

## 배출공을 통한 VOC 성분의 배출규모와 특성에 대한 연구: 난지도지역을 중심으로 한 사례연구

김민영 · 윤중섭 · 조석주 · 김기현\*

서울시 보건환경연구원, \*세종대학교 지구정보과학과

## The emission of VOCs as landfill gas: A case study from Nan-Ji-Do abandoned landfill site

Min-Young Kim, Joong-Sup Yun, Suk-Joo Cho and Ki-Hyun Kim\*

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

\*Dept. of Earth Sciences, Sejong University, Kun Ja Dong 98, Seoul, 143-747, Korea

As part of project to investigate the extent of pollutant exchange in the landfill area, we measured the concentration and flux values of major aromatic VOCs which include benzene, toluene, and xylene(BTX) from Nan-Ji-Do(NJD) landfill site. The concentration and flux values of BTX determined from a total of five ventpipes were showing comparable patterns between the concentration and flux. However, when the data were compared among different ventpipes, the results generally lacked from the consistency in their concentration levels. It was found that the VOC concentration levels of ventpipes are extremely variable with the range of mean values from a few to a few hundred pptv. Interestingly enough, their temporal variability was unexpectedly strong such that the concentration of a given specie from an identical vent can vary over a few orders of magnitude through time. As being highly contrasting with the patterns of major components with strong temporal stability, consideration of the representative figures for the vent system was complicated. If the flux values were computed using the concentration values and exit ventilation speed, the magnitude of emissions from the NJD site is estimated to be 2.9, 47.2, 8.6 ton/yr for benzene, toluene, and xylene, respectively.

**Key words:** VOC, ventpipe, landfill, emission, estimation, Nan-Ji-Do

### 1. 서 론

서울시의 북서부지역에 위치한 매립시설물인 난지도에서는 1979년 3월부터 1993년 12월까지 약 15년의 기간동안 대규모의 매립이 비위생적 방식으로 진행되었다. 난지도의 매립이 종료되고 약 10여년에 가까운 시간이 지난 현시점에는 매립지의 안정화가 상당 수준 이루어진 것으로 알려지고 있다. 그러나 난지도는 비위생적 매립방식이 적용된 초대규모의 매립시설물이라는 점 때문에 여러 가지 잠재적 문제발생의 요인을 내재하고 있다. 따라서 매립장과 관련된 이슈는 환경관련분야의 주요한 화두로 빈번하게 부각되어왔다. 따라서 아

직까지 난지도를 중심으로 토양, 폐기물, 대기분야에 대한 환경오염현상을 분야별로 연구하는 활동이 활발하게 이루어지고 있다. 이와 같은 연구결과들은, 매립시설물을 기점으로 진행되는 여러 가지 주요 오염물질의 유동과 순환을 연구하는데 중요한 단서를 제공할 것으로 기대된다.

매립지의 사후관리적인 측면에서 가장 민감하게 취급되는 부분으로 대기질관리 분야를 지적하지 않을 수 없다. 매립지를 중심으로 일어나는 유해물질의 배출이나 악취발생 등과 같은 대기질변화는 주로 복토면 내부에서 발생한 오염물질이 복토면 상층부로 배출되는 현상 또는 매립층 내부에 유해가스가 축적되는 현상을

\*Corresponding author : khkim@sejong.ac.kr

억제하기 위해 관정의 형태로 설치한 배출공을 통해서 이루어진다.<sup>1)</sup> 전자의 경우, 단위면적당 배출량이 일반 토양에서 이루어지는 수준에서 수 배 또는 수 십배 정도의 차이를 보이는 것이 일반적인 상황이다. 반면 후자의 경우, 배출오염물질들의 농도수준이 일반 대기에서 발견되는 수준의 수십만배에 달할 정도로 초순도를 띠는 것으로 확인되고 있다. 예를 들어, 매립지의 매립층 내부에서 진행되는 다양한 미생물들의 작용으로 인해, 매립층을 관통하는 배출공에서는 약 수 십 %에 달하는 초고순도의  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  등이 배출되는 현상은 많은 연구결과에서 확인되고 있다. 매립시설물의 주요 가스상 배출성분이 탄소화합물이란 점을 감안하면, 일반 대기에서 극미량으로 발견되는 휘발성 유기화합물(VOC)과 같은 성분들도 상당 수준 이상 배출이 이루어질 것으로 예상된다. 이미 본 연구진의 선행연구에서 주요 관측대상으로 설정한 수은(Hg)과 같은 극미량기체의 경우에도, 환경권 대기에서 일반적으로 관측되는 수준보다 약 1,000배 이상의 고농도로 발견된다는 점이 확인된 바 있다.<sup>2)</sup>

본 연구진은 난지도와 같은 매립지에서 배출공을 통해 배출되는 VOC 성분의 배출특성 및 규모를 파악하기 위한 노력의 일환으로, 2000년 9월 20일부터 10월 1일까지 주요 방향성 유기화합물인 BTX를 포함하는 여러 가지 VOC 화합물들에 대한 벤트의 출구 농도 및 벤트를 통해 외기로 배출되는 플럭스량을 산출하였다. 현재까지 이러한 배출시설물을 중심으로 배출실태를 측정하는 연구가 대체로 메탄과 같은 초고순도의 오염물질들에 국한되어 왔다. 따라서 이러한 측정자료는 선례가 드문 연구결과로 간주할 수 있다. 또한 실측자료를 중심으로 산출된 본 연구자료는 이미 모델링 등에 기초하여 추정된 과거의 선행연구들의 결과와 실질적인 비교를 할 수 있는 중요한 기반을 제공할 것이다. 본 연구진은 이들 실측자료를 기초로 난지도 지역의 대기를 중심으로 진행되는 VOC의 대기순환현상을 조절하는 여러 가지 요인들을 검토하고 고찰하고자 하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 관측장소와 시기 및 대상

연구대상지역인 난지도는 서울시 마포구 성산동과 삼암동 일대에 총 면적 823,000평(2.72  $\text{km}^2$ ), 매립높이 해발 94~98m의 규모를 유지하고 있다. 매립내용물은 생활쓰레기, 건설폐자재, 하수슬러지, 산업폐기물 등에

해당하고, 그 매립량을 부피로 환산하면 0.092  $\text{km}^3$  (8.5톤 트럭 1,300만여 대분)에 달하는 수준이다. 비위생 단순매립방식으로 매립이 이루어졌기 때문에 각종 고농도 가스상 오염물질의 생성 또는 배출의 규모가 막대한 수준에 달할 것으로 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 배치되어있다.

