

난지도를 중심으로 한 대기 중 BTEX 성분의 농도분포 특성에 대한 연구

Studies of Ambient BTEX Distribution Characteristics in the Nan-Ji-Do Landfill Site in Seoul

김기현* · 김민영¹⁾ · 오상인 · 윤중섭¹⁾ · 이강웅²⁾

세종대학교 지구정보과학과, ¹⁾서울시 보건환경연구원, ²⁾한국외국어대학교 환경학과

(2001년 5월 16일 접수, 2001년 11월 6일 채택)

Ki-Hyun Kim*, Min-Young Kim¹⁾, Sang-In Oh,
Joong-Sup Yun¹⁾ and Gangwoong Lee²⁾

Dept. of Geoinformation Sciences, Sejong University, Kun Ja Dong 98, Seoul

¹⁾*Seoul Metropolitan Research Institute of Public Health and Environment, Yang Jae Dong, Seoul,*

²⁾*Dept. of Environmental Sciences, Han Kuk University of Foreign Studies, Yong In*

(Received 16 May 2001; accepted 6 November 2001)

Abstract

In this study, the concentrations of major anthropogenic volatile organic compounds (VOCs) which include benzene, toluene, m,p-xylene, o-xylene, and ethylbenzene were measured at the Nan-ji-do landfill site during the spring and fall season of 2000. The temporal distribution characteristics of these VOCs were investigated over varying time scale. According to our study, the mean concentration of those species were computed to be 1.65 ± 2.68 (benzene), 9.62 ± 9.32 (toluene), 1.84 ± 2.90 (m,p-xylene), 0.83 ± 1.43 (o-xylene), and 1.17 ± 1.21 ppb (ethylbenzene). The VOCs levels in the study area are not distinctively higher than the level typically found in urban area that can be subject to the influence of various anthropogenic source processes. Inspection of their temporal trends exhibited various patterns for the diurnal (and seasonal) cycle. Although each species showed distinctive patterns in temporal distribution trends, we were able to find the strong correlations among most concurrently measured VOCs except for benzene.

Key words : VOCs, landfill, anthropogenic, BTEX

1. 서 론

오존은 대기 환경의 변화를 설명하는데 있어 가

장 핵심적인 성분으로 존재한다. 오존의 역할은 고도별로 다양하게 나타난다. 성층권에서는 자외선을 흡수하여 지구의 생명체가 과도한 자외선에 노출되는 것을 막아주며, 대류권에서는 오존의 광분해를 통해 생성된 산화제가 대기로부터 방출된 거의 모든 물질들과 반응하여, 이들이 대기층내 누적되는 현상을

* Corresponding author
Tel : +82-(0)2-3408-3233, E-mail : khkim@sejong.ac.kr

막아준다(Michael and Kevin, 2000). 그러나 지구의 대기 환경에 미치는 오존의 이러한 긍정적 역할은, 대기 중 휘발성 유기화합물질(Volatile organic compounds: VOCs)의 배출 증가로 인해 점차 변형되어 가고 있다. VOC의 화학적 특성과 관련된 환경학적 영향은 성층권 오존층의 파괴와 동시에, 지표면 오존 농도의 증가를 촉진시키는 추세이다(Trainer *et al.*, 2000). 이러한 과정이 심화된다면, 자외선의 과도한 투과와 함께 대도시를 중심으로 발생하는 광화학 스모그의 과도한 산화능력으로 인해 인간의 건강과 생명은 크게 위협받게 될 것이다. 특히 대도시의 국지적 오존오염 문제는 선진 각국의 공통된 사회경제적 현안으로 대두되어, 국가적 차원의 관리가 요구되고 있는 실정이다(Wiederkehr, 1994). 특히 그 초점은 VOC의 배출저감과 관련된 기술개발 등의 방식으로 이어지고 있다.

오존 오염문제의 실질적인 관리 방안이 VOC를 주요 대상으로 하는 까닭은 VOC가 오존형성의 전구물질로서의 기여도 뿐만 아니라, 종류가 다양하고 저농도로 배출되는 특성과 불특정 배출원이 산재하여 배출시설 전반에 대한 관리가 매우 어려운 이유 등이 종합적으로 작용한다(김기현과 백성욱, 1998; 백성욱 등, 1998). 따라서 다양한 VOC 발생원 및 배출규모, 종류 등에 대해 객관적으로 평가할 수 있는 방법이 확립된다면, 보다 효율적인 대책 방안이 강구될 수 있을 것이다(전의찬 등, 1998). 그러나 우리나라에서 선행된 VOC의 종류별 측정사례 및 관측 연구자료의 대부분이 공단지역 또는 도심지역의 주요 시설물을 관측 대상으로 하고 있어, 아직까지 인위적 배출원의 중심을 이루는 도심환경권이나 자연적 배출원에 민감한 영향을 받는 삼림지역 등에 대해 VOC의 농도수준을 객관적으로 비교 할 만한 직접적인 근거가 취약한 실정이다(김조천 등, 2000; 전의찬 등, 1998). 대기오염으로 파생된 여러 가지 문제에 대한 인과관계를 규명하고 합리적인 저감대책을 모색하기 위해서는 이들의 배출원이나 배출규모 등에 대한 정량적인 정보를 확보하는 것이 필수적이다. 특히 인위적 배출원 중에서도 점오염원(Point source), 면오염원(Area source), 이동오염원(Mobile source) 등에 대한 기여도나 상호간의 관계 등을 체계적으로 규명해야 할 필요성이 점차 강하게 거론되고 있다(Mukund *et al.*, 1996). 일반적으로 점오염

원은 높은 굴퓏에서 이루어지는 배출과 같이 그 영향범위가 넓은데 반해, 면오염원과 이동오염원은 배출구가 낮아 상대적으로 대기확산이 잘 이루어지지 않으므로 지표면에 상대적으로 강한 영향을 미치는 특성이 나타날 수 있다.

본 연구진은 대규모 폐기물 매립시설인 난지도 지역을 중심으로 BTEX를 위시한 총 23가지 성분의 VOC에 대한 농도관측을 수행하였다. 이를 통해 난지도와 같은 대규모 면오염원 지역의 지표부근에서 VOC의 농도 분포특성을 파악하고, 시간적 규모의 농도변화에 대한 추세분석과 측정대상물질간의 상호 비교분석을 수행하였다. 특히 난지도 매립지는 세계 최대의 비위생 생활 쓰레기 매립지 중의 하나로서 그 규모나, 서울과 근접한 입지 여건 등의 요인으로 인해, 매립시설의 관리대책 수립에 매우 중요한 연구대상으로 인식되고 있다(김민영 등, 2000). 더욱이 매립층 내부에서 진행되는 대규모 유기물의 부패현상 등으로 인해, 대규모 VOC의 발생이 예측되는 지역이기도 하다(Leach *et al.*, 1999).

