

## 시화공단 지역의 주요 휘발성물질 농도 분포 특성

### Patterns of the main VOCs concentration in ambient air around Shiwha Area

변상훈<sup>†</sup> · 이정근 · 김정근<sup>\*</sup>

Sang-Hoon Byeon<sup>†</sup> · Jeong-Geun, Lee · Jeong-Keun Kim<sup>\*</sup>

고려대학교 환경보건학과, \*한국산업기술대학교 생명화학공학과

Department of Environmental Health, Korea University, \*Department of Chemical Engineering & Biotechnology

(2009년 7월 28일 접수, 2009년 12월 28일 채택)

**ABSTRACT** : In this study, we investigated the concentrations of volatile organic compounds (VOCs) in Shiwha area and compared the characteristics of both industrial area and residential area. The passive samplers were set 6 times each for a month in 21 locations at industrial and residential area to obtain 6 VOCs including benzene, trichlorobenzene, toluene, ethyl benzene, xylene and styrene. Above all, toluene was the most abundant VOCs in the ambient air both in industrial and residential area. Average TVOC concentration of industrial area was 1.86 times higher than that of residential area, and it was greatly reduced in winter compared with summer. Furthermore, the average BTEX concentrations showed that all concentrations of industrial area were 1.94~5.39 times higher than those of residential area except benzene which were similar to each other. In winter, the concentration of ethyl benzene and xylene were significantly decreased by comparing with summer: but benzene concentrations were increased. Also, BTEX relative ratio was as follows: toluene>benzene>ethylbenzene>xylene. Correlation coefficients among VOCs were confirmed that VOCs in ambient air of industrial area were generally more related to each other than that of residential area. On the whole, the concentrations of VOCs in industrial area were higher, and it seems to be potential that industrial area affects the distribution of VOCs to residential area.

**Key words** : Volatile Organic Compounds, Shiwha Industrial Complex, Passive sampler, BTEX

**요약** : 본 연구에서는 시화공단의 공단과 주거 지역에서의 휘발성 유기화합물 농도를 측정하고 그 특성을 비교 분석하였다. 공단지역과 주거지역 21개소에 passive sampler를 1개월간 설치하여 총 6회에 걸쳐 벤젠, 트리클로로에틸렌, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌과 스티렌을 채취하였다. 그 결과 VOCs 물질 중 톨루엔이 공단지역과 주거지역에서 가장 높은 농도로 검출되었다. 공단지역의 평균 TVOC농도는 주거지역의 1.86배에 해당했으며, 여름철에 비해 겨울철에는 그 농도가 크게 감소하였다. 또한, 평균 BTEX 농도는 공단지역의 화합물의 농도가 주거지역보다 1.94~5.39배 더 높은 것을 보여준다. 에틸벤젠과 자일렌은 여름철에 비교해 겨울철에 농도가 감소하였으나, 벤젠은 더 높은 농도로 측정되었다. VOCs 간의 상관계수는 공단지역에서의 물질간의 상관성이 주거지역보다 좀 더 큰 것으로 나타내었다. 공단지역에서는 대체로 양의 상관성을 보이는 물질들이 주거지역에서는 에틸벤젠과 톨루엔의 경우를 비롯해 음의 상관성을 보였다. 전반적으로, VOCs 농도는 공단지역에서 더 높았으며, 주거지역의 VOCs 분포에 잠재적으로 영향을 미치는 것으로 파악할 수 있다.

**주제어** : 휘발성유기화합물, 시화공단, 패시브샘플러, BTEX

## 1. 서론

휘발성 유기화합물 (Volatile Organic Compounds, VOCs)은 방향족 탄화수소나 할로젠화 탄화수소류와 같이 그 자체로서 직접적으로 인체에 유해한 발암성이나 유전독성을 내포하고 있다.<sup>1)</sup> 자동차의 급증과 각종 유기용매의 사용 증가 등과 같은 요인으로 인해, VOCs는 대기질의 변화를 초래하는 주요 요인의 하나로 알려져 있다.<sup>2)</sup> 특히 VOCs는 증기압이 높아 대기 중으로 쉽게 휘발되고, 대기 중에서 질소산화물

과 공존 시 태양광의 작용을 받아 광화학반응을 일으켜 오존 및 peroxyacetylnitrate(PAN) 등 광화학 산화성 물질을 생성시켜 광화학 스모그를 유발하는 물질을 총칭하며,<sup>3)</sup> 지구 온난화와 성층권 오존층 파괴의 원인이고 악취를 발생시키며 발암성이 있는 유해물질이다.