이로부터 배출된 가스의 성분조사를 실시한 결과에 의하면, 주로 고농도의 메탄, 탄소화합물, 수분 등이 수 십 % 대에 존재하고, 수은과 같은 중금속 등도 배경대기 농도의 1000배에 육박하는 수준인 것으로 밝혀졌다.<sup>2,3)</sup> 본 연구에서는 매립지 1공구에 위치한 5개의 배출공을 연구대상으로 택하여, 배출공으로부터 배출되는 VOC 성분들의 농도, 배출공의 배가스 배출속도, 온도, 메탄과 이산화탄소를 위시한 주요 가스상 오염물질 등 주요 환경변수를 동시에 측정하였다. 물론 동일한 기간동안 외기 중의 VOC 농도, 주요 기상인자, 수은을 포함하는 극미량 성분의 농도 분포에 대한 측정도 각각의 성분을 측정할 수 있는 기기를 동시에 가동하여 실시하였다. 특히 본 연구의 주소재인 VOC의 배출농도 및 배출 flux에 대한 관측은 앞서 언급한 5개 배출공을 중심으로 2000년 9. 20~10. 1일까지 12일간의 기간동안 실시하였다. 2002년 하기부터 이들 배출공으로 배출되어야 할 가스성분의 효율적인 회수를 위한 목적 등으로 배출공 폐쇄작업이 이루어지고 있다. 따라서 본 연구에서 관측한 배출공으로부터 직접 배출되는 VOC 성분의 농도나 플럭스 자료는 난지도 배출공과 관련된 드문 연구사례로 분류될 것으로 사료된다.

본 연구에서는 benzene, toluene, m, p-xylene과 o-xylene을 포함하는 BTX 성분 외에도 styrene, 1,3,5-trimethylbenzene, 1,2,4-trimethylbenzene의 방향성 화합물과  $\text{C}_1 \sim \text{C}_6$ 에 이르는 14종의 염화탄화수소 화합물을 측정하였다. 이들 중 BTX에 대해서는 각 개별 항목별로 농도분포 특성 등을 세세하게 살펴보았다. BTX를 제외한 항목의 경우, 특히 염화탄화수소물의 경우 GC-FID 시스템이 지닌 제한성으로 인해 해석을 제한하였다. 아울러 관측장소 주변의 대기질 현황을 파악하기 위해 전체 측정기간동안에 8가지 항목( $\text{O}_3$ , NO,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , CO, PM10)과 주요 기상요소를 동시에 관측함으로써 VOC 성분들의 상호 관계를

파악하고 분석하는데 이용하고자 하였다.

## 2.2. 채취와 분석

본 연구에서 사용된 VOC 시료 채취용 튜브는 스테인레스 강 재질의 튜브(90 mm×5 mm ID, Supelco사)에 Cabotrap C<sup>TM</sup>(20/40 mesh), Cabotrap B<sup>TM</sup>(60/80), Carbosieve SIII<sup>TM</sup>(60/80)를 충전한 carbotrap300을 사용하였다. 튜브에 충전한 흡착제의 총량은 300 mg이며, Cabotrap C<sup>TM</sup>은 10 m<sup>2</sup>/g로 약한 강도의 흡착제로서 nC<sub>8</sub>~nC<sub>20</sub> 성분, Cabotrap B<sup>TM</sup>은 100 m<sup>2</sup>/g로 중간강도의 흡착제로서 nC<sub>4</sub>~nC<sub>8</sub>성분, Carbosieve SIII<sup>TM</sup>은 carbon molecular sieve로써 800 m<sup>2</sup>/g로 nC<sub>2</sub>~nC<sub>6</sub>와 같은 휘발성이 큰 성분의 시료에 적용하는 것으로 알려져 있다. 흡착튜브는 사용 전에 열탈착장치(ATD-400, Perkin Elmer사)에서 고순도 질소가스를 분당 50 ml로 통과시키면서 350°C에서 1시간 conditioning을 실시하였다. 대기중의 시료채취는 저유속 정량펌프(ALPHA 2, AMETEK사)를 테프론 관을 이용하여 각각의 흡착 튜브(약한 흡착제가 대기중으로)에 연결한 연속시료 채취 장치(STS-25, Perkin Elmer사)로 실시하였다. 흡입 공기 유량은 50 ml/min 이내로 하여 2시간 단위로 시료를 채취하였다. 펌프는 자동유량조정기(DC-1 Flow Calibrator, BIOS사)를 사용하여 현장에서 교정하였다.

배출공의 끝부분에서 시료를 채취한 흡착튜브를 자동 열탈착시료주입장치(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 default함), 350°C에서 5분간 열탈착한 후, -30°C로 유지되는 Cold trap으로 농축하였다. 다시 300°C에서 5분간 열탈착한 후, 가스크로마토그래피상에서 분리능의 향상을 도모하고 수분의 영향을 줄여주기 위하여 시료를 1:10 분할비(split ratio)로 분할주입하였다. GC을 분석할 경우 retention time(RT)이 조금씩 이동하는 경우가 있는데, 이를 해결하기 위하여 미국의 오존전구물질을 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 표

준가스(39항목 함유)을 1 ppm을 표준가스희석장치(Dynamic Diluter : Model 600, Entech사)를 이용하여 canister에 30 ppb로 희석한 후 이를 흡착튜브에 유량 50 ml/min으로 5, 10, 20분씩 각각 3개씩 흡착농축하여 시료분석 방법과 동일하게 실시하였다. BTX 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. 벤트에서 관측된 BTX 농도 분포의 특성

본 연구가 이루어진 2000년 가을기간의 측정은 9월 20일부터 10월 4일의 기간동안 난지도를 중심으로 여러 가지 미량기체의 농도 및 플럭스에 대한 다양한 연구분석이 집중적으로 이루어졌다. 이 기간동안 관측된 금속성 가스상 성분인 수은의 농도 및 플럭스 관측결과는 이미 선행연구의 결과물로 발표된 바 있다.<sup>2)</sup> 본 연구논문의 주관심대상인 BTX 성분에 대한 벤트내부 및 외부공기의 분석은 9/20~10/1의 제한적인 기간동안 이루어졌다. 동시에 관측이 된 수은의 경우, 난지도 전체에 흩어져 있는 총 106개의 벤트중 42개의 벤트로부터 측정이 이루어졌다. 수은의 경우, 연속측정기를 이용하여 현장에서 즉각적으로 분석되었다. 반면 본연구의 주대상인 BTX의 경우, 현장에서의 채취와 실험실에서의 분석이 각각 독립적으로 이루어졌다. 따라서 연속적으로 시료를 채취하는 것과 관련된 여러 가지 기술적인 제한성으로 인해, 그 측정이 총 5개의 벤트로 제한되었다.

