

매립장의 배출가스 중 VOC 성분의 조성과 배출규모: 경산시의 소규모 매립장에 대한 연구

김기현[†] · 오상인 · 최여진 · 선우 영¹ · 주도원²

세종대학교 지구환경과학과, ¹건국대 환경공학과, ²동신대 환경공학과, ITC 21

VOCs as Landfill Gas (LFG) from a Small-scale Landfill Site in Kyung San City

Ki-Hyun Kim[†], Sang-In Oh, Ye-Jin Choi, Sunwoo Young¹ and Do Weon Ju²

Dept. of Earth & Environmental Sciences, Sejong University, Kun Ja Dong 98, Seoul, Korea

¹Dept. of Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea, ²ITC21, Sung Nam, Korea

The concentrations of VOCs were determined from samples collected as both landfill gas (LFG) and ambient air from a small-scale municipal landfill site in Kyung San (KS) city, Korea. Using our measurement data of so-called BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, m,p-xylene, and o-xylene), we analyzed the distribution and behavior of major aromatic components present as LFG. In addition, the VOC flux values were also derived to evaluate the absolute magnitude of emission in the study area. To assess both absolute and relative contribution of individual VOCs to the total carbon budget of LFG, the concentration and flux values of individual species were compared against major parameters investigated to represent non-methane hydrocarbons (NMHC), methane, carbon dioxide, etc. According to our study, the VOC levels in these LFG samples were only several times higher than the values measured in air above landfill surface. However, these LFG-contained VOC levels are unusually low relative to values typically from other landfill sites investigated previously. The LFG flux values for BTEX and NMHC in the study area were estimated to be 4.56 kg C yr⁻¹ and 4.8 ton C yr⁻¹, respectively.

Key words: VOC, ventpipe, landfill, emission, estimation, small-scale landfill

1. 서 론

휘발성 유기화합물(volatile organic compounds: VOC(s))의 환경학적 중요성은 많은 과학자들에 의해 밝혀지고 있다. 특히 공기중에 존재하는 VOC는 질소산화물과 함께 광화학적 반응을 통해, 오존과 같은 2차 오염물질을 생성하는 역할을 하기 때문에, 대기질 관리에 중요한 과제로 대두되고 있다.¹⁾ 이들 VOC는 여타 일반적인 오염물질과 같이, 자연적 및 인위적 기원으로 발생하나, 이들의 조성 및 규모 등은 배출원의 특성에 따라 대단히 다양한 형태를 취하기도 한다.²⁾

VOC를 배출하는 여러 가지 배출원 중에서, 폐기물 처리의 주요 수단으로 활용되는 매립장 및 관련 시설

물은 여러 가지 관점에서 주목을 받고 있다. 특히 매립장 내부의 폐기물들은 매립기간 중은 물론이고, 매립종료 후에도 상당 기간에 걸쳐(여러 가지 생지화학적 과정을 통해), 주요 온실기체 성분들과 함께 다양한 오염물질들을 생성하고 배출하기 때문에, 주변 환경에 여러 가지 오염문제를 야기할 수 있는 잠재적인 오염원으로 기능할 수 있다. 따라서 매립과정 및 종료 후의 시점에도, 이들 시설물에 대한 지속적인 관리가 필요하다. 본 연구진은 매립장 시설물로부터 VOC의 배출특성, 배출규모, 배출계수 등을 추정하기 위한 기본적인 자료를 확보하기 위하여 지속적으로 매립장 환경 내의 VOC성분을 관측하였다. 1차적으로 2000년 가을철, 서울시에 소재한 대규모 위생매립시설물인 난지도 지역

[†]Corresponding author: khkim@sejong.ac.kr

의 배출공에 대한 VOC의 조성을 분석하였다.³⁾ 2차적으로 2002년 겨울기간 중 광주광역시 운정동에 위치한 중규모의 위생매립장 지역을 중심으로 이와 같은 연구를 연장하였다. 그리고 본 연구에서는 이러한 연구목적의 연장선상에서 2003년 1월 기간 중 경북 경산시 삼풍동에 위치한 소규모 생활폐기물 매립장을 중심으로 VOC의 조성을 분석하였다. 본 연구에서는 경산시 관측 자료를 중심으로 연구결과와의 비교를 유도하고, 이를 토대로 매립장 환경에서 VOC의 배출특성을 설명하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1. 연구지점의 특성