현재 합성, 세정, 도장 등과 관련된 석유화학공업 분야에서 다양한 유기 용매가 사용되고 있으며, 많은 양의 휘발성 유기 화합물이 발생하고 있다.<sup>4,5)</sup> 이러한 유해성분들은 환경대기 중에서 수 ppt에서 수백 ppb 정도의 미량 또는 극미량 성분

<sup>†</sup> Corresponding author : E-mail : shbyeon@korea.ac.kr Tel : 02-940-2866 Fax : 02-940-2866



Fig. 1. Sampling points of investigation area.

으로 분류되는 것이 보편적이다. 그러나 배출시설에서는 이와 비교해 수백 또는 수천배까지 고농도 상태로 측정되기도 한다.<sup>6)</sup>

VOCs에 대한 연구로, Buzcu 등은 VOCs 배출원과, 광화학 반응에서 활성 VOCs의 감소의 영향을 조사하였다. Mahmoud 등은 미국의 13개 도심지역에서의 VOCs 농도를 분석한 결과, VOCs의 주요 배출원과 계절 변화가 도심지역의 VOCs 수준에 미치는 영향을 확인하였다.<sup>7~8)</sup> Srivastava 등은 Mumbai의 대기환경 중의 VOCs의 변화를 측정하였으며,<sup>9)</sup> Delhi의 VOCs 오염원의 분포에 대한 연구도 수행되었다.<sup>10)</sup>

또한 BTEX(Benzene, Toluene, Ethyl benzene, Xylene) 농도 비율로부터 VOCs 방출원을 규명하기 위한 연구도 수행되었다. Nelson 등은 m,p-에틸벤젠에 대한 m,p-자일렌의 비율로 대기 중에서의 광화학 반응에의 효과를 분석하고, X/B 비율로 광화학 회로의 흐름을 파악했다.<sup>11)</sup> Monod 등이 유럽과 아시아, 라틴아메리카의 대기 중의 BTEX 비율을 분석한 결과, 자일렌의 주요 배출원은 연소에 의한 것이 나타났다.<sup>12)</sup> 이러한 결론은 자일렌과 톨루엔, 벤젠의 비율을 비교하는 것에 근거하여 도출되었다. Chen 등은 BTEX 비율과 X/E 비율에 근거해 공단 지역에서의 대기질을 분석하여 유사한 결과를 얻었다.<sup>13)</sup>

지금까지 세계 각국에서 연구된 이러한 결과에 따르면 각국의 법적 규제와 자동차 연료의 조성, 주거지역의 난방 패턴 및 기상학적 조건 등의 인자들로 인해 VOCs 농도의 프로파

일이 조사 지역마다 다르게 나타난다. 즉, 대기에서 검출되는 VOCs의 농도 특성은 자동차 배기가스, 휘발유에서의 기화, 유기용제를 사용하는 도장시설, 정유사 등의 저장시설과 출하시설 등 인위적인 배출원의 강도에 크게 영향을 받는다고 볼 수 있다.<sup>14)</sup>

시화산업단지는 수도권 정비를 위해 비 도시형이면서 공해유발업체를 이주시킬 목적으로 조성된 대규모 산업단지이다. 단지 내에는 화학, 피혁, 염색단지, 폐기물처리, 금속산업 등 VOCs 배출업체가 다수 밀집되어 있다. 시화산업단지의 배후 주거지역은 공단에서 불과 175 m 떨어진 곳에 조성되어 대기오염과 악취에 따른 민원이 빈발하여 사회적 문제가 되고 있다. 최근 몇 년간 시화산업단지의 대기오염과 악취는 정부와 지자체의 지속적인 환경개선정책의 추진과 기업의 노력으로 개선되고 있다. 그러나 최근 산업단지 내의 급격한 자동차수 증가와 산업체에서의 유기용제 사용량 증가로 VOCs 배출량은 증대되고 있으며, 이 지역의 대기 중 VOCs 오염현황에 대한 연구자료는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는, 공단지역과 주거지역의 VOCs 농도의 실태를 조사하고 두 지역간의 비교를 수행하며, VOCs 농도의 계절별 변화, BTEX 물질간의 상대비율과 상관계수 등을 분석하여 시화산업단지의 VOCs 오염도를 평가하고자 한다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 시화산업단지의 공단지역과 주거지역의 VOCs 측정을 위해 21개의 격자망을 구성하여 passive sampler를 설치하여 시료를 채취하여 비교 분석하였다. Passive sampler를 이용한 대기오염물질의 농도측정은 분자확산 현상을 이용하는 것으로서, 공기의 흐름을 최소화한 상태에서 passive sampler의 경계층을 통과한 오염물질이 분자확산에 의해 흡수액이 묻어있는 흡착제에 포집되도록 하는 것이다.<sup>15)</sup>