2. 연구방법

2.1 관측장소와 시기 및 대상

연구대상지역인 난지도는 서울시 마포구 성산동과 상암동 일대에 총 면적 823,000평(2.72 km²), 매립높이 해발 94~98 m의 규모를 유지하고 있다. 그 매립량을 부피로 따질 경우, 0.092 km³(8.5톤 트럭 1,300만 여대분)에 달하는 수준이다. 생활쓰레기에서부터 건설폐자재, 하수슬러지, 산업폐기물 등 매립 폐기물의 종류가 다양하다. 특히 매립방법에 있어서 비위생 단순매립을 적용함으로써, 각종 고농도 가스상 오염물질의 주요 배출원으로 추정되고 있다. 매립된 쓰레기로부터 생성되는 가스의 축적을 막기 위해서 주로 지하 40~60 m 깊이로 관정된 배출공을 통해 가스를 배출시키고 있다. 이들 배출공은 내경 15 cm, 지표면으로부터 2 m 정도의 높이를 유지하는데, 양대 공구지역에 총 106개가 고르게 배치되어 있다. 이로부터 배출된 가스의 성분조사를 실시한 결과에 의하면, 주로 고농도의 메탄, 탄소화합물, 수분 등이 수십 %대에 존재하고, 수은과 같은 중금속 등도 배경대기 농도의 1,000배에 육박하는 수준인

것으로 밝혀졌다(김민영 등, 2001). 본 연구에서는 매립지 1공구에서 배출공으로부터 일정한 거리를 유지하는 동북방향의 한 지점을 연구대상 지점으로 택하여 난지도의 일반 대기 중에 존재하는 VOC 성분들의 농도를 측정하였다. 이들 성분에 대한 관측은 봄철에 해당하는 2000. 3. 22~4. 4일까지 2주간, 가을철에 해당하는 9. 20~10. 4일까지 2주간의 기간동안 실시하였다.

본 연구에서는 benzene, toluene, ethylbenzene, m,p-xylene과 o-xylene을 포함하는 BTEX 성분 외에도 styrene, 1, 3, 5-trimethylbenzene, 1, 2, 4-trimethylbenzene의 방향성 화합물과 C₁~C₆에 이르는 14종의 염화탄화수소 화합물을 측정하였다(표 1). 이들 중 BTEX에 대해서는 각 개별 항목별로 시간적 규모에 따른 농도분포 특성 및 추세분석을 통해 자세한 환경거동을 살펴보았다. BTEX를 제외한 항목의 경우, 특히 염화탄화수소물의 경우 GC-FID 시스템이 지닌 제한성으로 인해 정확하게 정량적인

의미를 부여하기 어렵다. 따라서 BTEX의 경우, 모든 성분을 개별적으로는 물론 전체적으로도 해석을 실시한 반면, 염화탄화수소물은 총괄적으로 거동을 비교하는 수준으로 해석을 제한하였다. 일반적으로 분류한 기준은 다음과 같다. BTEX를 포함하는 모든 방향족 화합물은 TA(total aromatic species), 염화탄화수소류는 총칭하여 TCL(total chlorinated species), 그리고 이들 두 가지 항목의 합은 TC(=TA+TCL)로 정의하였다. 아울러 관측장소 주변의 대기 질 현황을 파악하기 위해 전체 측정기간동안에 8가지 항목(O₃, NO, NO₂, NO_x, SO₂, CH₄, CO, PM10)과 주요 기상요소를 동시에 관측함으로써 VOC 성분들의 상호 관계를 파악하고 분석하는데 이용하였다.

2.2 채취와 분석

본 연구에서 사용된 VOC 시료 채취용 튜브는 스테인레스 강 재질의 튜브(90 mm 5 mm ID, Supelco 사)에 Cabotrap CTM(20/40 mesh), Cabotrap BTM(60/

Table 1. A list of VOC analytes in Nan-ji-do.

Name	Chem	MW g/mole	MW g C/mole	ppb → ng/m ³	ppb → ng/m ³	ng/m ³ → ppb	ng C/m ³ → ppb
Aromatic species							
benzene	C ₆ H ₆	78	72	3482	3214	0.00029	0.00031
toluene	C ₇ H ₈	92	84	4107	3750	0.00024	0.00027
styrene	C ₈ H ₈	104	96	4643	4286	0.00022	0.00023
"m,p-xylene"	C ₈ H ₁₀	106	96	4732	4286	0.00021	0.00023
o-xylene	C ₈ H ₁₀	106	96	4732	4286	0.00021	0.00023
ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	106	96	4732	4286	0.00021	0.00023
"1,3,5-trimethylbenzene"	C ₉ H ₁₂	120	108	5357	4821	0.00019	0.00021
"1,2,4-trimethylbenzene"	C ₉ H ₁₂	120	108	5357	4821	0.00019	0.00021
TA (total aromatic species)	-	-	756	-	33750	-	0.00193
Chlorinated species							
methylenechloride	CH ₂ Cl ₂	84.9	12	3790	536	0.00026	0.00187
chloroform	CHCl ₃	119.35	12	5328	536	0.00019	0.00187
carbontetrachloride	CCl ₄	153.8	12	6866	536	0.00015	0.00187
"1,1-dichloroethane"	C ₂ H ₄ Cl ₂	98.9	24	4415	1071	0.00023	0.00093
"1,2-dichloroethane"	C ₂ H ₄ Cl ₂	96.9	24	4326	1071	0.00023	0.00093
"1,2-dichloroethane"	C ₂ H ₄ Cl ₂	98.9	24	4415	1071	0.00023	0.00093
"1,1,1-trichloroethane"	C ₂ H ₃ Cl ₃	132.35	24	5908	1071	0.00017	0.00093
trichloroethylene	C ₂ HCl ₃	131.35	24	5864	1071	0.00017	0.00093
"1,1,2-trichloroethane"	C ₂ H ₃ Cl ₃	133.35	24	5953	1071	0.00017	0.00093
tetrachloroethene	C ₂ Cl ₄	165.8	24	7402	1071	0.00014	0.00093
"1,2-dichloropropane"	C ₃ H ₆ Cl ₂	112.9	36	5040	1607	0.00020	0.00062
chlorobenzene	C ₆ H ₅ Cl	112.45	72	5020	3214	0.00020	0.00031
m-dichlorobenzene	C ₆ H ₄ Cl ₂	146.9	72	6558	3214	0.00015	0.00031
p-dichlorobenzene	C ₆ H ₄ Cl ₂	146.9	72	6558	3214	0.00015	0.00031
o-dichlorobenzene	C ₆ H ₄ Cl ₂	146.9	72	6558	3214	0.00015	0.00031
TCL (total chlorinated species)	-	-	528	-	23571	-	0.01400