본 연구기간중 채취 분석한 벤트 내부 및 외기의 BTX 성분에 대한 농도 및 벤트로부터 외기로의 플럭스 측정 결과는 Table 1에 제시되었다. BTX의 분석과 동시간대에 관측된 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 등을 포함하는 주요 기체상물질 및 가스의 배출속도, 기온 등을 포함하는 주요 환경변수에 대한 측정의 결과도 Table 2에 요약하였다. 그리고 관측기간 중 외기의 환경변수에 대한 관측결과는 Table 3에 요약하였다. Table 1에 제시된 바와 같이 BTX 성분의 경우, 환경권 대기의 농도와 벤트의 농도간에는 상당한 수준의 차이가 나타난다. 대부분의 표자료에는 BTX뿐만이 아니라 동시에 관측된 Hg의 관측결과도 제공하였다. 이들간에는 많은 물리화

**Table 1.** A statistical summary of BTX concentrations determined for both the ambient air and the exit port of the infiltrated ventpipes.

Vent No.	Statistical parameter	Ambient air				Infiltrated ventpipes							
		Concentration				Concentration				Flux			
		benzene ppb	toluene ppb	m,p-xylene ppb	o-xylene ppb	benzene ppb	toluene ppb	m,p-xylene ppb	o-xylene ppb	F-benzene g yr <sup>-1</sup>	F-toluene g yr <sup>-1</sup>	F-m,p-xylene g yr <sup>-1</sup>	F-o-xylene g yr <sup>-1</sup>
173	Mean ± 1 SD	0.72 ± 0.46	5.60 ± 2.73	0.59 ± 0.44		14.6 ± 43.2	98.8 ± 308	0.16	17.0 ± 50.8	1.15 ± 1.47	6.10 ± 4.47	0.13	16.1 ± 48.5
	Range (N)	0.28~1.77 (12)	0.27~11.3 (12)	0.00~1.40 (12)		0.22~152 (12)	3.58~1078 (12)	(1)	0.14~162 (10)	0.17~4.77 (11)	1.33~15.8 (11)	0.13~0.13 (1)	0.04~154 (10)
	Median (90% CI)	0.64 (0.24)	5.25 (1.41)	0.46 (0.23)		1.35 (22.4)	7.03 (160)	0.16	0.65 (29.4)	0.66 (0.80)	3.92 (2.44)	0.13	0.35 (28.1)
175	Mean ± 1 SD					58.5 ± 111	417 ± 383	13.7 ± 20.7	67.7 ± 64.3	117 ± 263	778 ± 822	31.8 ± 44.6	123 ± 99.7
	Range (N)					4.31~320 (12)	91.6~1431 (12)	1.11~52.1 (6)	15.4~190 (12)	2.21~902 (12)	48.8~2979 (12)	1.06~104 (6)	10.5~289 (12)
	Median (90% CI)					12.4 (57.5)	311 (199)	1.97 (17.1)	29.7 (33.3)	17.6 (136)	545 (426)	6.49 (36.7)	91.8 (51.7)
176	Mean ± 1 SD					25.4 ± 15.0	222 ± 197	19.5 ± 26.3	53.9 ± 89.3	11.9 ± 17.1	136 ± 199	22.3 ± 44.4	29.8 ± 41.5
	Range (N)					3.86~49.2 (10)	6.43~488 (11)	1.67~69.4 (6)	0.39~311 (11)	0.00~59.9 (11)	1.75~683 (11)	0.68~113 (6)	0.12~119 (11)
	Median (90% CI)					28.3 (8.72)	222 (108)	6.68 (21.6)	30.4 (48.8)	8.21 (9.35)	65.0 (109)	3.83 (36.5)	10.2 (22.7)
178	Mean ± 1 SD	1.33 ± 0.90	13.1 ± 7.19	0.91 ± 0.57	0.12 ± 0.06	27.0 ± 8.39	271 ± 90.3	1.30 ± 1.40	54.8 ± 45.1	102 ± 48.1	1182 ± 671	5.10 ± 6.17	252 ± 187
	Range (N)	0.51~3.24 (8)	3.19~22.6 (8)	0.11~1.68 (8)	0.07~0.16 (2)	15.7~41.8 (8)	128~385 (8)	0.31~2.29 (2)	21.5~153 (8)	32.4~199 (8)	573~2660 (8)	0.73~9.46 (2)	71.3~632 (8)
	Median (90% CI)	1.14 (0.60)	16.0 (4.82)	1.07 (0.38)	0.12 (0.28)	27.4 (5.62)	277 (60.5)	1.30 (6.25)	35.9 (30.2)	91.8 (32.2)	1018 (449)	5.10 (27.6)	181 (125)
179	Mean ± 1 SD	0.94 ± 0.49	9.93 ± 6.30	1.32 ± 1.01	0.24 ± 0.22	30.8 ± 51.2	293 ± 245	5.79 ± 5.18	28.8 ± 25.1				
	Range (N)	0.37~1.85 (8)	1.61~17.9 (8)	0.38~2.78 (8)	0.07~0.70 (8)	1.99~173 (10)	11.0~720 (10)	0.49~13.9 (10)	1.68~80.4 (10)				
	Median (90% CI)	0.86 (0.33)	7.80 (4.22)	0.97 (0.68)	0.16 (0.15)	16.5 (29.7)	267 (142)	4.86 (3.01)	34.0 (14.6)				
All vents	Mean ± 1 SD <sup>#</sup>	0.96 ± 0.65	8.99 ± 6.10	0.89 ± 0.72	0.21 ± 0.20	31.8 ± 61.8	259 ± 287	10.4 ± 16.9	45.1 ± 61.1	56.2 ± 148	485 ± 694	22.4 ± 39.2	97.3 ± 133
	Range (N)	0.28~3.24 (28)	0.27~22.6 (28)	0.00~2.78 (28)	0.07~0.70 (10)	0.22~320 (52)	3.58~1431 (53)	0.16~69.4 (25)	0.14~311 (51)	0.00~902 (42)	1.33~2979 (42)	0.13~113 (15)	0.04~632 (41)
	Median (90% CI)	0.72 (0.21)	6.32 (1.96)	0.66 (0.23)	0.16 (0.12)	14.9 (14.4)	204 (66.0)	4.12 (5.80)	28.3 (14.3)	8.63 (38.4)	179 (180)	3.31 (17.8)	41.6 (35.0)

<sup>#</sup>The mean and SD values of all vents are derived by combining all individual datapoints measured from five ventpipes.