시화공단 및 주거지역인 정왕동 지역에 총 21개의 sampling site(1 km x 1 km 격자망)를 구성하고, 3M 3500 passive sampler(3 M Model: 3500, USA)를 사용하여 1개월간 샘플링하여 분석하였다. passive sampler의 설치는 자동차의 배기가스로부터의 실험오차를 줄이기 위하여 자동차도로로부터 15 m 이상 떨어진 장소에 설치하였다. 월별/계절별 VOCs 변화를 측정하기 위해 6월, 7월, 8월, 9월, 11월, 12월에 걸쳐 총 6회의 실험을 수행하였다.

농도 측정 및 분석에는 가스크로마토그래피 질량분석기(GC-MS, Model Agilent 6890N, USA)를 사용하였다. 모든 시료는 자동시료주입장치를 사용하여 GC/MS에 주입하였다. Data system으로는 HP MSD Chemstation을 이용하였다. 다성분을 동시에 분석하기 위해 질량 스펙트럼상의 특성이온(characteristic ion)만을 선택하여 분석하는 selected ion-monitoring(SIM) 방법을 이용하

였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. VOCs 농도 분포 특성

본 연구에서는 시화지구의 공단지역과 인근 주거지역에 각각 10개의 지점에 passive sampler를 설치하여 VOCs를 측정하였다. 분석한 결과 VOCs는 총 6가지로 나타났으며, 농도는 Table 1과 같았다. 벤젠은 6월부터 평균 농도가 점차 증가하여 12월에 14.02 ppb로 가장 높았다. 톨루엔은 주거지역과 공단지역 모두에서 가장 높게 검출되었으며, 9월에 32.66 ppb로 가장 높았고 나머지 기간에는 유사한 수준을 유지하였다. 에틸 벤젠과 자일렌도 9월에 각각 23.57 ppb, 19.91 ppb로 가장 높은 수준으로 분석되었다. 주거지역의 경우는 벤젠이 6월부터 12월까지 증가하는 추세를 보이고, 그 농도수준은 공단지역과 유사하였다. 벤젠을 제외한 다른 물질들은 모두 공단지역보다 낮은 농도 수준을 보였다. 스티렌의 경우에는 공단 지역에서 다른 물질들에 비해 9월에도 평균 최고 농도가 3.79 ppb로 비교적 작은 농도로 측정되었고, 주거지역에서는 검출되지 않았다.

공단지역에서의 BTEX의 농도는 전반적으로 9월에 높은 농도 수준을 나타내는 것으로 나타났다. 이것은 시화 공단지역이 바다와 인접하여 바람에 의한 영향을 많이 받는데, 가을이 여름과 겨울에 비해 바람이 적게 불어 희석효과가 적기 때

Table 1. Average VOCs concentrations in Shiwha

(unit: ppb)

Compounds	June	July	August	September	November	December
<i>Industrial area</i>						
Benzene	0.09±0.21	8.84±0.20	13.19±0.10	13.44±0.15	13.86±0.09	14.02±0.15
Trichloro-ethylene	2.86±1.49	8.50±1.70	10.85±1.07	18.93±4.20	11.01±0.97	10.24±1.39
Toluene	23.95±15.03	23.62±15.17	24.17±10.96	32.66±15.39	24.36±8.81	24.61±10.17
Ethyl-benzene	1.54±0.86	13.99±0.20	19.81±0.47	23.57±8.61	0.85±1.07	1.08±1.61
Xylene	1.22±1.28	15.12±5.31	17.12±6.02	19.91±10.70	0.45±0.60	0.55±0.42
Styrene	0.04±0.13	0.00±0.00	1.55±3.78	3.79±7.34	0.47±1.49	1.86±3.24
Total TVOC	29.70±16.33	70.06±17.17	86.71±15.71	112.32±31.91	50.11±10.77	52.37±12.65
<i>Residential area</i>						
Benzene	0.00±0.00	8.76±0.07	13.10±0.06	13.06±0.05	14.01±0.34	14.14±0.13
Trichloro-ethylene	0.44±0.34	6.37±0.23	7.91±3.91	15.30±3.46	8.91±0.20	9.00±0.21
Toluene	5.29±1.81	10.84±0.74	14.40±0.58	15.94±0.68	15.92±0.66	16.52±1.00
Ethyl-benzene	0.40±0.26	7.61±7.29	7.04±9.76	0.00±0.00	1.46±3.54	0.26±0.34
Xylene	0.02±0.07	6.07±8.42	3.44±7.66	0.00±0.00	0.29±0.46	0.30±0.43
Styrene	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Total TVOC	6.15±2.36	39.64±15.19	45.89±15.70	43.18±6.08	40.58±3.73	40.22±1.63