본 연구의 대상은 경북 경산시 삼풍동에 위치한 생활폐기물 매립시설물로서, 총면적 29,754 m²(9,019평)와 총매립 용적 165,623 m³의 규모로 조성되었다(Fig. 1). 참고로 본 연구대상지역은 면적을 기준으로 볼 때, 서울시의 대규모 비위생 매립시설물인 난지도의 1/100 규모에 해당하는 소규모 매립시설로 간주할 수 있다. 본 시설물에 대한 매립은 총 세 차례에 걸쳐 각각 독자적인 방식으로 매립되었다. 최초 매립 시기인 1989년 9월부터 1992년 12월 31일까지는(서울시 난지도 매립방법

과 유사하게) 단순한 투기방식으로 혐기성 매립이 완료되었다. 2차 매립은 1993년 1월 1일부터 1997년 6월 30일까지 혐기성 위생매립방법으로 매립이 완료되었다. 마지막으로 1998년 9월부터 본 연구조사의 시점인 2003년 1월 중순 시점까지는 3차 매립이 진행되고 있는 상황이다. 현재의 매립방식은 준호기성 위생매립방법을 적용하고 있다.

2002년도를 기준으로 일단위 매립량은 평균 2.5톤으로 추정되며, 매립된 지역에 대한 복토는 일일 15 cm 씩 진행하고, 최종단계에서 1.7~2m의 높이로 종료하였다.

매립장으로부터 생성된 가스를 배출하기 위해, 내경 30 cm, 지표면으로부터 1m 정도의 높이를 유지하는 배출공을 전체 지역에 24개를 설치하였다.

2.2. VOC 시료의 채취

본 연구에서는 배출공으로부터 직접 배출되는 VOC의 농도를 관측하고, 이를 이용하여 이들 성분들의 배출량을 추정하고자 하였다. 이러한 목적을 달성하기 위해, 배출공의 배출농도에 대한 관측을 위주로 실시하고 이에 덧붙여 외기 중의 농도도 부분적으로 분석하였다. 이러한 연구는 김기현 등⁴⁾의 선행연구방식과 같이 단계적인 수순으로 접근하였다. 1차적으로 현장에서 테들러 백 및 흡착관 등을 이용하여 배출공 및 대기시료를 집중적으로 채취하고(2003년 1월 14일), 2차적으로 현장에서 채취한 이들 시료를 실험실에서 수일간 지속적으로 분석하였다.

배출공으로부터 VOC 시료의 채취는 매립 시기와 방법에 따라 3개 영역으로 구분되는 매립공구별로 적절하게 시료채취 대상을 설정한 후 시도하였다. 제 1매립공구와 2매립공구에서는 각각 3개와 5개의 배출공을 택하였으며, 3매립공구에서는 2개의 배출공을 선택하여 시료를 채취하였다. 배출공으로부터 시료의 채취에는 대부분의 VOC 성분들이 고농도로 존재할 것이라는 가정 하에, 저농도 시료의 분석에 주로 활용하는 흡착튜브 대신, 3리터 또는 10리터 용적의 테들러 백을 사용하였다. 이들 백은 핸드샘플러에 연결하여 샘플러의 최고 가동유속인 약 1 L/min 대에서 채취하였다. 이 때 시료의 채취를 위해 여러 가지 주의를 기울였다. 특히 실험실에서 행한 선행 비교관측의 결과에 의하면, 채취 유속이 최고유속에 가까울수록 샘플러의 사용에 따른 블랭크 농도의 증가를 미미한 수준으로 유지할 수 있다는 점을 확인하였다. 이를 감안하여, 항상 핸드샘플러의 최고 가동유속에서 시료의 채취를 시도하였다. 배

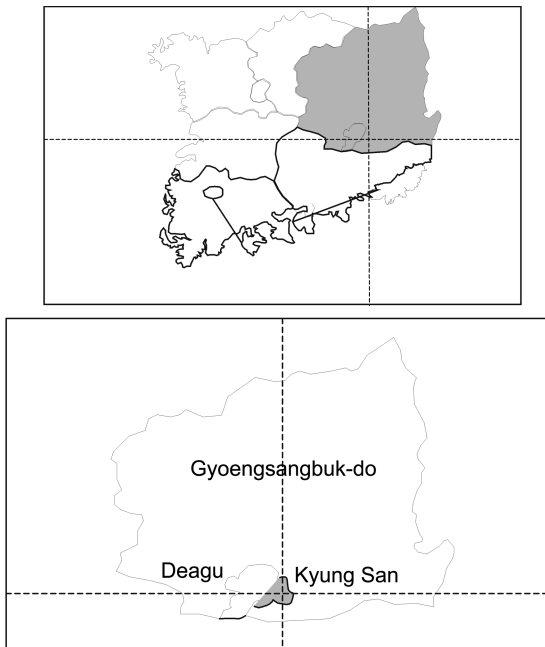


Fig. 1. A geographical location of Kyung-San landfill site investigated in this study.