**Table 2.** A statistical summary of major parameters determined from infiltrated ventpipes during this study.

vent meteorological		H <sub>2</sub> O %	CH <sub>4</sub> %	CO <sub>2</sub> %	Hg <sub>vent</sub> ng m <sup>-3</sup>	EV* m s <sup>-1</sup>	T <sub>vent</sub> °C
173	Mean ± 1 SD	17.1 ± 4.93	51.4 ± 0.83	23.6 ± 0.38	47.5 ± 11.6	0.34 ± 0.21	26.6 ± 4.27
	Range (N)	11.8~27.3 (12)	50.4~53.0 (12)	23.2~24.3 (12)	26.4~59.7 (11)	0.13~0.82 (12)	20.1~32.7 (12)
	Median (90% CI)	16.4 (2.56)	51.1 (0.43)	23.5 (0.20)	52.2 (6.34)	0.31 (0.11)	26.1 (2.21)
175	Mean ± 1 SD	25.3 ± 2.89	62.2 ± 0.76	29.2 ± 0.20	952 ± 103	0.97 ± 0.65	29.4 ± 6.79
	Range (N)	20.6~30.8 (12)	60.9~63.4 (12)	28.9~29.6 (12)	819~1125 (10)	0.19~2.02 (12)	20.0~353 (12)
	Median (90% CI)	25.5 (1.50)	62.2 (0.39)	29.2 (0.10)	949 (59.6)	0.82 (0.34)	31.8 (3.52)
176	Mean ± 1 SD	13.9 ± 2.52	59.2 ± 1.24	29.5 ± 2.77	307 ± 97.1	0.21 ± 0.16	27.6 ± 6.07
	Range (N)	8.90~17.8 (12)	56.7~60.6 (12)	20.7~30.8 (12)	26.4~387 (11)	0.11~0.68 (12)	22.2~40.1 (12)
	Median (90% CI)	14.3 (1.31)	59.7 (0.65)	30.2 (1.44)	327 (53.1)	0.15 (0.08)	24.3 (3.15)
178	Mean ± 1 SD	13.7 ± 2.83	60.1 ± 1.21	29.1 ± 2.98	845 ± 290	2.11 ± 0.78	38.0 ± 3.54
	Range (N)	9.93~17.9 (8)	57.4~60.9 (8)	21.8~31.0 (8)	378~1110 (8)	0.98~3.39 (8)	32.9~43.8 (8)
	Median (90% CI)	13.7 (1.89)	60.7 (0.81)	30.0 (2.00)	968 (194)	2.22 (0.52)	38.5 (2.37)
179	Mean ± 1 SD				15.6 ± 3.43		
	Range (N)				9.30~19.6 (10)		
	Median (90% CI)				16.1 (1.99)		
All vents	Mean ± 1 SD <sup>#</sup>	17.9 ± 5.88	58.0 ± 4.38	27.7 ± 3.15	407 ± 413	0.80 ± 0.84	29.7 ± 6.69
	Range (N)	8.90~30.8 (44)	50.4~63.4 (44)	20.7~31.0 (44)	9.30~1125 (50)	0.11~3.39 (44)	20.0~43.8 (44)
	Median (90% CI)	16.2 (1.49)	59.9 (1.11)	29.3 (0.80)	324 (97.9)	0.37 (0.21)	30.7 (1.70)

\* denotes exit ventilation speed determined from vent exit.

<sup>#</sup>The mean and SD values of all vents are derived using those mean values computed for each individual vent.

**Table 3.** A statistical summary of basic meteorological parameters and important pollutant species measured concurrently in ambient air during the study period.

## (A) Fundamental meteorological parameters

parameter unit	$T_{amb}$ °C	UV mW cm <sup>-2</sup>	RH %	Wind speed m s <sup>-1</sup>
Mean ± 1 SD	19.7 ± 2.32	0.16 ± 0.24	56.0 ± 8.16	1.84 ± 0.70
Range (N)	17.0~24.0 (10)	0.00~0.78 (54)	38.0~65.0 (10)	0.60~3.20 (54)
Median (90% CI)	19.0 (1.34)	0.00 (0.05)	60.0 (4.73)	1.85 (0.16)

## (B1) Important pollutant species

parameter unit	SO <sub>2</sub> ppb	NO ppb	NO <sub>2</sub> ppb	NO <sub>x</sub> ppb
Mean ± 1 SD	3.58 ± 2.09	34.4 ± 37.3	47.7 ± 16.2	82.0 ± 50.7
Range (N)	1.00~10.0 (50)	2.00~153 (50)	15.0~94.0 (50)	19.0~247 (50)
Median (90% CI)	3.00 (0.50)	16.5 (8.85)	44.5 (3.83)	61.5 (12.0)

## (B2) Important pollutant species

parameter unit	CH <sub>4</sub> ppm	NHMC ppm	THC ppm	O <sub>3</sub> ppb	CO ppm	PM10 μg m <sup>-3</sup>	Hg <sub>amb</sub> μg m <sup>-3</sup>
Mean ± 1 SD	8.79 ± 3.58	0.88 ± 0.47	9.68 ± 3.53	13.6 ± 17.3	1.39 ± 0.99	64.9 ± 29.0	5.28 ± 1.60
Range (N)	3.94~14.5 (12)	0.32~1.81 (12)	4.48~14.9 (12)	0.00~56.0 (50)	0.30~4.00 (53)	19.0~151 (49)	2.98~9.05 (48)
Median (90% CI)	7.91 (1.86)	0.84 (0.25)	8.76 (1.83)	5.00 (4.10)	1.10 (0.23)	54.0 (6.94)	4.88 (0.39)

**Table 4.** The results of correlation analysis between BTX data set and the concurrently determined important environmental parameters from the infiltrated ventpipes of NJD landfill site.