Note: Values are mean±S.D

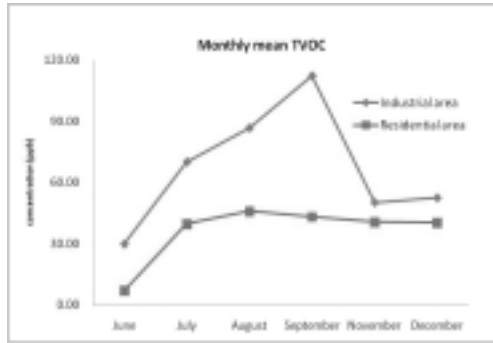


Fig. 2. Comparison of monthly mean TVOC.

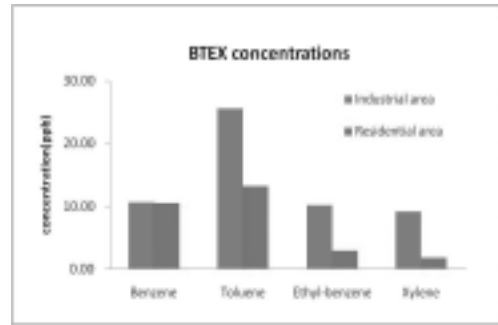


Fig. 4. BTEX concentrations at industrial and residential area.

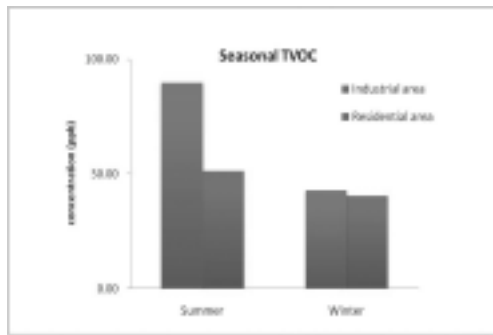


Fig. 3. Comparison of seasonal mean TVOC.

문에 높게 나타난 것으로 보이나, 이것에 대해서는 좀더 자세한 연구가 필요한 것으로 생각된다. 반면 주거지역에서는 이 시기에 에틸 벤젠과 자일렌은 거의 검출 한계 이하로 나타난 경우가 많았고 벤젠과 톨루엔은 공단지역보다 낮은 농도로 나타났다. 공단지역에서 VOCs 물질이 배출된 것이 주거지역으로 이동될 때는 대기 중에서 희석되기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 보인다.

### 3.2. TVOC 농도 분포 특성

본 연구에서 Total VOCs(TVOC)는 passive sampler로 채취하여 분석한 VOCs의 합을 나타낸 것으로, TVOC의 월별 추이를 Fig. 2에 나타내었다. 그 결과를 보면 7,8,9월에 공단지역의 TVOC 농도가 높고 증가하는 추세이지만, 11월과 12월에는 상대적으로 농도가 낮아진다. 주거지역의 경우에는 비교적 일정한 수준의 TVOC 농도 분포를 보이고 있으며, 측정 기간에는 모두 공단지역보다 농도가 낮은 것으로 나타났다.

또한 Fig. 3에서 여름(6~8월)과 겨울(11~12월)로 나누어 공단지역과 주거지역에서의 TVOC 농도를 비교해 보면, 여름철의 경우 공단지역은 89.70 ppb, 주거지역은 42.90 ppb로 공단지역의 농도가 훨씬 높으며, 겨울철에는 여름철에 비

해 농도가 낮아졌으나 공단지역이 51.25 ppb, 주거지역이 40.37 ppb로 여전히 공단지역의 대기 중 VOC의 농도가 높은 것을 알 수 있다. 이는 여름철의 경우 고온으로 인하여 유기화합물의 휘발이 더욱 활발히 일어나고, VOCs가 공단지역의 오염원으로부터 배출되는 경향이 있으므로 주거지역보다 대기 중의 농도가 높은 것으로 사료된다. 김중국 등의 연구에서는 시화 공단의 TVOC의 농도는 18.73 ppb로 검출되었으며 본 연구의 6개월 평균 농도인 66.88 ppb와는 차이를 보인다.<sup>16)</sup>