출공으로부터 배출되는 VOC 성분들에 대한 채취와 동시에 배출량을 산정하기 위하여, 배출가스의 배출속도, 온도 등의 주요 환경변수를 동시에 측정하였다. 배출공에 대한 시료채취와 동시에, 매립장 상부의 대기에 대한 시료채취도 동시에 수행하였다. 시료의 채취는 매립장의 입구와 내부 소각로가 인접한 두 지점에서(배출공에 대한 시료채취방식과 동일하게) 테들러백을 이용하였다. 그리고 추가적으로 흡착관을 이용한 시료채취도 비교목적으로 동시에 수행하였다.

2.3. 시료의 분석

본 연구에서는 앞서 본 연구진의 선행연구와 거의 유사한 방식으로, 매립지 환경에 존재하는 VOC 성분을 정량적으로 관측하기 위해, 배출공으로부터 배출되는 가스(이하에서는 landfill gas의 약어로 LFG로 표기) 내의 VOC 성분에 대한 분석에 주력하였다.

그리고 추가적으로 지표면으로부터 발생하는 VOC 양을 추정하기 위하여, 상부 대기 중의 농도도 일부 관측하였다.

배출공 및 환경대기 중의 모든 시료는 GC-FID(도남 인스트루먼트)와 열탈착 전용기(Unity, Markes, Inc)를 조합한 극미량 분석채취시스템을 활용하였다. 테들러백을 이용하여 채취한 시료는 전술한 열탈착 전용기 내부에 장착된 흡입펌프와 MFC(Mass Flow Controller)를 통해 일정한 유량(23.5 ml/min)으로 10분간 열탈착 전용기 내부로 주입시키고, 주입된 시료는 -10°C 로 유지되는 cold trap에 focusing하였다.

이렇게 focusing한 시료는 열탈착과정(330°C 에서 5분간)을 거친 후, GC(Gas chromatography) column (BP-1, $60\text{ m} \times 0.32\text{ mm}$, SGE사 제조)으로 주입하여 최종적인 성분 분석을 수행하였다. 본 연구에서 VOC의 분석 방식은 광주지역을 대상으로 한 본 연구진의 선행연구(4)와 상당히 다른 접근방식을 이용하였다. 선행연구의 경우, 배출공의 VOC가 수 ppm을 초과할 정도로 극단적인 고농도가 빈번하게 나타나는 점을 감안하여, 배출공시료는 고농도 시료의 분석에 적합한 GC-PID에 의존하고, 환경대기의 농도는 일반적으로 극미량 성분의 분석에 적합한 GC-FID방식을 준용하였다. 그러나 본 연구에서는 배출공의 농도가 매립장 내 환경대기에서 발견되는 수준의 수 배 또는 수 십배 수준으로 낮게 나타나, 모든 시료의 분석을 GC-FID방식으로 단일화하였다.

본 연구에서 BTEX의 검량은 각 성분을 10, 20, 40

ng 함유하는 1 ml의 액상표준시료를 gravimetric 방식으로 준비한 후, 작업용 표준 시료(working standard)로 사용하였다. 동일 시료를 반복분석하여, 상대표준오차를 산출하면, 정밀도는 약 9% 이하를 유지하는 것으로 나타났다. 본 분석시스템의 정확도는 TO-14 표준가스 등을 이용하여 비교분석한 결과, 5% 내외로 확인되었다. 절대량을 기준으로 할 때, 본 연구에 활용된 GC-FID 시스템은 benzene을 기준으로 대략 0.1 ng 수준의 검출한계를 유지하였다. 배출공 및 매립지 상부의 일반대기 중에서 채취한 모든 시료 72시간 이내에 분석하였다. 한편 배출공으로부터 채취한 모든 시료들에 대해서는 추가적으로 휴대용 불꽃이온화 검출기(MicroFID, Markes사, UK)를 이용하여 CH_4 , 총탄화수소(total hydrocarbons: THC), 비메탄계 탄화수소(non-methane hydrocarbons: NMHC-THC와 CH_4 농도의 차이로 계산), CO_2 등을 위시한 탄소성분들에 대한 측정도 동시에 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. LFG의 주요 성분으로서 VOC의 농도분포 특성