vent parameters		benzene	toluene	m,p-xylene	o-xylene	benzene <sub>flux</sub>	toluene <sub>flux</sub>	m,p-xylene <sub>flux</sub>	o-xylene <sub>flux</sub>	Temp.	WS	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	Hg
benzene	r	1	0.710	0.553	0.313	0.751	0.385	0.240	0.104	0.117	0.148	0.046	0.285	0.166	0.202
	P	.	3.2E-09	4.1E-03	2.9E-02	7.0E-09	1.3E-02	3.9E-01	5.3E-01	4.7E-01	3.6E-01	7.8E-01	7.1E-02	3.0E-01	1.7E-01
toluene	r		1	0.583	0.690	0.737	0.629	0.395	0.350	0.053	0.185	0.155	0.549	0.318	0.360
	P		.	2.2E-03	2.3E-08	1.5E-08	8.4E-06	1.4E-01	2.7E-02	7.4E-01	2.4E-01	3.3E-01	1.7E-04	4.0E-02	1.2E-02
m, p-xylene	r			1	0.348	0.511	0.320	0.722	0.198	-0.192	-0.023	-0.130	0.079	0.133	0.034
	P			.	8.8E-02	5.2E-02	2.5E-01	2.4E-03	4.8E-01	4.9E-01	9.4E-01	6.5E-01	7.8E-01	6.4E-01	8.8E-01
o-xylene	r				1	0.474	0.701	0.638	0.799	0.016	0.028	0.028	0.408	0.311	0.377
	P				.	2.0E-03	4.4E-07	1.1E-02	3.1E-11	9.2E-01	8.6E-01	8.7E-01	8.9E-03	5.1E-02	9.8E-03
benzene <sub>flux</sub>	r					1	0.792	0.514	0.416	-0.199	-0.213	-0.088	0.251	0.091	0.121
	P					.	2.3E-11	5.0E-02	7.7E-03	2.1E-01	1.8E-01	5.8E-01	1.1E-01	5.7E-01	4.7E-01
toluene <sub>flux</sub>	r						1	0.721	0.779	-0.368	-0.293	-0.092	0.357	0.099	0.142
	P						.	2.4E-03	5.5E-10	1.6E-02	6.0E-02	5.6E-01	2.0E-02	5.3E-01	4.0E-01
m, p-xylene <sub>flux</sub>	r							1	0.803	-0.374	-0.342	-0.411	0.038	0.039	-0.260
	P							.	3.1E-04	1.7E-01	2.1E-01	1.3E-01	8.9E-01	8.9E-01	3.9E-01
o-xylene <sub>flux</sub>	r								1	-0.228	-0.215	-0.175	0.193	0.120	0.022
	P								.	1.6E-01	1.8E-01	2.8E-01	2.3E-01	4.6E-01	9.0E-01
Temp.	r									1	0.654	-0.001	0.219	0.316	0.354
	P									.	1.5E-06	1.0E+00	1.5E-01	3.7E-02	2.5E-02
WS	r										1	-0.018	0.411	0.312	0.568
	P										.	9.1E-01	5.5E-03	3.9E-02	1.3E-04
H <sub>2</sub> O	r											1	0.275	0.101	0.410
	P											.	7.1E-02	5.2E-01	8.7E-03
CH <sub>4</sub>	r												1	0.777	0.822
	P												.	5.3E-11	3.8E-13
CO <sub>2</sub>	r													1	0.614
	P													.	2.5E-05
Hg	r														1
	P														.

r and P denote correlation coefficient and the probability of no correlation, respectively.

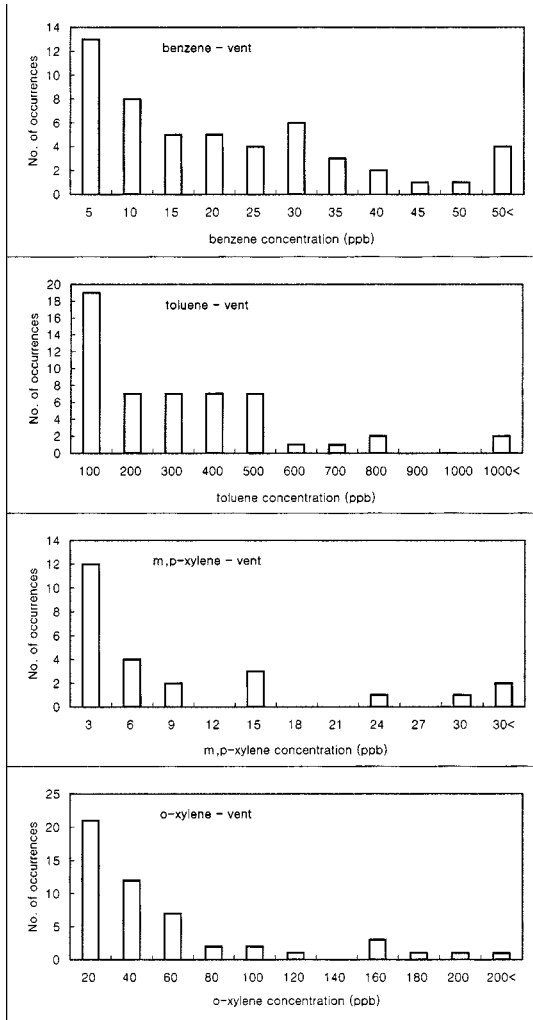


Fig. 1. A plot of frequency distribution pattern of BTX from ventpipes.

학적 특성이 존재하지만, 이들은 본 연구진이 동시에 관측한 극미량성분에 해당한다. 따라서 양 성분에 대한 상호비교가 BTX의 환경거동을 이해하는데도 도움이 될 것이란 전제하에 모든 측정결과를 동일선상에서 비교하고자 하였다. 벤트의 배출구에서 관측한 BTX 농도 자료를 보면, 평균값이 표준편차보다 작을 정도로 자료의 분포가 불규칙하다는 것을 알 수 있다. 반면 외기의 BTX 농도는 비록 근사한 차이일 때가 많지만, 평균값이 표준편차를 일정 수준 또는 미미하게 초과하는 것으로 나타났다. 그리고 외기에서 관측되는 농도는 일반적으로 국내외에서 이루어진 방향족 성분의 농도분포에 대한 연구에서 흔히 발견되는 수 ppb 수준에 가깝

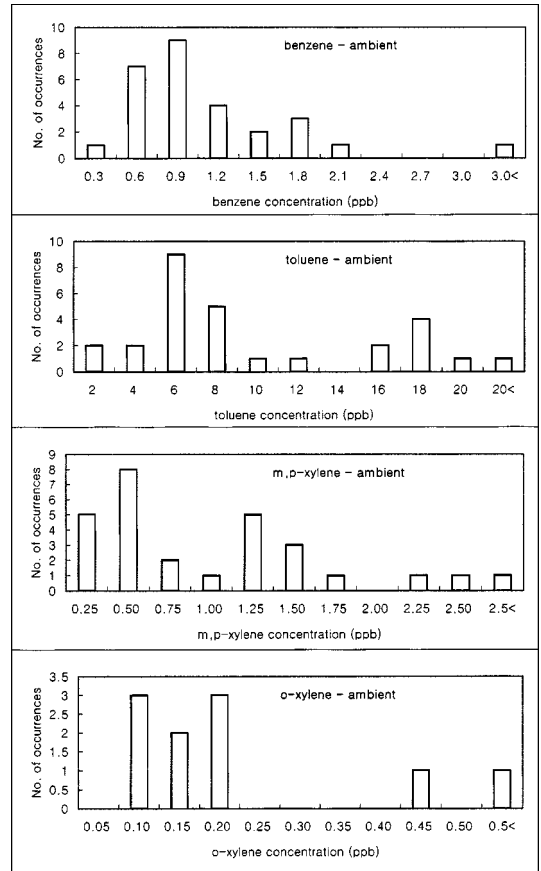


Fig. 2. A plot of frequency distribution pattern of BVTM determined from ambient air.

거나 약간 초과하는 정도로 나타났다.<sup>4-6)</sup> 따라서 관측이 이루어진 벤트나 외기시스템간의 BTX 농도크기 비교는 단순히 평균값을 사용하는 대신 중앙값을 기준으로 활용하였다. 그 결과, benzene, toluene, o-xylene 등의 경우, 이와 같은 차이가 수십배 이상으로 뚜렷하게 구분되는 것으로 나타났다. 반면 m, p-xylene의 경우, 수 배 수준의 차이를 보여서 이와 같은 차이가 상대적으로 가장 미미한 것으로 드러났다. 이러한 차이는 농도와 배출속도를 동시에 감안하여 산출한 플럭스값의 비교에서도 어느 정도 일관성있게 확인된다.