80), Carbosieve SIII™ (60/80)를 충전한 carbotrap300을 사용하였다. 튜브에 충전한 흡착제의 총량은 300 mg이며, Cabotrap CTM은 10 m²/g로 약한 강도의 흡착제로서 nC₈~nC₂₀ 성분, Cabotrap BTM은 100 m²/g로 중간강도의 흡착제로서 nC₄~nC₈ 성분, Carbosieve SIII™은 carbon molecular sieve로써 800 m²/g로 nC₂~nC₆와 같은 휘발성이 큰 성분의 시료에 적용하는 것으로 알려져 있다. 흡착튜브는 사용 전에 열탈착장치(ATD-400, Perkin Elmer사)에서 고순도 질소가스를 분당 50 ml로 통과시키면서 350에서 1시간 conditioning을 실시하였다. 대기 중의 시료채취는 저유속 정량펌프(ALPHA 2, AMETEK사)를 테프론 관을 이용하여 각각의 흡착 튜브(약한 흡착제가 대기 중으로)에 연결한 연속시료 채취장치(STS-25, Perkin Elmer사)로 실시하였다. 흡입공기 유량은 50 ml/min 전후로 하여 2시간 단위로 시료를 채취하였다. 펌프는 자동유량교정기(DC-1 Flow Calibrator, BIOS사)를 사용하여 현장에서 교정하였다.

시료를 채취한 흡착튜브를 자동열탈착 시료주입장치(Automatic Thermal Desorption: ATD-400)에 장착한 후, 가스크로마토그래피를 이용하여 VOC 성분을 분석하였다. 시료흡착관에 흡착된 VOC는 ATD-400 장치에서 수분을 제거하기 위하여 1분간 purging한 다음(1분간 purging을 default 함), 350°C에서 5분간 열탈착한 후, -30°C로 유지되는 Cold trap으로 농축하였다. 다시 300°C에서 5분간 열탈착한 후, 가스크로마토그래프상에서 분리능의 향상을 도모하고 수분의 영향을 줄여주기 위하여 시료를 1:10 분할비(split ratio)로 분할주입 하였다. GC을 분석할 경우 retention time(RT)이 조금씩 이동하는 경우가 있는데, 이를 해결하기 위하여 미국의 오존진구물질을 분석하는 방법(Pamsgram vol. 18)에 준하여, 대기 중에서 검출되는 물질들(특히 기준물질으로, 벤젠, m,p-자일렌 등)을 선정한 후, RT와 관련된 불확실성을 제거하였다. 주입된 시료는 가스크로마토그래피에서 BP-1 칼럼(0.32 mm 60 m, 1 μm)에 의해 분리된 후 FID 검출기를 통해 검출되었다.

본 연구에서는 검량선을 작성하기 위하여 TO-14 표준가스(39항목 함유)을 1 ppm을 표준가스희석장치(Dynamic Diluter: Model 600, Entech사)를 이용하여 canister에 30 ppb로 희석한 후 이를 흡착튜브에 유량 50 ml/min으로 5분, 10분, 20분씩 각각 3개씩

흡착농축하여 시료분석 방법과 동일하게 실시하였고, BTEX 항목의 경우, 상대표준오차(relative standard error) 등을 이용하여 정밀도를 계산한 결과, 일반적으로 10% 이내의 수준으로 유지되는 것이 확인되었다. 절대량을 기준으로 할 때, 본 연구에 활용된 GC-FID 시스템은 약 1 ngC 정도의 검출한계를 유지하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전체 및 계절별 분포특성

난지도를 중심으로 두 차례(봄과 가을)에 걸쳐 실시한 모든 항목의 측정결과가 표 2에 제시되었다. 표 2a와 b에는 난지도 상의 일반 대기 중에서 발견된 VOC의 전체 관측결과와 양 계절별 관측결과를 요약하였다. 표 2a에 제시된 BTEX의 전체 농도자료를 보면, toluene의 평균농도가 9.62±9.32 ppb로 가장 높은 반면, o-xylene은 0.83±1.43 ppb로 가장 낮게 나타났다. 나머지 항목은 약 1~2 ppb의 평균농도를 유지하는 것으로 관측되었다. 그림 1의 전체 기간동안의 빈도분포 분석결과에 의하면, toluene을 제외한 BTEX 항목의 경우 평균농도와 최빈값의 농도범위가 거의 일치하는 것으로 나타났다. 반면 toluene은 2~4 ppb에서 최빈값을 갖는 것으로 나타나 평균농도와는 큰 차이를 보였다. Toluene과 같이 평균과 최빈값간에 큰 괴리가 나타나는 현상은 전체의 약 30%를 차지할 정도로 많은 자료가 고농도 영역(10 ppb 이상을 초과하는)에 존재한데 따른 결과로 보인다. 이와 같이 toluene이 이상고농도대에서 존재하는 현상은 이미 본 연구진이 반포지역을 중심으로 DOAS system을 이용하여 BTX의 거동을 분석한 선행연구에서도 확인된 바 있다(오상인 등, 2000). 표 2b에 통계적으로 요약된 계절별 농도자료를 통해 살펴본 바에 의하면, ben-zene과 toluene은 봄철에 비해 가을철의 평균농도가 높게 산출되었다. 이와는 반대로 xylene류는 봄철에 보다 고농도의 평균값을 유지하는 것으로 나타났다. 그러나 ethylbenzene의 봄, 가을철의 평균농도 차이는 거의 무시할 정도로, 비슷한 수준으로 나타났다. 이들 중 benzene과 xylene류는 계절간 두 배 가량의 농도차이를 보이면서, 통계적 검정에서도 그 차이가

Table 2. A statistical summary of VOC concentrations measured from Nan-ji-do during the whole study period (2000. 3. 22~4.4 and 9.20~10.4).
(All concentrations in ppb unit)

(A) All data

	TC	TA	TCL	benzene	toluene	"m.p-xylene"	o-xylene	ethylbenzene
Mean	206±207	122±129	84.5±104	1.65±2.68	9.62±9.32	1.84±2.90	0.83±1.43	1.17±1.21
Median	132	84.5	36.0	1.12	6.63	1.08	0.46	0.78
Range	9.38~1670	3.23~1241	0.83~527	0.05~30.9	0.04~55.1	0.00~30.2	0.04~15.0	0.00~9.96
N	218	218	216	213	217	212	165	213
CI(90.0%)	23.1	14.4	11.7	0.30	1.04	0.33	0.18	0.14

