.44	1.33±1.41	2.23±1.61	1.97±0.61
TVOC	61.61±72.48	17.86±15.22	36.15±19.69	39.64±13.57

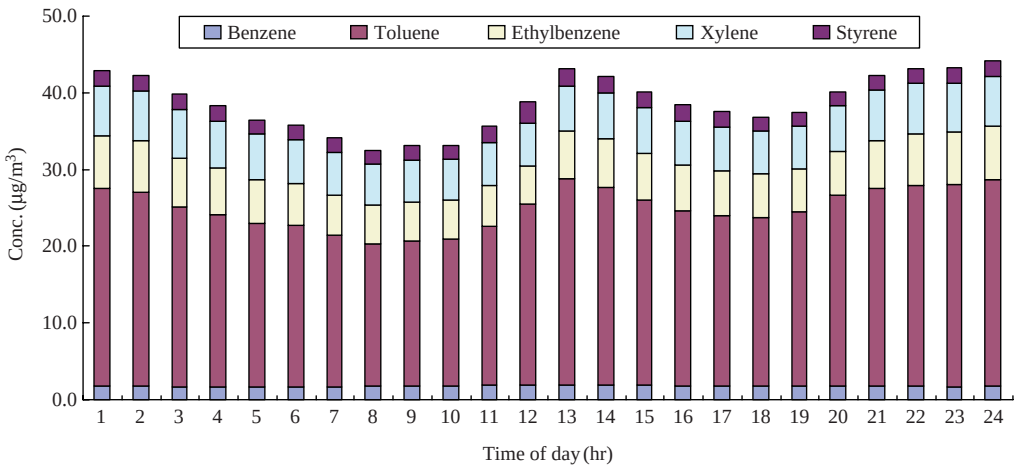

Fig. 2. Hourly variations of VOCs concentrations in apartment house.

게 나타났으며, 겨울철에는 벤젠(3.02 μg/m^3)이 높게 나타났다. 봄철 TVOC 농도를 기준으로 다른 계절과 비교한 결과 여름철은 29.0%, 가을철은 58.7%, 겨울철은 64.3% 해당하는 수준으로 나타났다. 이는 실내 가구, 벽지, 각종 생활용품에서 방출된 오염물질이 난방에 따른 환기 부족으로 겨울철 내내 실내에 축적되어 있다가 봄철에 실내온도가 올라감에 따라 다른 계절보다 높게 나타난 것으로 판단된다.

또한 그림 2의 시간대별 총휘발성유기화합물질(TVOC)의 분석결과를 살펴보면, TVOC 농도가 가장 높게 나타난 시간대는 저녁 12시이고, 가장 낮은 시간대는 오전 8시로 조사되었다. TVOC 농도를 35 μg/m^3 이하인 경우와 35~40 μg/m^{3}인 경우, 40 μg/m^3 이상인 경우 세 구간으로 분석한 결과, 오전 7시부터 오전 10시까지는 TVOC 농도가 35 μg/m^3 이하로 낮게 나타났으며, 저녁 8시부터 새벽 2시까지는 40

Table 6. Results of correlation analysis of each pollutant in apartment house.

	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	Xylene	Styrene	Temp.	Hum.
Benzene (μg/m^3)	1.000						
Toluene (μg/m^3)	0.301**	1.000					
Ethylbenzene (μg/m^3)	0.148**	0.810**	1.000				
Xylene (μg/m^3)	0.296**	0.803**	0.916**	1.000			
Styrene (μg/m^3)	0.162**	0.588**	0.496**	0.585**	1.000		
Temp. (℃)	−0.572**	−0.060	0.032	−0.104**	−0.17	1.000	
Hum. (%)	−0.436**	−0.298**	−0.240**	−0.249**	−0.170**	0.397**	1.000

* : p＜0.05, ** : p＜0.01

Table 7. Results of variance analysis of VOCs by construction year.

	Construction year			F	p-value
	2007～	2002～2006	～2001		
Benzene	1.91±1.17	1.81±0.98	1.70±1.05	2.76	0.064
Toluene	38.30±33.42	18.90±15.95	18.87±9.81	78.72	0.000
Ethylbenzene	17.58±30.07	2.22±1.21	2.73±1.66	83.02	0.000
Xylene	11.20±12.28	3.04±1.85	4.97±3.34	91.29	0.000
Styrene	3.28±1.81	1.72±0.90	1.60±1.01	139.12	0.000
TVOC	72.28±75.18	27.71±18.47	29.90±13.64	96.66	0.000

μg/m^3 이상으로 높게 나타났고 그 이외의 시간대는 35～40 μg/m^{3}으로 나타났다. 여기서 실내 거주자의 이동이 많고 주로 활동하는 시간인 출·퇴근 시간대에는 VOCs의 농도가 낮게 나타나고, 그 이외의 시간대는 VOCs의 농도가 높게 나타난다는 것을 확인할 수 있었다. 이에 VOCs 농도가 높게 나타나는 취침전 10시에서 12시 사이에 환기를 시키면 VOCs의 농도가 크게 감소될 것으로 판단된다.