### 3.3. 평균 BTEX 농도

BTEX는 각종 제품의 생산에 있어 용매 혹은 원재료를 가공하는데 쓰인다. Fig. 4를 참조하면, 벤젠은 두 지역에서 유사한 농도 수준을 보이고, 나머지 물질들은 모두 공단지역에서 1.94~5.39배 더 높은 농도를 보인다(Table 2). 계절별로는 벤젠은 여름철 두 지역에서의 농도가 유사하고, 겨울에는 주거 지역에서 오히려 더 높게 나타났는데, 이는 주거지역 자동차등의 오염원에 의한 영향일 것으로 추정된다. 톨루엔은 공단지역이 주거지역보다 각각 여름은 1.95배, 겨울은 1.5배 높게 측정되었다. 에틸 벤젠은 여름철에 공단지역이 평균 19.22 ppb로 4.88 ppb인 주거지역의 3.94배로 나타났으나 겨울은 공단지역이 0.93 ppb로, 주거지역 또한 0.87 ppb로 여름에 비해 감소하였다. 마찬가지로 자일렌도 여름철 공단지역이 17.38 ppb로 주거지역

Table 2. Seasonal BTEX concentrations at each sampling sites (ppb)

		Benzene	Toluene	Ethyl-benzene	Xylene
Summer	Industrial area	11.81	26.81	19.12	17.38
	Residential area	11.64	13.73	4.88	3.17
Winter	Industrial area	13.94	24.49	0.93	0.50
	Residential area	14.08	16.22	0.87	0.28

**Table 3.** BTEX relative ratio

Sampling sites	B:T:E:X ratios			
	B	T	E	X
Industrial area	1.0	2.5	1.0	0.9
Residential area	3.8	4.7	1.0	0.6
Total average	1.7	3.0	1.0	0.8

3.17 ppb의 5.48배로 측정되었으나 겨울철에는 공단지역이 0.51 ppb, 주거지역은 0.28 ppb로 영역간의 상대적 비율은 1.78배이며 두 지역 모두에서 절대적인 농도는 감소하였다.

### 3.4. BTEX 상대비율

대기 중 방향족 화합물의 상대 비율은 VOCs 오염물질 배출원의 구분과 평가에 매우 유용하다. 에틸벤젠의 농도를 기준으로 한 방향족 화합물 BTEX의 비율을 Table 3에 나타내었다. 측정기간 6개월 동안의 공단지역의 B:T:E:X는 1.0:2.5:1.0:0.9로, 주거지역은 3.8:4.7:1.0:0.6으로

**Table 4.** Comparison of BTEX relative ratios for other cities

Cities	B:T	B:EB	B:X	T:EB	T:X	EB:X
Bangkok <sup>*</sup>	0.1	0.6	0.2	5.4	2.0	0.4
Manila <sup>*</sup>	0.1	0.6	0.2	7.7	3.0	0.4
Caracas <sup>*</sup>	0.4	2.8	0.9	6.5	2.0	0.3
Quito <sup>*</sup>	0.3	2.3	0.8	7.0	2.4	0.3
Santiago <sup>*</sup>	0.4	2.3	0.8	5.5	1.4	0.3
Sao Paulo <sup>*</sup>	0.5	2.6	0.9	5.4	1.8	0.3
Daegu <sup>**</sup>	0.1	1.5	1.1	13.6	10.0	0.7
This study	0.6	1.7	2.0	3.0	3.7	1.2

\*Gee, et al. \*\*Choi et al.<sup>19)</sup>

나타났다. 주거지역은 공단지역에 비해 벤젠의 상대비율이 높게 나타났는데, 자동차 오염원 등의 영향이 주 원인인 것으로 추정된다. 또한, 톨루엔의 상대비율은 공단지역보다 주거지역에서 높게 나타나는데, 이것은 주거지역에서 공기 중의 에틸벤젠이 매우 낮은 농도 수준으로 존재하기 때문인 것으로 보인다. 6개월간의 전체 평균 비율은 1.7:3.0:1.0:0.8로 톨루엔>벤젠>에틸 벤젠>자일렌의 순서