본 연구기간 중 기상조건은 $6.1 \pm 2.3^{\circ}\text{C}$ (범위: $2 \sim 10^{\circ}\text{C}$)로 다소 포근한 겨울철 기온과 $1.2 \pm 0.5\text{ m/sec}$ 의 풍속을 유지하였다. 본 연구의 주관심대상인 배출공에 대한 VOC성분의 분석은 매립장 전체에 흩어져 있는 총 24개의 배출공 중 10개를 대상으로 택하여 집중적으로 이루어졌다. 개별 배출공의 농도분포 변이 특성을 이해하기 위해, Fig. 2에서는 이들의 농도를 배출공에 지정된 임의 번호의 함수형태로 표기해 보았다. 그리고 개별 배출공에 대한 농도분석결과는 대부분의 배출공에서 거의 규칙적으로 분석이 이루어진 BTEX와 CH_4 , NMHC, CO_2 , O_2 를 중심으로 Table 1에 제시하였다. 그리고 각각의 배출공에서 VOC 성분의 채취와 동시에 가스의 배출속도와 기온에 대한 관측도 수행하였다. 이에 대한 관측결과도 Table 1에 요약하였다. Fig. 2의 분석 결과에 따르면, 모든 비교대상 성분들이 거의 유사한 범위에 존재한다는 사실을 보여주었다. 개별 배출공에서 배출되는 오염물질들의 절대적 및 상대적 농도 수준이 비교적 균질하게 유지된다는 사실은 이미 김민영 등⁵⁾이 수은과 같은 유해성 오염물질의 LFG 농도분포에 대한 선행연구에서도 확인된 바 있다.

본 연구에서는 LFG의 형태로 배출되는 VOC 성분의 분석에 주력하였다. 그러나 이들의 조성 및 순환을

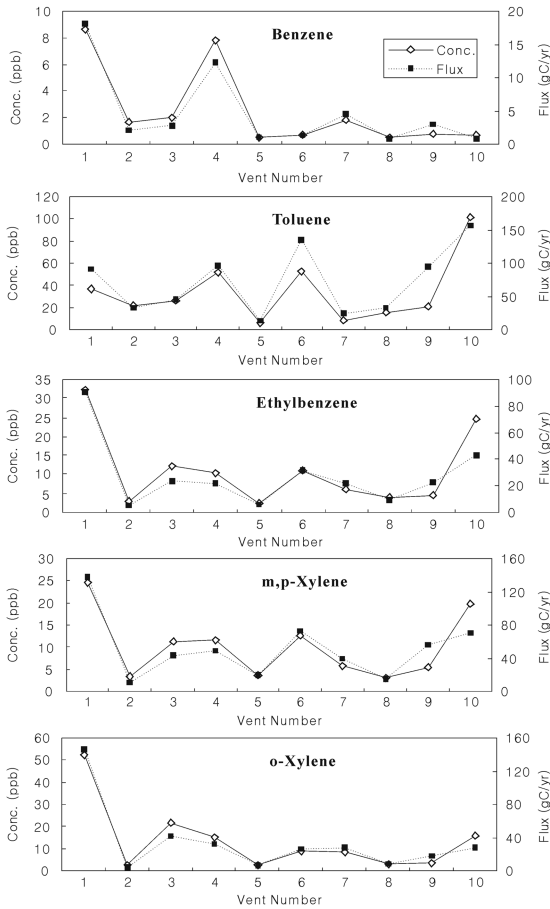


Fig. 2. Comparison of LFG concentration of major aromatic VOCs as a function of vent number.

설명하기 위해서는 매립장 내 상부 대기 중의 농도와 LFG의 조성간에 어떠한 관계를 형성하는 가를 확인하는 것도 대단히 중요하다. 이를 위해, 시료 채취기간 중 3차례에 걸쳐 매립장 입구지역과 내부 소각시설 주변에서 각각 대기질 시료를 채취하고 분석하였다. 이들에 대한 분석결과도 Table 1의 하단에 제시하였다. 그 결과 이들 상층 대기 중의 농도는 매립장 내 소각장 지역의 농도가 매립장 입구에서 관측한 결과보다, 항목에 따라 1.2~7배 가량 높은 것으로 나타났다. 실제로 이들의 농도수준은 김민영 등³⁾이 조사한 서울시 난지도지역의 BTX 농도분포와 유사한 수준으로 나타났다.

배출공에서 관측한 VOC성분의 농도를 과거 연구의 결과와 비교해 보면, 연구대상별로 이들 성분의 농도가 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 참고로 Table 2에 제시된 연구 대상지역의 방향족 성분의 농도는 최근에 김기현 등⁴⁾이 분석한 광주광역시 매립장의 배출공에서 관측한 농도에 비해 대략 100~300배 정도 낮은 농도로 나타났다.