3. 3 상관분석

3. 3. 1 휘발성유기화합물질간의 상관분석

아파트 실내공기 중 휘발성유기화합물질간의 상관성을 분석하기 위해 통계프로그램 SPSS로 Pearson correlation analysis을 실시하였으며, 그 결과를 표 6에 나타내었다. 분석결과, 에틸벤젠과 자일렌 사이에서 가장 높은 상관관계(r=0.916)를 보였으며, 유의수준 0.01에서 유의한 것으로 분석되었다. 톨루엔은 에틸벤젠과 r=0.810 (p＜0.01), 자일렌과 r=0.803 (p＜0.01), 스티렌과 r=0.588 (p＜0.01)로 높은 상관관계를 보였으며, 벤젠은 톨루엔과 r=0.301 (p＜0.01), 에틸벤젠과 r=0.148 (p＜0.01), 자일렌과 r=0.296 (p＜0.01), 스티렌과 r=0.162 (p＜0.01)로 상관성은 낮았으나 양의 상관관계를 나타냈다. 심상효(2006)와 국립환경과학원(2009)에서 연구한 결과와 같이 본 연구에서도 휘발성유기화합물질간의 상관성은 모두 양의 상관관계를 나타내어 같은 발생원에서 배출되고 있음을 알 수 있었다.

3. 3. 2 건축년수에 따른 상관성 분석

아파트에서 발생하는 휘발성유기화합물질과 건축년수와의 상관성을 알아보기 위해 일원배치 분산분석을 실시하였으며 분석결과는 표 7과 같다. 건축년수는 완공된지 5년 미만인 세대(A-1, A-2)와 5년 이상 10년 미만인 세대(A-3, A-4), 10년 이상인 세대(A-5, A-6, A-7, A-8, A-9)로 구분하여 분석하였다.

분석결과, 벤젠은 유의확률(p-value)이 0.064로 유의수준(p) 0.05보다 크게 나타나 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 분석되었지만, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌, TVOC은 건축년수에 따라 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다(p＜0.01). 이는 심상효(2006)와 안영상 등(2007), 국립환경과학원(2009)의 연구결과와 같이 가구나 건축자재, 생활용품 등에서 배출되는 휘발성유기화합물질은 시간이 지나면서 서서히 방출되어 새 아파트일수록 농도가 높게 나타나고 오래된 아파트는 농도가 낮게 나타난다는 것을

알 수 있었다.

또한 Duncan의 사후분석 결과에서도 5년 미만의 아파트가 톨루엔이 38.30 μg/m^3, 에틸벤젠이 17.58 μg/m^3, 자일렌이 11.20 μg/m^3, 스티렌이 3.28 μg/m^3, TVOC가 72.28 μg/m^{3}로 가장 높게 나타났으며 유의수준 0.01이서 유의한 것으로 나타났다.

3. 3. 3 계절에 따른 상관성 분석

계절에 따른 휘발성유기화합물질의 상관성을 알아보기 위해 일원배치 분산분석을 실시하였으며 분석결과는 표 8과 같다. 분석결과, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌, TVOC 모두 계절에 따라 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다($p < 0.01$). 또한 Duncan의 사후분석 결과에서도 봄철에 톨루엔이 34.36 μg/m^3, 에틸벤젠이 13.84 μg/m^3, 자일렌이 9.26 μg/m^3, 스티렌이 2.47 μg/m^{3}로 가장 높게 나타났으며, 겨울철에는 벤젠이 3.03 μg/m^{3}으로 가장 높게 나타났다.

이와 같이 본 연구에서는 봄철에 휘발성유기화합물질의 농도가 높게 나타났지만 국립환경과학원(2009)과 다른 연구논문의 결과에 따르면 여름철이 다른 계절에 비해 농도가 높다고 보고하고 있다. 이는 본 연구에서는 실제 생활하고 있는 아파트내 휘발성유기화합물질을 조사하고, 다른 연구논문에서는 시료채취시 5시간 동안 밀폐한 후 측정하는 등 측정방법에서 차이가 있어 휘발성유기화합물질의 농도를 비교하는 것은 다소 무리가 있을 것으로 판단된다.