**Table 5.** Correlation coefficient of major VOCs

	Benzene	Trichloro-ethylene	Toluene	Ethyl-benzene	Xylene	Stylene
Industrial area (summer)						
Benzene	1.000					
Trichloroethylene	0.623**	1.000				
Toluene	0.202	0.264	1.000			
Etylbenzene	0.625	0.632**	0.327	1.000		
Xylene	0.253	0.378*	0.395*	0.568**	1.000	
Stylene	0.282	0.345	0.090	0.351	0.313	1.000
Residential area (summer)						
Benzene	1.000					
Trichloroethylene	0.508**	1.000				
Toluene	0.916**	0.729**	1.000			
Etylbenzene	-0.241	-0.239	-0.217	1.000		
Xylene	-0.299*	-0.204	-0.232	0.472**	1.000	
Stylene	-	-	-	-	-	1.000
Industrial area (winter)						
Benzene	1.000					
Trichloroethylene	0.368	1.000				
Toluene	0.538*	0.385	1.000			
Etylbenzene	0.580**	0.355	0.842**	1.000		
Xylene	0.403	0.471*	0.407	0.576**	1.000	
Stylene	0.338	0.150	-0.058	0.064	0.260	1.000
Residential area (winter)						
Benzene	1.000					
Trichloroethylene	0.166	1.000				
Toluene	0.280	0.231	1.000			
Etylbenzene	-0.257	-0.325	0.163	1.000		
Xylene	0.019	0.741**	0.311	-0.027	1.000	
Stylene	-	-	-	-	-	1.000

\* Coefficients of correlation are significant at a level of 0.05

\*\* Coefficients of correlation are significant at a level of 0.01

를 보인다.

본 연구에서의 BTEX 상대비율 결과값과 기존의 다른 지역의 연구자료를 Table 4에서 비교 분석할 수 있다. Lee<sup>17)</sup> 등에 의하면 B:T 비율은 교통량이 많거나 산업시설 등의 오염배출시설이 많을수록 감소하는 경향이 있다고 한다. 시화산업단지의 다른 도시들의 0.1~0.5보다 약간 높거나 유사한 0.6이다. Gee et al<sup>18)</sup> 등은 라틴아메리카 도시에서의 B:T 비율이 0.3~0.5이며 VOCs의 방출은 대부분 자동차의 영향인 것으로 보고하였다. 마닐라와 방콕은 0.1로 매우 낮는데, 이것은 도시내의 다양한 오염방출원이 존재하고 연료의 특성과 자동차의 종류가 다양한 것에서 기인하는 것으로 알려져 있다. B:EB는 방콕, 마닐라의 0.6보다는 높지만 라틴아메리카 도시들보다는 낮은 1.7의 값을 보인다. B:X는 다른 도시들이 전반적으로 1.0을 넘지 않는 것에 비해 다소 높은 2.0이며, T:EB는 대구의 13.6을 비롯하여 다른 도시들에 비해 낮은 수준을 보인다. T:X는 대구를 제외한 다른 도시에 비해 EB:X와 마찬가지로 시화산업단지에서 약간 높은 수준이다.

### 3.5. VOCs 상관계수

Table 5는 본 연구에서 측정된 주요 휘발성 유기화합물 질 사이의 상관성을 보여준다. 벤젠은 트리클로로벤젠, 톨루엔과 6개월의 측정기간 동안 양의 상관성을 보였다 (positive correlation coefficient). 트리클로로벤젠도 톨루엔과는 양의 상관관계를 보였다. 이를 제외한 나머지 물질들은 양의 상관성과 음의 상관성을 보이는 경우가 모두 나타났다.

계절별 각 측정지역에서 높은 상관계수를 갖는 두 물질은 같은 오염 배출원에서 비롯된 것일 가능성이 높다. 여름철 주거지역의 벤젠과 톨루엔의 상관계수는 0.916으로 통계적으로 유의미한 값인데, 다른 측정장소와 시기에서는 두 물질 간의 상관계수가 0.202~0.583으로 1에 가깝지 않은 것을 고려하면 이 수치는 주거지역의 자동차 오염원 등의 기여가 큰 것으로 볼 수 있다. 여름철 주거지역에서 톨루엔은 트리클로로벤젠과도 0.729의 비교적 높은 상관계수를 갖는다. 또 다른 높은 상관계수를 갖는 것은 겨울철 공단 지역의 톨루엔과 에틸 벤젠의 0.842이다.