(B) Data sets divided by seasons : spring and fall

	benzene	toluene	"m.p-xylene"	o-xylene	ethylbenzene
Spring					
Mean	1.03±0.89	9.03±11.1	2.66±3.86	1.01±1.75	1.20±1.55
Median	0.94	4.36	1.41	0.57	0.71
Range	0.05~6.71	0.04~55.1	0.04~30.2	0.04~15.0	0.04~9.96
N	93	93	91	89	90
CI(90.0%)	0.15	1.91	0.67	0.31	0.27
Fall					
Mean	2.13±3.41	10.1±7.73	1.22±1.65	0.62±0.89	1.15±0.89
Median	1.26	7.59	0.99	0.40	0.93
Range	0.13~30.9	0.27~46.8	0.00~16.4	0.06~5.50	0.00~4.39
N	120	124	121	76	123
CI(90.0%)	0.52	1.15	0.25	0.17	0.13

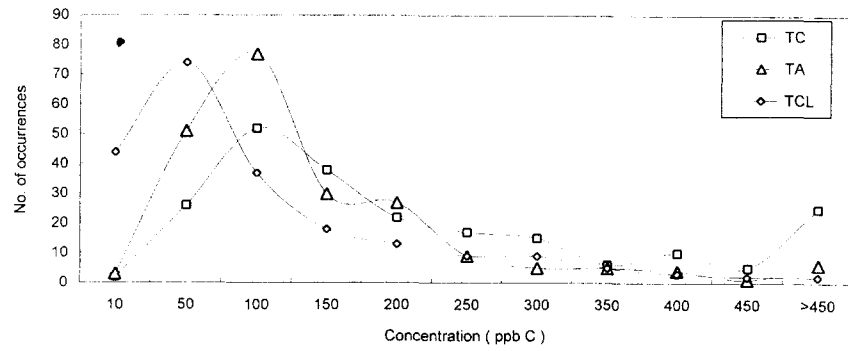
유의한 수준(90%)인 것으로 밝혀졌다.

전체 연구 기간동안 시간적 농도분포의 연속적인 변화 경향성을 비교해 보면, benzene은 봄철에 비해 가을철에 상대적인 고농도 분포양상을 띠고, 그 변동폭 또한 크게 나타남을 알 수 있다. 반면 m,p-xylene과 o-xylene 등은 가을철에 비해 봄철에 이러한 현상이 두드러지게 나타난다. 그러나 나머지 항목에서는 산발적으로 고농도 값이 출현하는 것 외에는, 계절간에 규칙적인 분포의 경향성을 제시할 수 있는(일종의) 기준을 관찰할 수 없었다. 보다 세부적인 개별항목의 농도분포를 확인하기 위해, 계절별 빈도분포 분석결과(그림 2)를 제시하였다. Benzene과 m,p-xylene의 경우 각각 가을철과 봄철에 4.5 ppb 이상의 고농도 관측값이 큰 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 이러한 특정 계절에 특정 항목이 고농도를 보이는 현상이 계절간 평균농도의 비교에서 차이 또는 상대적인 우위성을 나타내는 원인으로 사료된다. 반면에 o-xylene의 경우는 특정 계절의 고농도 발생빈도 비율이 크게 나타나지 않지만, 봄철에 비해 가을철 저농도대(0.5 ppb 이하)에

관측값이 밀집한 것이 원인으로 분석된다. Toluene은 최빈값의 농도범위가 봄철에 저농도(2~4 ppb), 가을철에 고농도(6~8 ppb)의 분포특성을 보임에 따라, 부분적으로 가을철에 고농도대의 분포특성을 보여주었다. 그러나, 실제로 이들의 평균농도는 10 ppb를 훨씬 초과하는 이상고농도대의 분포에 의해서 상당수준 조정된다는 점에 유의하여야 할 것이다.

3.2 계절별 일주기 규모의 분포특성 및 추세 분석

그림 3에는 항목별로 계절별 주야간의 농도자료를 비교하였다. 우선적으로 주야간의 농도차이가 통계적(유의수준 90% 이상)으로 구분되는 경우를 계절별로 살펴보았다. 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다. (1) 가을철에는 benzene이 주저야고(周低夜高)를, (2) 봄철에는 m,p-xylene과 ethylbenzene이 주고야저의 농도 차이를 보이고, (3) toluene은 양 계절에서 모두 주저야고의 차이가 일관성 있게 유지된다는 사실이 밝혀졌다. 주목할 만한 점은 계절



TA and TCL denote total aromatic and total chlorinated species of VOC, respectively. In addition, TC is the sum of TA and TCL.

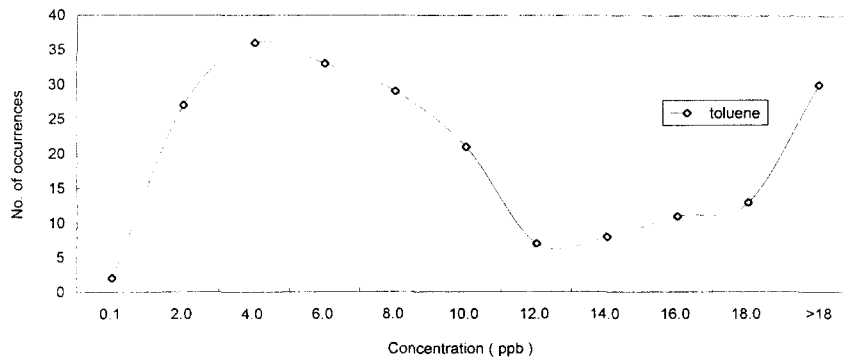
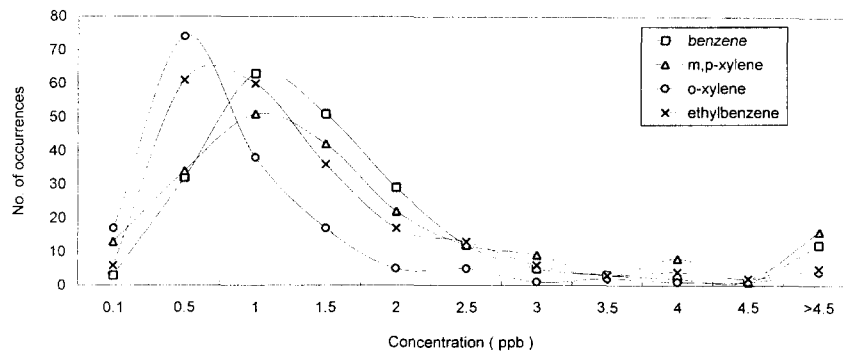


Fig. 1. A plot of frequency distribution for VOC species determined during the whole study period. (2000. 3. 22~4.4 and 9. 20~10. 4)

간에 통계적 차이가 유의하지 않은 것으로 나타나는 toluene과 ethylbenzene의 경우, 주야간의 차이검정에서는 유의한 것으로 밝혀졌다는 점이다. 따라서 이 두 항목은 시간적인 관점에서 비교할 때, 계절적인 요인보다 주야간에 의한 요인이 농도분포의 차이를 유발하는데 보다 더 중요하게 작용할 수 있는

듯 하다.