예를 들어, 가장 작은 차이가 나타나는 벤젠의 경우, 경산과 광주 지역이 각각 2.5 ppb와 234 ppb 수준으로 나타났다. 반면 가장 큰 차이를 보이는 톨루엔의 경우, 광주에서 10 ppm을 초과하는 고농도인데 반해, 경산에서는 34 ppb 수준으로 나타났다. 이러한 분석결과에 따르면, 매립장간 VOC농도 수준에 상당한 차이가 존재할 수 있다는 것을 보여 준다. 이러한 결과는 매립장의

Table 1. The results of LFG analysis for aromatic VOCs in Kyung-San landfill site: Data for individual ventpipes. (A) VOCs in landfill gas

Sampling Date	Time	Vent No.	Temp (°C)	Velocity (m/s)	Aromatic VOCs in ppb unit					Major gases in ppm unit			
					BEN	TOL	EB	MPX	OX	NMHC	CH ₄	CO ₂	O ₂
03-1-14	15:58	1	11	0.32	8.62	37.4	32.3	24.5	52.0	3240	94110	134000	84000
03-1-14	16:11	2	10	0.19	1.69	22.5	3.05	3.43	2.68	1072	11712	34000	174000
03-1-14	16:17	3	8	0.22	1.99	26.5	12.3	11.3	21.5	240	5040	101000	118000
03-1-14	16:24	4	7	0.24	7.82	52.1	10.5	11.6	15.3	55	3677	3000	201000
03-1-14	16:40	5	6	0.3	0.54	6.03	2.47	3.75	2.43	5	366.5	0	204000
03-1-14	17:07	6	6	0.33	0.67	53.1	11.0	12.5	9.08	0.6	10.1	0	205000
03-1-14	17:52	8	5	0.28	0.49	15.8	3.90	3.22	3.20	4	161.9	0	205000
03-1-14	17:40	10	2	0.2	0.68	102	24.4	19.9	16.0	2.2	0.0	0	204000

(B) VOCs in overlying air in landfill site (measurements made at two different points)

Sampling point	Aromatic VOCs in ppb unit				
	BEN	TOL	EB	MPX	OX
a) entrance	1.0	6.4	0.6	0.8	0.7
b) inside	1.3	26.2	4.5	1.0	1.0

조성방식, 매립장의 관리 기간 등과 같이 여러 가지 요건의 차이를 다양하게 반영한 결과로 사료된다.

3.2. LFG 성분의 조성과 이들 성분간의 관계

본 연구에서 나타난 결과와 마찬가지로, LFG의 구성 성분으로 관측되는 VOC의 조성비는 일단 대기질에서 나타나는 조성과 현격한 차이를 나타낼 수 있다. 예를 들어, 가장 대표적 방향족 성분이라고 할 수 있는 “toluene/benzene”의 농도비를 보면(Table 2 참조), 약

14에 가까운 수준을 보인다. 일반 대기에서 양자간의 농도비가 2~3배 수준을 벗어나지 않는다는 점을 감안하면, 이러한 차이는 현격한 수준이라고 볼 수 있을 것이다. Table 3에는 10개 배출공의 분석결과로부터 주요 성분의 총량기여도를 쉽게 비교할 수 있게 ppmC 농도 등 다양한 방식으로 농도와 플럭스를 동시에 제시하였다. 분석이 이루어진 BTEX 성분의 농도합은 0.6 ppmC로 나타났으며, BTEX의 개별 성분이 이들의 합에 기여하는 바를 분율(또는 퍼센트)로 비교하면,

Table 2. A statistical summary of LFG concentrations and fluxes of VOCs in Gwang-Ju landfill site: Comparison is made in various units

	BEN	TOL	EB	MPX	OX	BEN	TOL	EB	MPX	OX	BEN	TOL	EB	MPX	OX
	A-1. Concentration (ppb)					A-2. Concentration (ug/m ³)					A-3. Flux (g/yr)				
Mean	2.51	34.4	11.1	10.2	13.4	8.02	130	48.1	88.2	58.2	5.14	79.1	30.6	56.9	37.4
SD	3.07	28.7	9.92	7.33	15.1	9.80	108	43.1	63.7	65.6	6.30	53.9	27.5	40.8	45.5
Min	0.49	6.03	2.47	3.22	2.43	1.55	22.7	10.7	28.0	10.5	0.97	15.2	5.61	12.6	4.93
Max	8.62	102	32.3	24.5	52.0	27.5	383	140	213	226	19.6	171	100	152	161
N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
CI (90%)	1.78	16.6	5.75	4.25	8.75	5.68	62.7	25.0	36.9	38.0	3.65	31.2	16.0	23.7	26.4
	B-1. Concentration (ppb)					B-2. Concentration (ug/m ³)					B-3. Flux (g/yr)				
Mean	15.1	241	88.6	162	107	7.40	119	43.6	79.9	52.7	4.74	72.2	27.7	51.5	33.9
SD	18.4	201	79.4	117	121	9.04	98.7	39.0	57.7	59.4	5.81	49.2	24.9	37.0	41.2
Min	2.92	42.2	19.8	51.5	19.4	1.43	20.8	9.73	25.4	9.55	0.89	13.9	5.08	11.4	4.46
Max	51.7	711	258	392	416	25.4	350	127	193	205	18.1	156	90.6	138	146
N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
CI (90%)	10.7	116	46.0	68.0	70.0	5.24	57.2	22.6	33.4	34.4	3.37	28.5	14.5	21.4	23.9