여름철 공단지역에서의 VOCs 상관계수는 모든 물질에 대하여 양의 상관성을 갖는다. 여름철 주거지역에서는 톨루엔이 벤젠과(B:T) 트리클로로벤젠에 대해서는 높은 양의 상관계수를 갖지만 에틸 벤젠과(E:T) 자일렌에(X:T) 대해서는 -0.217과 -0.275의 음의 상관성을 갖는 것을 볼 수 있

Table 6. Correlation coefficient of BTEX at each sampling site

	Benzene	Toluene	Ethyl-benzene	Xylene
Industrial area (summer)				
Benzene	1.000			
Toluene	0.202	1.000		
Ethyl-benzene	0.625	0.327	1.000	
Xylene	0.253	0.395	0.568	1.000
Residential area (summer)				
Benzene	1.000			
Toluene	0.916	1.000		
Ethyl-benzene	-0.241	-0.217	1.000	
Xylene	-0.387	-0.275	0.573	1.000
Industrial area (winter)				
Benzene	1.000			
Toluene	0.538	1.000		
Ethyl-benzene	0.580	0.842	1.000	
Xylene	0.403	0.407	0.576	1.000
Residential area (winter)				
Benzene	1.000			
Toluene	0.280	1.000		
Ethyl-benzene	-0.257	0.163	1.000	
Xylene	0.019	0.311	-0.027	1.000

다. 여름철 주거지역에서 스티렌은 모든 다른 VOCs에 대해서 아무런 상관성이 없는 것으로 나타나고 있다. 이것은 스티렌의 농도가 매우 낮은 농도로 감지되었고 또 거의 대부분 검출 한계 이하였기 때문인 것으로 보인다. 에틸 벤젠은 톨루엔(T:E) 말고도 벤젠(B:E), 트리클로로벤젠과도 음의 상관관계를 보였다. 겨울철 공단지역에서는 여름철 공단과 마찬가지로 전반적으로 VOCs 간 양의 상관성을 보이고, 톨루엔과 에틸 벤젠 (T:E)의 상관계수가 0.842로 높게 나타났다. 겨울철 주거지역에서는 에틸 벤젠이 벤젠과 트리클로로벤젠, 자일렌에 대해서 음의 상관성을 보였다. 또한 전반적으로 물질들간의 상관계수의 절대값이 가장 작게 나타났다.

Table 6는 BTEX 물질들간의 상관성을 보여준다. 공단지역과 주거지역으로 구분해 살펴보면, 에틸 벤젠의 경우 공단지역에서는 다른 휘발성 유기화합물들에 대해 양의 상관성을 갖지만, 주거지역에서는 음의 상관성을 갖는 경우가 많았다. 벤젠은 여름철 주거지역에서의 톨루엔을 제외하고는 다른 물질들과의 상관 계수가 공단지역에서 더 높게 나타났다. 톨루엔 또한 공단지역에서 주거지역보다 상관계수의 절대값이 더 크다. 즉, 전반적으로 공단지역에서 물질간의 상관계수가 주거지역보다 더 높은 것은 BTEX가 용매나 원재료 가공시 배출되는 특성이 있다는 것과 관련지어 생각해 볼 수 있다.

## 4. 결론

시화지구의 공단지역과 인근 주거지역에서 대기 중 VOCs 물질을 대상으로 passive sampler를 설치해 시료를 채취 분

석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

공단지역과 주거지역 모두에서 톨루엔이 가장 높은 농도로 검출되었다. 벤젠을 제외한 조사 대상 물질들은 모두 공단지역이 주거지역보다 높은 농도 수준을 보였다. 스티렌은 주거지역에서는 거의 검출되지 않았다. TVOC의 평균농도는 공단지역이 66.88 ppb, 주거지역이 36.05 ppb로 공단지역에서 1.86배 더 높게 나타났다. 계절별 TVOC 농도 변화로는 공단지역이 여름철에 비해 겨울철에 크게 감소하였으며 주거지역은 거의 비슷한 수준으로 감소하였다.

평균 BTEX 농도 분석 결과, 벤젠은 공단지역과 주거지역에서 유사한 수준으로, 나머지 물질들은 모두 공단지역에서의 물질의 농도가 1.94~5.39배 높은 것으로 나타났다. 계절별 변화로는 에틸 벤젠과 자일렌은 공단지역과 주거지역에서 여름철에 비해 겨울철에 농도가 크게 감소하였으나, 벤젠은 겨울철에 농도가 더 높았다. 톨루엔은 겨울철에 공단지역에서는 감소했으나 주거지역에서는 증가하였다.

BTEX 비율 중에서 전반적으로 톨루엔이 차지하는 비율이 가장 컸으며 톨루엔>벤젠>에틸 벤젠>자일렌 순이었다. 벤젠의 비율은 공단지역보다 주거지역에서 더 높게 나타났다. 계절별 비율로는, 겨울철에 벤젠과 톨루엔의 비율이 크게 증가하였으며 자일렌은 감소하였다. 교통량과 오염배출시설의 지표 역할을 하는 B:T 비율은 0.6으로 나타났다.