통계적으로 나타난 주야간의 농도차이 경향을 보다 세밀하게 설명하기 위해 계절별 주야간의 빈도분포를 분석해 보았다. Toluene을 제외한 모든 BTEX 항목의 경우, 각 계절마다 주야간 농도의 최빈값 발생범위와 빈도분포 곡선의 형태는 매우 유사한 것

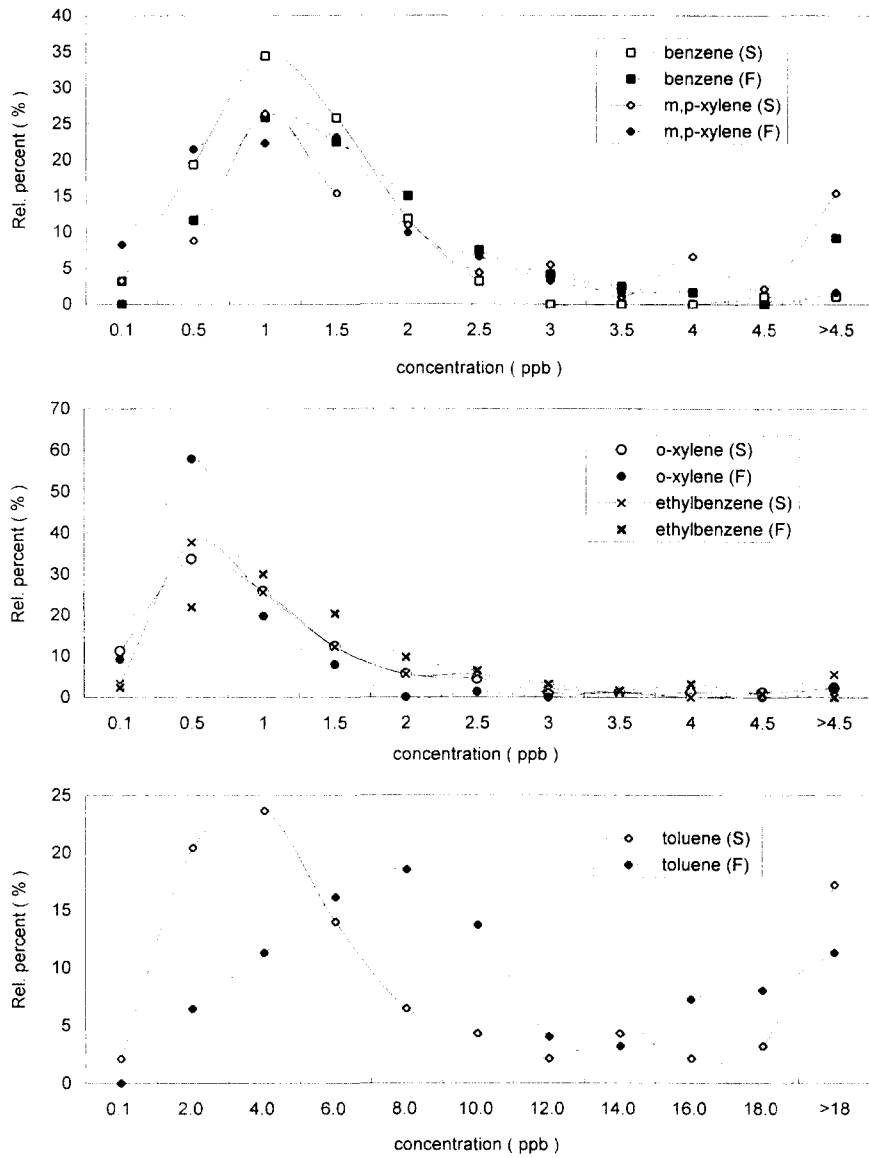


Fig. 2. Plot of relative frequency distribution for the seasonally divided VOC data groups. The symbols, S and F in the parenthesis denote spring and fall, respectively.

으로 관찰되었다. 그러나 특정계절의 주간 혹은 야간에 고농도대 (4.5 ppb 이상)의 발생빈도가 두드러지게 증가하는 현상 benzene (가을철 주간), m, p-xylene (봄철 야간), ethylbenzene (봄철 야간)으로 인해 계절별로 주야간의 농도 차이가 나타나는 데 기여한 것으로 나타났다. 이러한 고농도현상의 기여도

는 toluene의 경우, 보다 구체적으로 드러난다. Toluene은 양 계절에서 모두 주간의 최빈값이 야간의 최빈값보다 고농도대에 위치하는 것으로 나타난다. 그러나 고농도 (18 ppb 이상)의 발생빈도가 주간 (10%)보다 야간 (20%)에서 큰 비율을 차지함으로써, 최빈값의 분포현상과 역전되는 주저야고의 농도차이

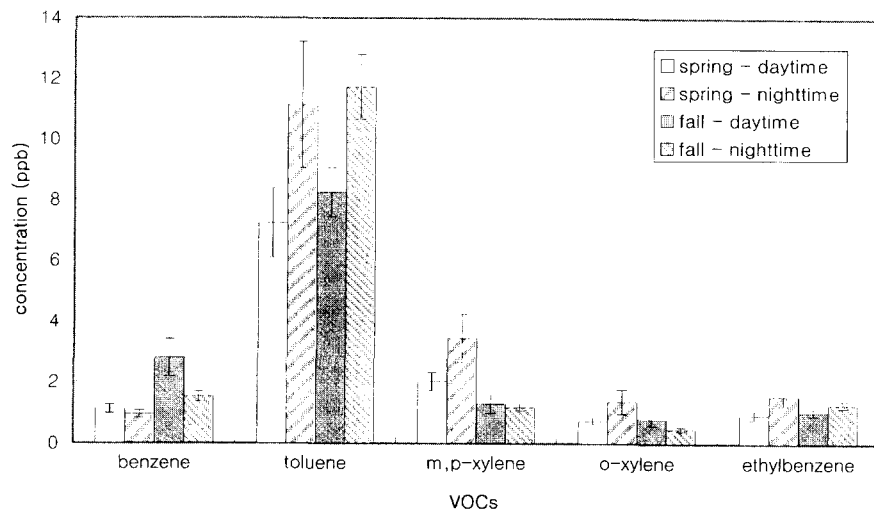


Fig. 3. Comparison of both diurnally and seasonally divided VOC data groups.