Table 3. The composition of aromatic VOCs and major gases in terms of carbon concentration (ppmC) or flux. Average values are presented for each parameter

(A) Absolute values of LFG parameters

	BTEX	NMHC	THC	CH ₄	CO ₂	O ₂
A. Concentration (ppm)						
NA**		594	15921	15323	33500	174300
B. Concentration (ppm C)						
0.6		594	15921	15323	33500	NA
C. Flux (g C/yr)						
190		200085	5614281	5413321	10612307	NA

*15VOC denotes the sum of 15 VOC components listed in Table 3.

**NA=not applicable to compute the sum values in ppm unit.

(B) Concentration ratios between different parameters measured as LFG

	BEN/ BTEX	TOL/ BTEX	EB/ BTEX	MPX/ BTEX	OX/ BTEX	BTEX/ NMHC	CH ₄ / NMHC	CH ₄ / THC	NMHC/ THC	BTEX/ THC
A. Volume-to-volume concentration ratio is shown in percent unit										
2.45	39.24	14.42	26.43	17.45	0.10	2579	96.2	3.7	4.E-03	
B. Mass-to-mass concentration ratio per carbon basis is shown in percent unit										
2.49	38.01	14.56	27.10	17.83	0.09	2706	96.4	3.7	3.E-03	

toluene이 241 ppbC로 가장 고농도를 띄며 BTEX 합
의 39.2%를 구성하므로서 최고의 기여도를 나타내었다.
그 외에 m,p-xylene과 o-xylene 등의 성분이 100 ppbC
이상의 농도를 나타내며 뒤를 따랐다. 반면 동일하게
배출공에서 관측된 benzene은 15.1 ppbC의 수준으로
나타나, 성분들간에 농도 차이가 크게 존재하는 것으로
나타났다.

그러나 Table 3(B)에 제시된 바와 같이, 이렇게 정량
이 이루어진 BTEX 성분들에 대비하여 포괄적으로
VOC를 대표할 수 있는 NMHC에 비교하면, 그 농도비
가 0.1% 정도(질량기준)에 지나지 않는다는 것을 알
수 있다. 이와 같은 결과에 따르면, 정량되지 않은 미
지의 VOC성분들이 상당 수준에 달할 것이란 점을 추
정할 수 있다. 실제로 Young and Parker⁶⁾는 매립지
내부의 배출공으로부터 이산화탄소와 메탄과 같은 온
실기체 이외에도 약 80여 종에 이르는 다양한 VOC성
분들이 존재한다는 것을 확인시켜 준 바 있다.

Table 4에는 본 연구에서 관측한 LFG를 구성하는
주요 성분들과 VOC 성분들간의 관계를 보다 설명하기
위해, 이들 성분들간의 상관관계를 분석한 결과를 제시
하였다. 이 결과에 의하면, BTEX의 개별 성분들 중에
benzene을 제외한 대부분의 성분들간에 대단히 강한
상관성이 존재한다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4에는
BTEX의 개별 성분들을 중심으로 이들의 농도합과 개
별 성분들과의 관계를 분석한 상관분석결과를 제시하
였다. 그 결과 동일한 방향축 성분들 간에도(특히
benzene과 같은 경우) 어느 정도 차이가 존재한다는
것을 뚜렷하게 확인할 수 있다. 특히 개별 성분들과
주요 가스성분들과의 비교결과를 보면 보다 더 특이한
경향을 확인할 수 있다. 예를 들어, 메탄이나 NMHC

모두 거의 일관성있게, 톨루엔을 제외한 대부분의
BTEX성분과 상당히 양호한 상관성을 유지하는 것을
알 수 있다.