3. 3. 4 층수에 따른 상관성 분석

휘발성유기화합물질과 층수와의 상관성을 알아보기 위해 일원배치 분산분석을 실시하였으며 분석결과는 표 9와 같다. 층수는 5층 이하, 6층에서 10층까지, 11층 이상인 세대로 구분하여 분석하였다. 분석결과, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌, TVOC 모두 층수에 따라 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다($p < 0.05$).

또한 Duncan의 사후분석 결과에서도 5층 이하에서 에틸벤젠이 11.36 μg/m^3, 자일렌은 8.12 μg/m^3, 스티렌은 2.17 μg/m^3, TVOC는 49.57 μg/m^{3}으로 가장 높게 나타났고, 6층과 10층 사이에서는 벤젠이 2.10 μg/m^3, 톨루엔이 26.72 μg/m^{3}로 가장 높게 나타났다. 이와 같이 휘발성유기화합물질은 아파트가 저층일수록 농도가 높게 나타나고 고층으로 올라갈수록 낮게 나타나는 것을 알 수 있었다.

3. 4 회귀분석

본 연구에서는 거주 중인 아파트의 건축년수, 계절, 온 · 습도 등 환경인자가 휘발성유기화합물질의 농도에 미치는 영향 정도를 판단하기 위해 다중회귀

Table 8. Results of variance analysis of VOCs by season.

	Season				F	p-value
	Spring	Summer	Autumn	Winter		
Benzene	1.68±0.65	0.66±0.31	1.72±0.56	3.03±0.95	468.57	0.000
Toluene	34.36±31.28	11.57±11.69	22.54±15.12	24.31±9.40	52.56	0.000
Ethylbenzene	13.84±29.28	1.70±1.44	4.05±4.06	4.09±1.92	28.63	0.000
Xylene	9.26±11.77	2.60±2.78	5.61±3.63	6.25±3.78	37.15	0.000
Styrene	2.47±1.44	1.33±1.41	2.23±1.61	1.97±0.61	29.66	0.000
TVOC	61.61±72.48	17.86±15.22	36.15±19.69	39.64±13.57	45.95	0.000

Table 9. Results of variance analysis of VOCs by floor.

	Construction year			F	p-value
	1~5	6~10	More than 11		
Benzene	1.74±1.06	2.10±1.29	1.63±0.90	12.72	0.000
Toluene	26.19±29.18	26.72±18.90	19.19±10.32	13.55	0.000
Ethylbenzene	11.36±25.80	4.04±3.79	2.78±1.75	28.67	0.000
Xylene	8.12±10.50	5.12±4.21	4.68±3.62	22.61	0.000
Styrene	2.17±1.87	1.97±1.06	1.89±1.08	3.31	0.037
TVOC	49.57±65.85	39.95±24.87	30.18±15.01	18.49	0.000

Table 10. Results of regression analysis between VOCs and environmental factors.

	Parameter	Coefficients	R^2	p-value
Benzene	Area	−0.004	0.446	0.013
	Construction year	0.327		
	Floor	0.017		
	Humidity	−0.012		
	Remodel	0.238		
	Season	0.620		
	Temperature	−0.098		
Toluene	Area	0.111	0.304	0.035
	Construction year	14.677		
	Floor	−0.418		
	Humidity	−0.116		
	Season	19.615		
	Temperature	1.072		
Ethylbenzene	Construction year	14.725	0.213	0.000
	Humidity	−0.244		
Xylene	Area	0.059	0.279	0.026
	Construction year	5.351		
	Floor	−0.272		
	Remodel	−1.070		
	Season	4.443		
Styrene	Area	0.012	0.396	0.000
	Construction year	1.282		
	Remodel	0.587		
	Season	1.224		
	Temperature	0.053		

분석을 실시하여 각 영향인자에 대한 회귀 방정식 및 결정계수를 표 10과 같이 구하였으며, 환경인자 중 건축년수는 5년 미만인 경우와 이상인 경우로, 실내개조는 실시 여부에 따라, 계절은 여름인 경우와 여름이 아닌 경우로 나누어서 회귀분석을 실시하였다.