를 보이게 된 것으로 사료된다. 이러한 계절별 주야간 빈도분포 분석결과는 앞서 요약한 개별항목의 주야간대 비교결과를 잘 설명하는 동시에 그러한 분석결과에서 확인된 경향을 보다 세부적으로 이해할 수 있는 기회를 제공하였다. 그림 3은 계절별 주야간대의 농도수준의 차이를 24시간, 일주기를 기준으로 확인시켜 주었다. Benzene, toluene, ethylbenzene은 봄과 가을, 양 계절에서 일주기적으로 일관된 농도경향(주저야고, 혹은 주고야저)을 보여 주었다. 그러나 xylene류는 봄철에 주저야고의 분포특성을 보이다가, 가을철에는 주고야저로의 분포특성을 보이는 역전현상이 나타났다. 이러한 계절별 주야간의 농도 역전현상의 사례는 과거 나주지역의 시간적 농도 변화에 대한 연구 결과에서도 찾아 볼 수 있다(김조천 등, 2000). 나주 지역에서 관측한 5가지 BTEX 항목의 주야간대 농도비(D/N)는 봄철의 경우 1.0을 초과하지만, 가을철에는 benzene을 제외한 항목들의 D/N값이 1.0보다 낮은 값을 취함으로써, 계절별로 다수의 VOC 항목에서 상당히 상반된 분포특성을 나타내는 사례가 있었음을 주시할 필요가 있다.

24시간의 일주기규모의 추세분석을 위해 BTEX 항목의 시료채취 시간간격에 따라, 2시간 단위로 관측한 농도자료를 임의적으로 오전 2시를 기준시점

으로 설정하여 개별성분 농도를 표준화(normalization)한 결과는 다음과 같다(그림 4). 이러한 분석결과에 의하면, benzene을 제외한 항목이 시간 함수의 변화에 따라, 비교적 완만한 형태로 주고야저의 경향에 가깝게 변화하는 양상을 보였다. 반면 benzene은 이러한 경향과 달리 주간 12~16시 사이에 심한 농도변화와 함께 나머지 항목과 구별되는 분포특성을 보였다. 이러한 결과에 주목하여, 보다 세부적으로 계절별로 자료를 구분한 후 추세분석을 통한 확인과정을 수행하였다. 그 결과, 이러한 현상은 가을철에 나타나는 모든 VOC 항목의 공통적인 분포특성을 발견할 수 있었다. 다만 항목별로 강도의 차이가 있을 뿐, 가을철에 주간 12~14시 사이에 한시적으로 농도가 급격히 상승하다가, 14~16시 사이에 또다시 감소하는 경향이 주를 이룬다. 그러한 반면 봄철 자료의 추세분석에서도 공통적으로 나타나는 분포특성이 관찰되었다. 봄철에는 가을철에 비해 시간함수에 대해 대체로 변화가 심하지 않는 균일한 농도분포를 보이지만, 야간 23~24시 사이에 급격한 농도상승이 나타난다는 점을 들 수 있다. 이러한 봄철과 가을철자료의 추세분석결과에 의미를 부여할 수 있는 이유는 계절에 따라 구별되는 분포 추세의 특성이 대체로 모든 VOC 항목에 공통적으로 재현된다는 점이다. 아울러 개별 항목별로 가장

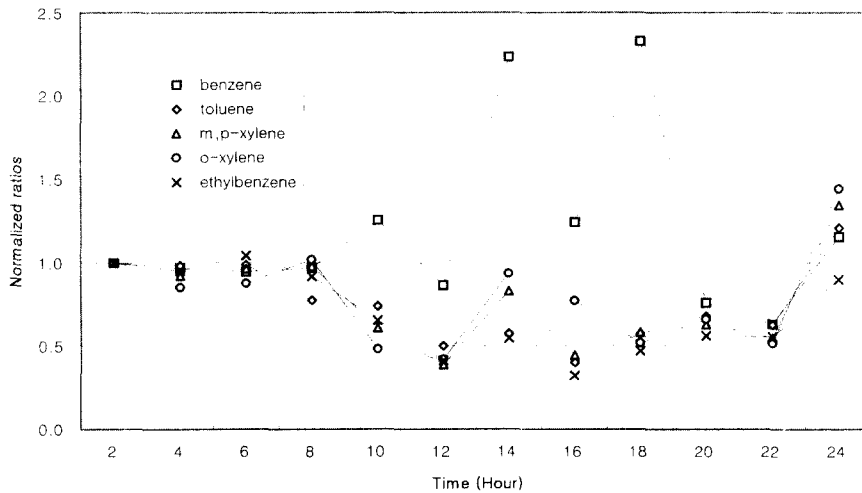


Fig. 4. Comparison of normalized temporal variabilities of each individual VOC specie over diurnal scale. For each specie, normalization was made using the concentration data obtained at 2 AM of the night.

뚜렷하게 나타나는 계절별 24시간 분포특성을 살펴 보았을 때, 다음과 같은 결과들을 주목할 만하다. (1) o-xylene은 계절간에 가장 대칭적인 분포곡선을 나타냄으로써, 앞서 언급한 계절별 주야간 농도의 역전현상을 명확히 부연하였다. (2) 이와 반대로 toluene은 양 계절의 24시간 분포경향이 가장 일관성 있게 나타난다는 점이다. 실제로(그림 3에서도 확인할 수 있듯이) 양 계절에서 구한 주야간의 비(D/N)는 모두 1.0에 가깝다.