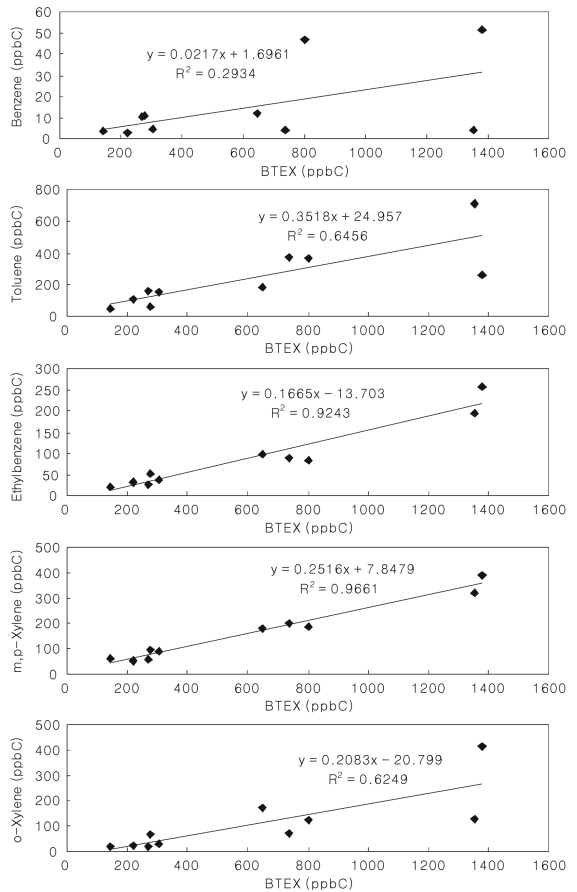


Fig. 3. Plots of linear regression analysis of LFG components between TVOC and major aromatic VOCs.

Table 4. The results of correlation analysis among VOC concentrations determined as LFG (comparison made in ppbC unit)

	BEN	TOL	EB	MPX	OX	BTEX	TVOC	CH ₄	THC
BEN	(10)								
TOL	0.13	(10)							
EB	0.56	0.63	(10)						
MPX	0.57	0.70	0.98**	(10)					
OX	0.76	0.27	0.89**	0.87*	(10)				
BTEX	0.54	0.80*	0.96**	0.98**	0.79*	(10)			
NMCH	0.63	-0.14	0.58	0.49	0.76*	0.39	(10)		
CH ₄	0.67	-0.11	0.64	0.56	0.82*	0.45	0.98**	(10)	
THC	0.67	-0.11	0.64	0.56	0.82*	0.45	0.98**	0.99**	(10)

Probability of no correlation is compared at two different probability ranges as follows: I (with * symbol at $P < 10^{-2}$) and II (with ** symbol at $P < 10^{-3}$). Numbers in the parenthesis denote the total number of matching pairs.

3.3. LFG를 통한 VOC의 배출량 및 배출규모

본 연구의 수행에 있어 가장 중요한 목적은 연구대상지역과 같이 소규모의 매립시설물에서 배출되는 VOC의 양을 정확하게 산정하고, 이를 토대로 다양한 매립시설물을 대표할 수 있는 배출계수를 산출할 수 있는 기반을 제시하는데 있다. 따라서, 본 연구대상 지역에 산재한 개별 배출공들을 통해 대기 중으로 배출되는 VOC의 양을, 본 연구에서 관측한 개별 배출공들로부터 각 성분의 농도자료와 환경변수를 이용하여 산출하였다. 이에 대한 결과도 연간 배출량 등의 형식으로 Table 2와 3에 성분별로 분리하여 제시하였다. 개별 배출공은 내경 30 cm 그리고 5m 깊이로 매립지 표면을 통해 내부 매립층으로 매설되었다. 개별 배출공에 대한 개별 성분의 배출량은 기존에 김민영 등³⁾ 또는 김기현 등⁴⁾이 난지도 또는 광주매립장 지역의 배출공에 대한 배출량 산정 방식을 준용하였다. 우선 개별 배출공으로부터 배출되는 배출가스의 양을 배출공의 입구에서 관측된 배출가스의 배출속도와 개별 배출공의 내부 용적을 동시에 감안하여 산출하였다. 일차적으로 배출공의 부피를 산출하기 위해, 배출공의 높이는 일반적으로 평지면의 관정에 사용된 5m로 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 배출공의 경우, 동시에 관측된 기온조건으로 보정해 주면, 연간단위로 배출되는 배출가스의 양(m^3/yr)을 추정할 수 있다. 최종적으로 각각의 배출공을 대표하는 농도값($\mu g/m^3$)을 산출된 연간단위의 배출가스의 양에 곱해 주면, 개별 배출공에 대한 각 성분의 연간단위별 배출량을 산출할 수 있다.