벤트 및 외기에서 관측한 BTX 성분의 발생빈도를 비교하기 위해 빈도분포를 Fig. 1과 2에 각각 제시하였다. 벤트에서 발생한 농도의 빈도분포를 보면, 성분의 차이에 상관없이 저농도대에서 가장 밀집한 발생형태를 취하는 것으로 나타나고 있다. 또한 이러한 경향은 상당히 넓은 영역에 불규칙하게 발생하는 것으로 확인

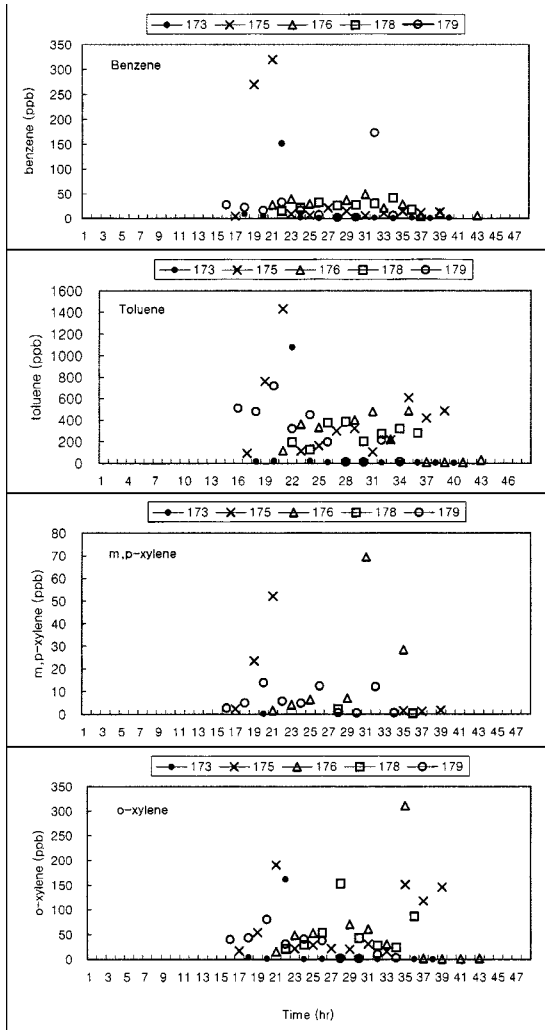


Fig. 3. Comparison of BTX time series from ventpipes. All data from each ventpipe is plotted as a function of time.

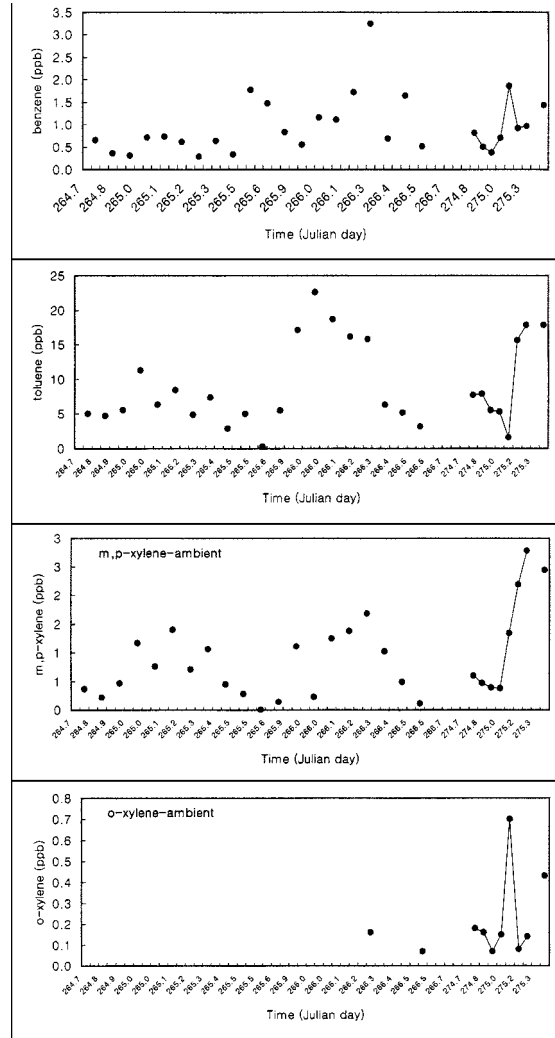


Fig. 4. The BTX data determined from ambient air are compared as a function of time.

되고 있다. 이에 반해 Fig. 2에 나타난 것과 같이 외기의 농도분포는 어느 정도 정규분포와 유사할 정도로 벤트에 비해 훨씬 더 규칙적인 양상을 띠고 있다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 농도분포의 차이는 이미 앞서 통계량의 비교에서 나타난 바와 벤트와 외기가 각각 평균값과 표준편차의 차이가 다르게 나타나는 현상과 연계를 띠며 따른 결과라고 볼 수도 있을 것이다.

### 3.2. 벤트에서 관측된 BTX 농도의 시간적 분포특성

난지도에서 배출되는 BTX의 대표적인 농도값 또는 플럭스값 등을 산출하기 위해서는 공간적 또는 시간적으로 대표성이 높은 자료를 산출하여야 한다. 그런데

본 연구기간 중 BTX에 대한 측정이 단지 5개 벤트에 국한되어 시도되었기 때문에, 현 연구자료를 바탕으로 공간적인 대표성을 확인하는 것은 용이하지 않을 것으로 보인다. 그렇지만 이들 5개 배출공에 대한 관측결과를 비교해 보면, 다음과 같다. 최초의 측정이 이루어진 173번 벤트가 상대적으로 나머지 4개의 벤트에 비해 모든 성분들이 뚜렷하게 낮은 값을 보이는 것으로 나타났다. 반면 나머지 4개의 배출공은 m, p-xylene에서 어느 정도 큰 차이를 보인 것 외에는 대체로 2배 정도 수준의 범위내에서 큰 차이를 보이지는 않았다.