VOCs 물질들간의 상관계수로부터 전반적으로 공단지역의 물질간 상관성이 주거지역보다 더 큰 것으로 나타났다. 공단지역에서 물질들간의 양의 상관성이 나타난 것과는 대조적으로, 주거지역에서는 에틸 벤젠과 톨루엔 등 음의 상관성을 갖는 경우가 있었다. 특히 에틸 벤젠과 벤젠, 자일렌과 벤젠의 상관관계 양상이 두 지역에서 차이를 보였다.

**KSEE**

**사 사**

본 연구는 시흥환경기술개발센터에서 시행한 환경기술연구개발사업(2007)의 연구비 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

**참고문헌**

1. International Agency for Research on Cancer(IARC),

“Monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans,” Supplement, 7, 11~12(1987).

2. 김조천, 김기현, “대기 중 휘발성 유기화합물질,” 한국대기환경학회지, 15(4), 407~417(2003).

3. 백성옥, 김영민, “도시지역에서의 실내외 주변공기 중 휘발성 유기화합물의 농도측정에 관한 연구,” 대기환경공학회지, 18(2), 181~197(1996).

4. 김진용, 이효송, 유재근, 길인섭, 김택현, 이영우, “시화지구에서 발생하는 VOCs 농도분포 특성 연구,” 한국대기환경학회지, 21(6), 613~624(2005).

5. 박성남, 이희석, 홍순혁, 이명희, “우리나라 VOC 발생 현황과 대책,” 세명대학교 환경공학과 졸업논문집(2004).

6. 김기현, 최규훈, 오상인, 최여진, 선우영, 전의찬, 주도원, “도심지역 매립장의 VOC 성분조성과 배출특성에 대한 연구,” Anal. Sci. Technol., 16(5), 407~417(2003).

7. Mahmoud F., Hang, D., Aneja. V. P., “Volatile organic compounds in some urban locations in United States,” Chemosphere, 47, 863~882(2002).

8. Birnur, B., Fraser, M. P., “Source identification and apportionment of volatile organic compounds in Houston,” Atmos. Environ., 40, 2385~2400(2006).

9. Anjali, S., Joseph, A. E., Devotta, S., “Volatile organic compounds in ambient air of Mumbai-India,” Atmos. Environ., 40, 892~903(2006).

10. Anjali, S., Sengupta, B., Dutta, S. A., “Source apportionment of ambient VOC in Delhi City,” Sci. Total Environ., 343, 207~220(2005).

11. Nelson, P.F., Quigley, S. M., “The hydrocarbon composition of exhaust emitted from gasoline fueled vehicles,” Atmos. Environ., 18(1), 79~87(1984).

12. Monod, A., Sive, B. C., Avino, P., Chen, Blake, D. R., Rowland. F. S., “Monoaromatic compounds in ambient air of various cities: a focus on correlations between the xylenes and ethylbenzene,” Atmos. Environ., 35(1), 135~149(2001).

13. Hsieh, L. t., Yang, H. H., Chen, H. W., “Ambient BTEX and MTBE in the neighborhoods of different industrial park in southern Taiwan,” J. Hazard. Mater., 128, 106~115(2006).

14. Kwangsam Na, Younpyo Kim, “Atmospheric environment,” 35, 2603~2614(2001).

15. D. Shooter, S.F. Watts, A.J. Hayes, “A passive sampler for hydrogen sulfide,” Environmental Monitoring and Assement, 38, 11~23(1995).

- 
16. 김종국, 송병주, 고장석, 김재식, “도심 및 공단 지역 대기중 휘발성 유기화합물 분포 특성,” 한국환경분석학회지, **5(4)**, 217~224(2002).
  17. Lee, S. C., Chiu, M. Y., F, H. K., Zou, S. C., Wang, X., “Volatile organic compounds (VOC) in urban atmosphere of Hong Kong,” *Chemosphere*, **48(3)**, 375~382(2002).
  18. Gee, I. L., Sollars, C. J., “Ambient air levels of volatile organic compounds in latin american and asian cities,” *Chemosphere*, **36(1)**, 2497~2506(1998).
  19. Choi, S. H., Park, S.W., Lee, C.S., Kim, H.J., Bae, S.Y., Inyang, H.I., “Patterns of VOC and BTEX concentration in ambient air around industrial sources in Daegu, Korea,” *J. Environ. Sci. Health*, **44(A)**, 99~107(2009).