거의 대부분의 배출공들이 유사한 배출속도나 온도를 유지한 것으로 나타나, Table 2와 3에 제시된 배출량 분석결과는 성분별로 상당한 차이를 나타낸다. 예를 들어, VOC성분들의 경우, 상대적으로 성분간 농도차이가 적어, 배출량 추정치도 배출공 간에 큰 차이를 보이지는 않았다. 그러나 이와 달리 메탄이나 NMHC 등과 같은 주요 가스상 성분들의 경우, 배출농도가 상당히 불규칙하기 배출공간에 대단히 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 예를 들어, 메탄의 경우 배출공간에 10,000배 가까운 농도차이를 보이며, 이와 같은 차이가 플럭스 값의 큰 편차를 보이는 요인으로 작용하는 것

으로 나타났다. 관측이 이루어진 VOC 성분들 간의 배출규모를 비교해 보면, toluene이 연간 79.1g 수준의 배출량을 보여, 가장 큰 배출규모를 기록하였다. 실제 탄소성분과 관련없는 부분들을 모두 제외하고, 탄소배출에 대한 기여도를 기준으로 배출량의 비교방식을 제한하면, 그 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다. 한 개의 배출공에 대한 평균 배출량은 배출농도에 대한 비교와 유사하게 toluene이 연간 $72.2 g C yr^{-1}$ (BTEX 배출량의 38%로 가장 높은 결과를 기록하였다.) 이들 배출공에 대한 BTEX의 평균 배출농도는, 모든 개별 성분의 농도를 ppmC 상태로 구하여 합할 경우, 0.6 ppmC에 해당하였다. 그리고 이 농도에 배출속도 등을 적용해 주면, 개별 배출공에서 BTEX와 NMHC의 형태로 배출되는 연간단위의 규모는 각각 0.19과 200 kg $C yr^{-1}$ 에 해당한다. 그런데 총 배출공이 24개 존재하므로, 전체 연구대상 지역에 대한 배출규모는 연간 단위로 양 성분들이 각각 4.56 kg $C yr^{-1}$ 과 4.8 ton $C yr^{-1}$ 의 규모로 탄소를 배출하는 것으로 추정할 수 있다. 이러한 결과는 최근 김기현 등⁴⁾이 광주시의 매립장에 대해 분석한 결과에서, 각각 3.7 ton $C yr^{-1}$ 과 103 ton $C yr^{-1}$ 을 보고한 결과와는 현격한 차이를 보인다. 상대적으로 경산지역의 경우, 매립가스의 배출원으로서의 기능이 거의 종료에 가까운 특성을 잘 반영한 결과로 보인다. 이와 같이 개별 배출공에서 낮은 수준의 배출이 이루어지는 현상은 기존에 난지도와 같이 오랜 수명에 달한 매립시설물에서의 배출형태와 유사하다는 점에서 추정가능한 결과로 간주된다.

4. 결 론

본 연구진은 경상북도 경산시의 삼풍동에 위치한 소규모 매립시설물을 중심으로 VOC성분의 농도분포와 배출량을 측정하였다. 이를 위해, 2003년 1월의 겨울철 기간 중 연구대상 매립지에서 배출공을 통해 배출되는 VOC의 조성 및 배출량에 대한 측정을 수행하였다. 그리고 이에 덧붙여 매립장 상층대기에서 나타나는 방향족 화합물의 농도분포를 동시에 관측하였다. 본 연구의 결과에 의하면, 배출공으로부터 배출되는 VOC성분의 농도분포는 toluene과 같은 일부 개별 성분들의 농도가 수십ppb 규모로 높은 수준을 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 수준의 농도는 여타 매립장에서 발견되는 십 ppm대에 달하는 초고농도의 분포특성과는 상당한 차이를 보이는 것으로 판단되는

데, 이와 같은 차이는 본 연구대상지역이 매립시설물의 배출원으로서 수명이 거의 종료시점에 달하는 것으로 판단할 수 있었다. 본 연구의 결과를 통해, 여러 유형의 매립시설물들은 최초의 조성방식과 관리여건의 변화 등과 같은 요인의 차이에 따라 배출원으로서 상당히 다양한 차이를 보여 줄 수 있다는 사실을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구의 일부는 환경부가 주관하는 차세대과제의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- 1) Cardelino, C.A. and W.L. Chameides, *Atmospheric Environment*, **2000**, 34, 2325-2332.
- 2) Watson, J.G., J.C. Chow and E.M. Fujita, *Atmospheric Environment*, **2001**, 35, 1567-1584.
- 3) 김민영, 윤중섭, 조석주, 김기현, *한국환경분석학회지*, **2002**, 5(1), 13-24.
- 4) 김기현, 최규훈, 오상인, 최여진, 선우영, 전의찬, 주도원, 광주광역시 운정동 매립장 지역에 대한 VOC 성분의 조성과 배출 특성에 대한 연구. *한국대기환경학회지*.(투고중)
- 5) 김민영, 김기현, 조석주, *한국대기환경학회지*, **2001**, 17(4), 299-312.
- 6) Young and Parker, *Waste Management and Research*, **1983**, 2, 213-226.