3.3 기존 VOC 분석연구와의 비교

난지도의 VOC 농도 경향성을 다른 연구지역과 비교함으로써, 이 지역에 나타나는 농도의 절대적 및 상대적 의미를 부여 할 수 있을 것이다. 이미 기존 연구결과가 제시된 서울의 청량지역(Na and Kim, 2001)과 나주시 산림지역(김조천과 김기현, 2000)을 비교대상 지역으로 선정하였다. 이들 지역은 각각 오염이 심화된 도심지역과 비교적 청정한 대기질이 유지되는 배경지역을 대표하는 것으로 고려할 수 있다. 그 결과, 난지도 지역의 전체적인 농도수준은 toluene의 경우, 서울시(6.4 ppb)에 비해 약 30% 정도, 나주(1.1 ppb)에 비해 9배 높을 정도로 고농도의 분포를 나타냈다. 그렇지만, 기타 성분의 경우 지역간의 큰 차이에 의미를 두기 어려울

정도로 그 차이가 미미하게 나타났다. 특히 benzene과 ethylbenzene은 거의 차이를 구분하기 어려운 수준으로 미미하게 난지도 지역의 농도가 높게 나타났다. 반면 m,p-xylene 류의 항목에서는 미미하나 청량지역의 농도가 난지도지역에 비해 높게 나타났다(2.3 vs 1.8 ppb). Toluene을 제외한 기타 성분들의 경우, 이들 지역의 농도가 비교적 청정한 나주지역에 비해 근소하게 높은 것으로 나타났다. 따라서 난지도 지역에서 발견되는 BTEX의 농도 수준은 toluene과 같이 어느 정도 차별성이 드러나는 경우도 발견되지만, 전체적으로는 교통오염원 등이 밀집한 도심과 같이 일반적인 오염지역에서 발견되는 농도수준을 크게 벗어나지 않는 것으로 볼 수 있을 듯 하다.

봄, 가을의 기간동안 두 차례에 걸쳐 난지도에서 관측한 BTEX의 농도수준이 특별히 오염이 문제가 될 수 있는 지점이나 또는 그렇지 않은 지점들과 크게 뚜렷한 정도로 구분되지 않는다는 사실은 여러 가지 가능성을 시사한다. 난지도 지역에서 산재한 배출공 등을 통해서 상당히 높은 수준의 BTEX가 배출된다는 점이 확인 되지만(외기의 1,000배 수준에 달하는), 이러한 배출공의 기여도는 실제로 미미한 것으로 보인다. 관측점은 95 m를 상회하는 고지대로써 강한 풍속에 의한 이류확산이 활발하게

이루어진다. 따라서 이러한 연구대상 지역에서 관측되는 기타 오염물질의 경우에도 메탄이나 일산화탄소와 같은 일부 항목을 제외하고는 특별하게 높은 수준이라고 하기는 어렵다.

세 지역의 시간적인 농도의 경향성을 비교하고자 단주기적으로 주야간의 농도비(D/N)와 구하였다. 주야간 경향성의 비교결과, 난지도 지역은 benzene만이 주교야저의 분포특성을 나타내는 반면, 나머지 항목에서는 대체로 주저야고의 분포형태를 나타내었다(이는 어디까지나 계절간의 구분없이 전체적인 경향성을 비교한 것임). 아울러 benzene의 D/N의 값은 두 지역에서 보다 상대적으로 큰 값을 알 수 있다. 그러나 benzene을 제외한 여타 항목의 경우, 다른 지역과 구별되는 단주기적 특징은 다소 약한 것으로 볼 수 있다.

3.4 난지도 지역의 VOC 농도를 조절하는 요인들에 대한 고찰

본 연구를 통해 관측된 개별 항목들간의 분포특성을 보다 자세하게 이해할 수 있는 기반을 확충하기 위해, 상관분석과 요인분석 같은 통계적인 분석을 실시하였다. 표 3에는 5가지 VOC 항목과 주요 관련변수들간의 상관성 분석결과를 제시하였다. 그 결과, 대체로 benzene을 제외한 VOC 항목들 상호간에 통계적인 유의수준(99%)에서 강한 양의 상관관계가 나타났다. 그러나 이들 항목은 오염물질이나 기상요인과의 상관성 분석에서는 현저히 낮은 상관강도를 유지하거나 통계적으로 유의한 대비를 이루지 못하였다. 이러한 사실들로 미루어 짐작할 수 있는 것은 난지도에서 진행되는 BTEX의 증가와 감소에 관련된 주요 환경인자들의 연계성을 비교할 경우, benzene과 같은 성분에서 상대적으로 그러한 유의성을 발견하기가 쉽지 않은 것으로 보인다. 이러한 경향성의 비교는 주기별 기준으로 구분한 자료분석에서도 일관성 있게 나타났다. 아울러 전체자료에서는 BTEX와 오염물질간의 뚜렷한 상관성을 구분하는 것이 여의치 않았지만, 시간을 기준으로 자료의 분포특성을 제한되었을 때 상대적으로 보다 다양한 상관성이 나타나는 것이 확인되었다.

난지도 지역에서 이와 같이 benzene이 독자적인 환경기동을 보이는 양상과는 반대로 나머지 VOC 항목들 간에 높은 상관성을 유지하는 현상 등에 대

Table 3. A summary of correlation analysis between VOCs and relevant environmental parameters determined concurrently.

	benzene	toluene	"m,p-xylene"	o-xylene	ethyl
benzene	(213)				
toluene	0.113	(217)			
"m,p-xylene"	0.101	0.612	(212)		
o-xylene	0.043	0.482	0.919	(165)	
ethylbenzene	0.047	0.758	0.868	0.796	(213)
Temp	0.337	0.107	-0.097	-0.042	0.075
UV	0.085	-0.177	-0.079	-0.048	-0.164
RH	0.133	0.174	-0.116	-0.118	0.001
WS	-0.076	-0.196	0.117	0.164	-0.046
O ₃	0.178	-0.185	0.019	0.153	-0.119
NO	-0.100	0.364	0.202	0.136	0.361
NO ₂	-0.175	0.251	0.041	-0.007	0.203
NO _x	-0.131	0.362	0.172	0.108	0.346
SO ₂	-0.134	-0.040	0.063	0.028	0.019
CH ₄	0.045	0.091	-0.111	-0.102	0.108
CO	-0.165	0.197	0.229	0.127	0.175
PM10	-0.074	0.038	0.028	0.089	-0.017

* underline denotes the statistical significance such as P values of less than 0.01

Table 4. A summary of varimax rotated factor analysis VOCs and relevant environmental parameters determined concurrently.