벤젠 농도에 영향을 미치는 인자는 계절과 실내개조, 건축년수로, 여름이 아닌 경우 0.620 μg/m^{3}씩, 실내개조를 한 경우 0.238 μg/m^{3}씩, 건축년수가 5년 미만인 경우 0.327 μg/m^{3}씩 농도가 높아지는 것으로 나타났다. 결정계수(R^2)는 0.446으로 추정된 회귀식에 의해 전체 벤젠 농도의 44.6%를 설명할 수 있으며, 유의수준 0.05에서 유의한 것으로 나타났다. 톨루엔은 건축년수가 5년 미만인 경우 14.677 μg/m^{3}씩, 여름이 아닌 경우 19.615 μg/m^{3}씩, 온도 1°C 올라갈 때마다 1.072 μg/m^{3}씩 농도가 높아져 건축년수, 계절, 온도가 영향을 미치는 인자로 분석되었다(R^2=0.304, $p<0.05$).

에틸벤젠은 건축년수가 5년 미만인 경우 14.725 μg/m^{3}씩 농도가 높아져 건축년수가 영향을 미치는 인자로 분석되었으며(R^2=0.213, $p<0.01$), 자일렌은 건축년수가 5년 미만인 경우 5.351 μg/m^{3}씩, 여름이 아닌 경우 4.443 μg/m^{3}씩, 아파트 연면적 1 m^2 증가할 때마다 0.059 μg/m^{3}씩 농도가 높아져 건축년수, 계절, 연면적이 영향을 미치는 인자로 분석되었다(R^2=0.279, $p<0.05$).

스티렌은 건축년수가 5년 미만인 경우 1.282 μg/m^{3}씩, 여름이 아닌 경우 1.224 μg/m^{3}씩, 실내개조를 한 경우 0.587 μg/m^{3}씩 농도가 높아져 건축년수, 계절, 실내개조가 영향을 미치는 인자로 분석되었다(R^2=0.396, $p<0.01$). 이와 같이 건축년수, 계절, 실내온도, 실내개조 실시여부, 아파트 층수 등이 휘발성유기화합물질 농도에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 현재 거주하고 있는 아파트에서의 실내공기 중 휘발성유기화합물질의 농도분포와 실내공기질에 영향을 미치는 환경인자를 조사하여 내실자의 건강보호와 실내공기질 개선을 위한 기초자료를 제공하기 위해 이루어졌다.

아파트 거실에서 휘발성유기화합물의 농도는 toluene＞xylene, ethylbenzene＞styrene＞benzene 순으로 조사되었으며,「다중이용시설 등의 실내공기질 관리법」의 신축공동주택 권고기준과 비교한 결과 모두 권고기준 이내로 적합하였다. 휘발성유기화합물질의 실내/외 농도비는 0.69～13.20 범위로 나타나 실내의 가구, 벽지 및 접착제, 각종 생활용품 등으로부터 배출되는 휘발성유기화합물질로 인해 실내가 실외보다 높게 검출된다는 것을 알 수 있었다.

계절별, 시간대별 휘발성유기화합물질을 분석한 결과, 봄철에 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌이 높게 나타나 실내 가구, 벽지, 각종 생활용품에서 방출된 오염물질이 난방에 따른 환기 부족으로 겨울철 내내 실내에 축적되어 있다가 봄철에 높게 나타난 것으로 판단되며, 또한 실내 거주자의 이동이 많고 주로 활동하는 시간인 출・퇴근 시간대에 휘발성유기화합물질의 농도가 낮게 나타나고, 그 이외의 시간대에는 높게 나타난다는 것을 확인할 수 있었다.

휘발성유기화합물질간의 상관성을 분석한 결과, 에틸벤젠과 자일렌 사이에서 가장 높은 상관관계 ($r=0.916$, $p<0.01$)를 보였으며, 톨루엔은 에틸벤젠과 $r=0.810$ ($p<0.01$), 자일렌과 $r=0.803$ ($p<0.01$), 스티렌과 $r=0.588$ ($p<0.01$)로 높은 상관관계를 보이는 등 다른 휘발성유기화합물질간도 모두 양의 상관관계를 나타내어 같은 발생원에서 배출되고 있음을 알 수 있었다. 또한 건축년수와, 계절, 층수에 따른 상관성을 분석한 결과 모두 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다 ($p<0.05$).

아파트의 건축년수, 계절, 온·습도 등 환경인자가 휘발성유기화합물질의 농도에 미치는 영향 정도를 판단하기 위해 다중회귀분석을 실시한 결과, 벤젠과 스티렌은 계절, 실내개조, 건축년수가, 톨루엔은 건축년수, 계절, 실내온도가, 에틸벤젠은 건축년수가, 자일렌은 건축년수, 계절, 아파트 연면적이 휘발성유기화합물질 농도에 영향을 미치는 인자로 분석되었다.