비록 제한된 숫자의 벤트들에 대해 제한적으로 연구가 시도되었지만, 그 측정결과들은 대부분 단순히 1, 2

회의 측정이 아니라, 24시간 또는 그 이상의 수준으로 이루어졌다. 따라서 이들 자료들은 시간적 경향성에 대한 분석 또는 평가에 용이하게 활용될 수 있다. 먼저 Table 2에 나타난 바와 같이 이산화탄소나 메탄과 같은 주요 가스상 성분들의 경우, 평균에 대비하여 그 크기가 작은 표준편차값에서 확인할 수 있듯이, 거의 모든 벤트에서 시간적 농도변화의 정도가 미미한 수준이란 것을 짐작할 수 있다. 즉 이산화탄소나 메탄의 농도는 대부분의 벤트에서 거의 시간적 변화가 없이 일정한 수준으로 유지되었으리라는 것을 알 수 있다. 이에 반해 BTX의 경우, 확연하게 다른 경향성을 보여 주었다. 이미 농도의 평균과 표준편차 값에 대한 비교에서도 그와 같은 가능성이 확인되었지만, Fig. 3에 제시한 시간적 분포의 변화에서도 뚜렷하게 확인이 된다. 동시간대에 외기에서 관측된 BTX의 농도는 Fig. 4에 제시되었다. Fig. 3과 4의 벤트 내외부에서 발견되는 농도분포의 시간적 변화경향의 비교결과도 양 시스템간의 농도차가 현저하다는 것을 확인시켜 주고 있다.

Fig. 3의 결과를 보면, BTX 성분의 농도분포 변화는 극도로 불안정하다. 각기 다른 벤트간에서 다른 차원의 농도가 발견되는 것은 차치하고, 동일한 벤트내에서도 그 농도수준의 변화가 극심하다는 것을 확인할 수 있다. 예를 들어, benzene과 같은 성분의 농도분포비교 결과를 보기 위해 175번 벤트의 결과를 보면, 초기에 수 ppb대의 농도, 중기에 수 백 ppb, 다시 말기에 수 ppb대로 회귀하는 등 대단히 복잡한 양상을 보여 준다. 이와 같이 복잡한 경향성에 어느 정도의 수준의 차이를 인정할 수 있겠지만, 극심한 농도분포의 변화는 거의 대부분의 성분에서 확인할 수 있다. BTX의 복잡한 시간적 경향성은 과거에 선행연구를 통해 여타 성분들에서 이미 관측한 결과들과는 상당한 차이를 보인다. 앞서 제시한 것과 같이 메탄 등의 주성분은 시간적 변화가 거의 미미한 수준에서 발견이 된다. 또한 수은과 같은 미량성분의 경우, 어느 정도 변동성은 보이지만 그 정도가 대체로 수 배 수준을 초과하지는 않는 것으로 나타났다.<sup>2)</sup> 또한 외기환경에서 BTX 성분들이 어느 정도 규칙적인 일주기분포를 띤다는 점과도 상당한 차이를 보인다.<sup>7,8)</sup> 이를 감안하면 BTX의 경우 대단히 불안정한 경향성을 유지한다고 결론지을 수 있을 것으로 보인다.

Fig. 4에는 벤트에서 관측되는 BTX의 농도가 어떤 요인에 의해 조절되는가를 파악하기 위한 한 가지 방편으로 상관분석을 실시한 결과를 제공하고 있다. 이들 비교분석의 결과에 의하면, 대부분의 VOC 성분들간에는

어느 정도 강약의 차이에도 불구하고, 높은 상관성을 유지하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 반면에 이들과 주요 환경변수들과의 관계는 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 예를 들어 benzene이나 toluene의 경우, 상호간의 관계는 물론 배출속도나 기온과 같은 변수들과 비교적 높은 상관성을 유지하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 xylene류의 경우, 이러한 경향성을 찾아 보기가 용이하지 않다. 이런 결과를 감안하면, 벤트와 같이 고농축된 VOC를 배출하는 시설물에서도 배출이 이루어지는 동안(benzene이나 toluene 류에 대비하여) xylene 류의 분포특성을 결정짓는 요인의 성격이 상당한 차이를 유지하고 있지 않은가 추정된다. 따라서 전반적으로 이러한 차이를 설명할 수 있는 노력이 기울어져야겠다.

### 3.3. 벤트를 통한 BTX의 배출규모 및 배출특성에 대한 분석

난지도와 같은 매립지에서 이루어지는 BTX의 배출은 주로 벤트를 통하여 이루어지거나 또는 복토층의 표면으로부터 대기로 이루어지는 부분으로 구분할 수 있을 것이다. 대체로 대부분의 벤트에서 고농도의 오염물질이 검출되는 현실을 감안할 때, 이들로부터 이루어지는 배출량의 규모를 객관적으로 파악하는 노력은 면오염원인 난지도의 실질적인 배출량을 산정하는데 가장 기본적인 정보를 제공할 수 있다. 일단 Table 1에는 벤트별로 관측된 농도와 배출가스의 배출속도를 감안하여, 계산된 배출 플럭스량의 통계치를 제공하였다. 각각의 플럭스는 김기현 등<sup>3)</sup>에서 접근한 바와 같이 다음의 방식으로 계산하였다. 우선 개별 배출공으로부터 배출되는 배출가스(landfilled gas: 이하 LFG)의 양을 벤트의 입구에서 관측된 배출가스의 배출속도와 개별 벤트의 내부 용적을 동시에 감안하여 산출하였다. 일차적으로 배출공의 부피를 산출하기 위해, 배출공의 높이는 일반적으로 평지면의 관정에 사용된 60 m로 설정하였다. 배출공의 높이를 배출속도로 나누어주면, 배출공의 부피에 해당하는 배출가스가 1회 배출되는데 소요되는 시간을 산출할 수 있다. 즉 이렇게 계산된 소요시간 동안 개별 배출공의 내부 용적에 해당하는 용적만큼의 배출가스가 한 번 배출이 이루어진다고 볼 수 있다. 따라서 이들 벤트의 경우, 동시에 관측된 기온조건으로 보정해주면, 연간단위로 배출되는 배출가스의 양(landfilled gas: LFG-m<sup>3</sup>/yr)을 추정할 수 있다. 최종적으로 각각의 벤트를 대표하는 농도값을 산출된 LFG에

곱해 주면, 개별 벤트에 대한 각 성분의 연간단위별 배출량을 산출할 수 있다.

개별 벤트를 통해 배출되는 BTX의 양을 산정하려면, 개별적으로 2시간여 간격마다 측정된 이들 성분의 농도자료와 배출속도 등에 대한 정보를 가하면 구할 수 있다. 이와 같은 사실에 바탕하여, Table 1에는 측정이 이루어진 5개의 벤트 각각에 대해, 각 BTX 성분의 연간단위별 배출량 등에 대한 계산결과를 제시하였다. 플럭스값을 계산한 결과를 보면, 173번 벤트의 경우, 농도에서 나타난 경향과 유사하게 가장 작은 값을 일관성있게 보여 준다. 그리고 이들 결과는 성분별로 또는 벤트별로 대단히 복잡한 양상을 띠는 것으로 나타났으나, 그 크기는 농도값의 결과와 어느 정도 유사하게 toluene이 가장 크고 그 뒤를 o-xylene이나 benzene 등의 순서로 나타냈다.