	1	2	3	4	5
benzene		0.201		0.659	-0.327
toluene	0.380	0.776	-0.136	0.158	
"m,p-xylene"		0.969			
o-xylene		0.946			0.115
ethylbenzene	0.174	0.941	-0.113		
Temp			-0.294	0.842	0.147
UV		-0.181	0.670	0.527	0.134
RH	0.148		-0.809		0.180
WS	-0.545		0.498	-0.115	0.269
O ₃	-0.652	0.114	0.111	0.375	0.446
NO	0.894	0.198			
NO ₂	0.810				0.246
NO _x	0.942	0.165			
SO ₂	0.377		0.542		0.412
CH ₄			-0.682	0.348	
CO	0.551	0.144	0.369	-0.403	0.350
PM10					0.912
Total	3.726	3.513	2.410	1.896	1.664
% of Variance	21.919	20.664	14.177	11.153	9.786
Cumulative %	21.919	42.582	56.759	67.912	77.697

해 추가적인 설명을 제시하기 위한 목적으로 발생원들 간에 유용하게 사용되는 요인분석을 수행하였

다. 이러한 분석결과는 동일한 요인을 갖춘 자료군을 구분하고, 자료군내 개별항목에 대해 통계적으로 결정계수를 산출하는 방식으로 진행한다. 요인분석의 결과(표 4)를 살펴본 바에 의하면, VOC 항목 중 benzene을 제외한 항목들이 동일한 요인에 포함되는 것으로 구분되어, 상관분석 내용과 상당수준의 일관성이 발견되었다. 대체로 benzene을 제외한 기타 VOC 성분을 제2요인의 핵심적인 성분들로 구분된 반면, benzene 성분은 독자적으로 4요인의 주 성분으로 구분되었다. 특히 benzene의 경우, 여타 VOC 항목과는 달리 기온, 일사량을 위시한 기상요소와 동일한 요인으로 분류되었다. 이와 같은 benzene의 분포특성이 예외적으로 나타나는 현상은 매우 주목할 만하다. 이처럼 VOC 항목에 차별적으로 미치는 농도조절 요인을 구조적으로 파악하기 위해서는 무엇보다 항목별로 배출과 소멸을 정량적으로 분석할 수 있는 분석화학적 또는 환경화학적 기법의 개발이 필요한 것으로 사료된다. 이미 본 연구진은 이러한 목적의 일환으로 개별 VOC 성분들의 교환특성을 성분별로 비교 분석하는 연구를 시도한 바 있다(김민영 등, 2000).

4. 결 론

대규모 종합 폐기물 매립지역인 난지도는 현재, 미래의 환경생태공원 조성과 도시민의 휴식공간으로의 전환을 위해 투자와 노력이 집중되고 있는 지역이다. 본 연구진은 이러한 노력에 관심을 반영하여 본 연구지역 대기환경의 질적 관리기반과 추후 위해성 평가를 위한 기초자료를 확보하고자 하였다. 특히 매립층 내부에서 진행되는 생화학적 반응으로 인하여 VOC 성분의 대량배출이 예상되는 이 지역에서 진행되는 VOC의 공간적 분포특성과 시간적 변화양상을 모색하고자 하였다. 그 결과 몇 가지 의미 있는 결과를 얻을 수 있었다. 단순히 BTEX의 농도 수준을 과거의 연구결과(인구밀집지역이나 공업단지)들과 비교해 보았을 때 난지도지역에서 발견된 VOC 농도는 상대적으로 낮게 나타났다. 이는 난지도가 지형적으로 개방되어 있으며 높은 고도를 이루고 있기 때문에, 배출이 이루어져더라도 배출성분은 상당히 유동적으로 분포하거나

대기 중에서 확산 및 이류, 화학적 변화와 침적 등이 신속히 이루어진 것으로 사료된다. 배출형태를 살펴보았을 때 측정지점에서 나타난 가장 두드러진 점은 시간규모에 따라 농도분포가 매우 다양하게 나타나는 점을 들 수 있다. 시간적인 경향성을 비교하였을 때도, 이와 같은 특징이 지속적으로 발견되었다. 또한 상관분석(요인분석)의 결과에서도 확인된 바와 같이, benzene이 다른 항목과 구분되는 차별성 등은 매우 주목할 만 것으로 사료된다. 앞으로 난지도지역에 대한 보다 장기적이고 지속적인 측정을 확대 실시함으로써, 이 지역에 대한 배출원별 영향과 특성 등을 파악할 수 있는 기반을 확보하여야 하겠다.

사 사

본 연구의 일부는 한국과학재단이 지원하는 SRC 기후환경시스템 연구센터의 지원을 통해 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

김기현, 백성옥(1998) 대기환경과 휘발성 유기화합물질. 한국대기보전학회 측정분석위원회.
 김민영, 김기현, 이강웅(2001) 미기상학적 기법을 이용한 난지도 매립지에서 방향족 화합물의 Air/Soil 교환량 산정. 한국대기환경학회지(투고 중).
 김민영, 김기현, 이강웅, 신재영(2000) 대기수은의 환경지화학-난지도 지역의 배출과 침적에 대한 고찰. 한국지구과학회지, 21(5), 644-622.
 김조천, 이강웅, 김기현(2000) 서울과 나주의 산림지역을 중심으로 한 환경대기 중 VOC 관측. 한국환경분석학회지, 3, 37-43.
 김조천, 김기현(2000) 대기 중 휘발성 유기화합물의 시간적 농도변화에 대한 연구 - 나주지역의 분포 특성에 대한 비교. 한국환경과학회지, 9(6), 483-488.
 백성옥, 김기현, 손동헌(1998) 대기 중 휘발성 유기화합물의 정의와 환경학적 중요성. 한국대기보전학회, 1, 1-7.
 오상인, 김민영, 김기현(2000) 광투과 방식을 응용한 서울시 반포지역의 VOC 농도 분포 특성에 대한 연구. 한국환경분석학회, 3(4), 229-238.

- 전의찬, 정장표, 김조천, 이학성, 정상진 (1998) VOC의 배출원과 배출량. 한국대기보전학회, 3, 48-89.
- Leach, J., A. Blanch, and A.C. Bianchi (1999) Volatile organic compounds in an urban airborne environment adjacent to a municipal incinerator, waste collection centre and sewage treatment plant. *Atmospheric Environment*, 33, 4309-4325.
- Michael, E.J. and C.C. Kevin (2000) Ozone and other secondary photochemical pollutants: chemical processes governing their formation in the planetary boundary layer. *Atmospheric Environment*, 34, 2499-2527.
- Mukund, R., J.K. Thomas, and W.S. Chester (1996) Source attribution of ambient air toxic and other VOCS in Columbus, Ohio. *Atmospheric Environment*, 30, 3457-3470.
- Na, K. and Y.P. Kim (2001) Seasonal characteristics of ambient volatile organic compounds in Seoul, Korea. *Atmospheric Environment*, 35, 2603-2614.
- Trainer, M., D.D. Parrish, P.D. Goldan, J. Roberts, and F.C. Fehsenfeld (2000) Review of observation-based analysis of the regional factors influencing ozone concentrations. *Atmospheric Environment*, 34, 2045-2061.
- Wiederkehr, P. (1994) Emission reduction programmes for VOC in some OECD countries. *Environmental Science*, 61, 11-28.