따라서 본 연구에서는 아파트내 휘발성유기화합물질 농도가 높게 나타나지는 않았지만 실내에 장시간 머무르기 때문에 낮은 농도라 할지라도 인체에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다. 이에 각 가정에서는 주기적인 환기와 청소 등 실내공기질에 관심을 가지고 오염물질을 줄일 수 있도록 노력하여야 할 것으로 판단되며, 휘발성유기화합물질은 암을 유발하는 등 인체에 악 영향을 미치므로 신축 아파트 뿐만아니라 사람들이 거주하고 있는 아파트에 대해서도 쾌적한 실내공기질을 유지할 수 있는 관련 규정이 제정되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 광주광역시보건환경연구원의 2011년도 연구사업 지원으로 수행하였습니다.

참 고 문 헌

국립환경과학원 (2006), 보육시설 실내공기질 측정방법 정립 및 실내공기질 특성 연구, 연구보고서.

국립환경과학원 (2009), 주거공간별 실내공기질 관리방안 연구 (I) - 아파트의 실내 오염물질 평가와 건강영향 연구, 연구보고서.

서병량 (2003) 실내 건축 내장재에서 발생되는 VOCs와 포름알데히드의 방출특성에 관한 연구, 서울시립대학교 석사학위논문.

정 용, 박종세, 김윤신, 김신도 (1997) 대기오염물질의 위해성평가 및 관리기술개발, 환경부.

Amir, S., W. D'Ann, and J.B. Timothy (2005) Tool booth workers and mobile source-related Hazardous Air Pollution : how perspective is the indoor environmental, Environment Science & Technology, 39(5), 2936-2943.

Ha, K.C. (2001) A study on volatile organic compounds (VOCs) in environmental tabaco smoke (ETS) at indoor office environments. Korean Journal of Environmental Health, 27(3), 87-98.

Harley, R.A. and G.R. Cass (1995) Modeling the atmospheric concentrations of individual volatile organic compounds, Atmos. Environ., 29, 905-922.

Lee, J.H. and W.K. Jo (2006) Characteristics of indoor and outdoor bioaerosols at Korean high-rise apartment buildings, Environmental Resaarch, 101, 11-17.

Lee, J.J., S.D. Kim, and M.J. Boo (1996) Variation of indoor air quality in museum, Korean Journal of Environmental Health, 22(4), 43-48.

Lee, S.C., W.M. Li, and C.H. Ao (2002) Investigation of indoor air quality at residential homes in Hong Kong-case study, Atmospheric Environment, 36(2), 225-237.

Mølhave, L., L.E. Sparks, P. Wolkoff, P.A. Clausen, P.A. Nielsen, and N.C. Bergsø (1996) The Danish Twin Apartment Study - Part II: Mathematical modeling of the relative strength of sources of indoor air pollution, Indoor Air, 6, 18-30.

Montoya, L.D. and L.M. Hildemann (2001) Evolution of the mass distribution of resuspended cat allergen (Fel dl) indoors following a disturbance, Atmospheric Environment, 35, 859-866.

Nju, J.L. and J. Burnet (2001) Setting up the criteria and credit-awarding scheme for building interior material selection to achieve better indoor air quality, Environment International, 26, 573-580.

Shim, S.H. (2006) Charaterization and assessment of indoor air quality in newly constructed apartments -volatile organic compounds and formaldehyde-. Korean Journal of Environmental Health Sciences, 32(4), 275-281.

Shin, H.S. and H.S. Ahn (2004) The study on the measurement of volatile organic compounds in the air of A and B industrial area, Analytical science & Technology, 17(2), 130-144.

Sim, S.H., Y.S. Kim, and W.H. Yang (2006) Estimation of source emission rate on volatile organic compounds and formaldehyde using indoor air quality modeling in new apartment, Journal of the Environmental Sciences, 15(10), 929-933.

Strachan, D.P. and C.H. Sanders (1989) Damp housing and childfood asthma; respiratory effects of indoor air indoor air temperature and relative humidity, Journal of Epidemiology and Community Health, 43, 7-14.

WHO (2002) Europe exposure assessment in studies on the chronic effects of long-term exposure to air pollution.

Yamaguchi, T.Y., D. Nakajima, Y. Ezoe, H. Fujimakj, Y. Shimada, K. Kozawa, K. Arashidani, and S. Goto (2006) Measurement of Volatile Organic Compounds (VOCs) in New Residential buildings and VOCs Behavior over time, Journal of UOEH, 28(1), 13-27.

Yang, X., Q. Chen, J.S. Zhang, Y. An, J. Zeng, and C.Y. Shaw (2001) A mass transfer model for simulating voc sorption on building materials, Atmospheric Environment, 35, 1291-1299.