기존에 발표된 배출량과 관련된 자료는 주로 모델링에 기초하여 이루어졌다.<sup>9)</sup> 따라서 본 연구에서처럼 실측에 바탕한 평가는 그러한 자료들의 신뢰성에 대한 객관적인 검증의 기회를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 실측중심의 배출량 산정을 확대해 가면, 단순히 난지도 규모의 오염원들에 대한 정보의 체계적인 축적을 벗어나, 보다 광역적으로 산재한 매립시설물의 개발, 관리, 유지 등에 필요한 정보를 제공할 수 있을 것이다. 그런데 난지도를 대표하는 BTX의 배출규모를 산출하기 위해서는 여러 가지 사항의 고려가 필요하다. 특히 위에서 이미 소개한 바와 같이, 본 연구에서는 관측이 된 벤트 수가 5개에 국한되었다는 제한적인 요인을 감안하지 않을 수 없다. 그런데 거의 예외없이 벤트에서 관측된 BTX의 경우, 표준편차가 평균값을 초과할 정도로 자료의 분포가 대단히 복잡하다는 점 등도 확인되었다. 그래서 본 연구진은 난지도 전체 규모에서 배출되는 BTX 성분의 양을 정량적으로 파악하기 위한 한 가지 접근방식으로 김기현 등<sup>3)</sup>에 의해 제시된 방법을 어느 정도 변형하는 방식을 이용해 보았다.

일단 과거에 김기현 등<sup>3)</sup>은 상당수의 벤트에 대한 측정을 토대로 (총 106개 벤트중 40여 군데 이상의 벤트를 검사함), 각 권역을 대표할 수 있는 수은의 농도나 플럭스값을 산출한 바 있다. 그런데 현재 자료의 경우, 극도로 제한적인 숫자의 벤트만에 대해 측정되어서, 난지도 전체를 대표할 수 있는 (또는 그에 근접한) 자료를 산출하는 것은 쉽지 않다. 따라서 이를 풀기 위해 단순히 공구별 또는 경사도별로 구분하는 접근방식 대

신, 다음과 같이 총배출량을 산정하였다. 우선 김기현 등<sup>3)</sup>은 수은의 배출규모와 관련된 연구에서 약 40여개의 벤트로부터 측정된 자료에 기초하여, 난지도 전체의 배출공을 통해 배출되는 배출가스(LFG)의 연간 배출의 총량 규모가 대략 2000년도 시점을 기준으로 0.62억 m<sup>3</sup>의 규모라고 계산하였다. 그리고 모든 벤트에서 배출되는 BTX 농도분포의 대표값은 자료의 변이성이 크다는 점을 감안하여, 각각의 개별 성분에 대한 모든 관측치로부터 구한 중간값을 이용하였다. 예를 들어, Table 1의 중간부분, 즉 벤트를 통해 배출된 BTX 성분에 대한 전체자료로부터 구한 중간값들 (예를 들어, benzene은 14.9 ppb, toluene은 204 ppb 등)이 난지도를 대표하는 숫자로 간주하였다. 따라서 이렇게 산정된 LFG의 연간 배출량과 개별성분의 대표 농도값을 이용하여, 각 성분이 난지도 전체에서 연간단위로 얼마만큼 배출되는가를 계산한 결과는 다음과 같다: benzene 2.9, toluene 47.2, xylene 8.6 ton/yr. 이와 같은 결과는 LAEEM과 같은 모델을 이용하여, 측정이 이루어진 2000년도를 기준으로 산출한 이들의 배출량(benzene 16.4, toluene 287, xylene 24.2 ton/yr)과 대략 3~6배 정도의 차이가 있다는 점을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구진은 난지도의 벤트에서 배출되는 오염물질인 휘발성 유기화합물, 그 중에서도 방향족을 대표할 수 있는 BTX 성분의 농도 및 플럭스에 대한 관측을 시도하였다. 그 연구결과에 의하면, 과거 모델링을 이용하여 추정된 이들 성분의 배출규모보다 약 5~6배 작은 수준이라는 것을 확인할 수 있었다. 물론 이러한 결과는 본 연구와 유사하게 수은을 이용하여 벤트에서 배출되는 수은의 규모를 (실측치 중심의 결과와 모델계산의 결과를) 비교한 연구에서도 일관성있게 확인된 바 있다.

모델계산이 본 연구진의 실측값과 수배 범위의 차이를 보이는 원인은 여러 가지 관점에서 제시할 수 있다. 모델계산의 불확실성, 특히 배출계수 등의 조건이 모두 미국식 기준으로 잡혔다는 점과 같이 근본적인 요인을 우선적으로 제시할 수 있다. 그 외에도 난지도는 현재 상당 수준 안정화가 이루어지고 있기 때문에 모델링의 결과로부터 이러한 시간적 요인의 변화 등을 의심할 때, 여러 가지 오차요인이 간여될 수도 있을 것이다. 중요한 사실은 본 연구와 같이 실측 중심의 배출규모에 대

한 자료의 제시가 보다 사실적이고 객관성이 크다는 점을 감안하여, 국내의 실정에 맞는 배출계수 등의 계량화 및 객관화를 위해서는 이러한 연구를 보다 더 확대할 필요성이 크다.

### 감사의 글

본 연구의 일부는 환경부가 주관하는 차세대과제의 지원에 의하여 연구되었습니다.

### 참고문헌

- 1) Kim K.-H., Kim M. Y. and Lee G., *Atmospheric Environment*, **2001**, 35(20), 3475-3493.
- 2) 김민영, 김기현, 조석주, *한국대기환경학회지*, **2001**, 17(4), 299-312.
- 3) 김기현, 김민영, 어수미, 투고중, 난지도 매립장을 중심으로 한 메탄과 이산화탄소의 배출규모 및 배출특성에 대한 연구: 실측자료와 모델링자료의 비교연구. *한국환경분석학회지*.
- 4) Yamamoto, N., Okayasu, H., Murayama, S., Mori, S., Hunahashi, K., Suzuki, K., *Atmospheric Environment*, **2000**, 34, 4441-4446.
- 5) Derwent, R.G., Davies, T.J., Delaney, M., Dollard, G.J., Field, R.A., Dumitrescu, P., Nason, P.D., Jones, B.M.R., Pepler, S.A., *Atmospheric Environment*, **2000**, 34, 297-312.
- 6) Na, K. and Y. P. Kim, *Atmospheric Environment*, **2001**, 35, 2603-2614.
- 7) Rappengluck, B. and Fabian, P., *Atmospheric Environment*, **1999**, 33, 3843-3857.
- 8) 김조천, 이강웅, 김기현, *한국환경분석학회지*, **2000**, 3, 37~43.
- 9) 장영기, 서영배, *한국대기환경학회지*, **1998**, 14(5), 499-505.