

## 주요 매립장 지역에 대한 VOC 성분의 조성과 배출 특성에 대한 연구

김기현\* · 김민영\*\* · 선우영\*\*\* · 오상인\*\*\*\* · 최여진\*\*\*\*\*

### The Composition and Emission Characteristics of VOC in Major Landfill Areas in Korea

Ki-Hyun Kim\* · M.-Y. Kim\*\* · Young Sunwoo\*\*\* · Sang In Oh\*\*\*\* · Ye-Jin Choi\*\*\*\*\*

**요약 :** 국내 주요 매립장 지역의 휘발성 유기화합물(VOC)에 대한 농도분포와 배출특성을 규명하기 위한 노력의 일환으로, 6개 매립장 지역(난지도, 운정동, 삼풍, 회천, 노형, 방천 매립장)을 대상으로 배출공의 VOC 성분에 대한 농도 및 환경변수를 관측하였다. 각 지역의 VOC 배출은 매립장의 연한, 규모, 관리 방식 등의 변수에 따라 어느 정도 차이를 보였다. 현재 가동중인 매립장의 경우, VOC 농도가 수십 ppm 이상의 고농도를 취하였다. 특히 톨루엔의 상대적인 고농도 분포특성이 뚜렷하게 확인되었다. 각 배출공별 BTEX 성분의 배출량을 추정한 결과, 작게는 0.05kg/yr(삼풍)에서 최고 56kg/yr(방천)의 배출량이 관측되었다. 이들 VOC 성분의 배출을 전체 비메탄계 탄화수소(NMHC)에 비교한 결과, 작지만 일정한 수준의 기여도를 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과를 감안할 때, 매립장 지역이 VOC 성분의 중요한 배출원으로 작용한다는 것을 확인할 수 있다. 이들 성분의 대부분이 악취성분으로 작용한다는 점을 감안하여, 이들 성분이 극단적인 고농도를 보이는 배출공의 설치와 관리에 대한 적절한 관리기준이 제시되어야 할 것으로 사료된다.

**주제어 :** 휘발성 유기화합물, 매립장, 배출, 도시의 대기오염

**ABSTRACT :** To provide some insights into the distribution and emission characteristics of VOC from major landfill areas in Korea, the concentrations of major aromatic VOCs were determined from landfill gas (LFG) from a total of six municipal landfill sites in Korea which include: Nan Ji (NJ), Woon Jung (WJ), Sam Poong (SP), Hoei Chun (HC), No Hyung (NH), and Bang Chon (BC). The patterns of the VOC distribution were distinguished mainly in terms of a number of parameters such as landfill aging, landfill size, and maintenance patterns. The VOC concentrations measured from the unclosed landfill sites (e.g., WJ and BC) were characterized by exceedingly high VOC values above a few tens of ppm. It was most striking to find a systematic dominance of toluene over other aromatic VOC under most circumstances. Using the LFG flux values of aromatic VOC for each vent pipe, the fluxes of the average BTEX quantity emitted per vent pipe were quantified such as 0.05 (SP) to

\* 세종대 지구환경과학과 부교수(Associate Professor, Department of Earth & Environmental Sciences, Sejong University). 논문주작성자임.

\*\* 서울시보건환경연구원 환경부장(Chief Manager, Seoul Metropolitan Research Institute of Public Health and Environment)

\*\*\* 건국대 환경공학과 부교수(Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Konkuk University)

\*\*\*\* 세종대 지구환경과학과 연구원(Research Technician, Department of Earth & Environmental Sciences, Sejong University)

\*\*\*\*\* 세종대 지구환경과학과 연구원(Research Technician, Department of Earth & Environmental Sciences, Sejong University)

56.0kg/yr (BC). The LFG flux values of aromatic VOC, when compared to the contribution of non-methane hydrocarbons (NMHC), were able to explain a constant, but minor, proportion of the LFG carbon budget. According to our study, we propose that management strategy may be required for the installation of landfill venting system because of its potential role for air quality degradation.

**Key Words** : VOC, landfill, emission, urban air pollution

## I. 서론

매립지의 지표면 하층부에서는 혐기성 분해 작용을 통해, 다양한 유형의 가스가 생성되고 배출된다. 이렇게 배출되는 물질들 중에는 다양한 성분들이 발견된다. 예를 들어, 잠재적으로 기후환경의 변화를 야기하는 온실기체 성분들(이산화탄소, 에탄 등)이 수십%의 고순도로 배출되는 현상은 이미 지구환경의 관리라는 측면에서도 중요한 이슈로 대두되고 있다 (James and Stack, 1997; Ito et al., 2001). 이처럼 초미의 관심사로 취급되는 온실기체 성분 이외에도 배출 가스에는 약 80여 종 이상의 다양한 휘발성유기화합물질(Volatile Organic Compound, 이하 VOC)들의 존재가 확인된 바 있다(Schweigkofier and Niessner, 1999). 이들 VOC 성분들 중에는 발암성을 띤 강한 독성물질들은 물론, 대기 중 오존 생성에 직접적으로 간여하는 광화학 오염물질들이 동시에 발견된다. 따라서 이들 중 다수의 성분들은 특별한 관리대상 물질로 분류되기도 한다(백성욱·김영민, 1996).

매립지로부터 이루어지는 이들 성분의 배출이 주목을 받는 이유는 매립지 표층 내부로부터 매립지의 지표면 또는 배출공 등을 통해 배

출되는 VOC 성분들은 일반 대기 중의 농도에 비해, 수 배 또는 심지어 수천 배까지 고농도 상태로 이루어진다는 점이다. 따라서 매립장 환경은 환경학적 또는 보건학적 관점에서 적정한 관리방안이 요구되고 있다(Kim and Kim, 2002).

VOC 성분들에 대한 적절한 관리를 위해서는 매립장에서 발생하는 VOC의 조성이나 배출량 등에 대한 정보를 정확하게 파악하고 예측하는 것이 중요하다. 이를 위해서는, 매립시설물의 상태와 VOC의 배출량 등을 얼마나 정량적으로 제시할 수 있는가의 여부가 우선적으로 고려되어야 할 것이다. 관리차원의 목적에서 매립시설물의 상태라 함은 매립물의 양과 종류, 매립방식, 매립종료시기, 매립시설물의 규모 등과 같이 기본적인 관리방식과 연계된 정보 외에도 오염물질의 종류, 성상, 그리고 이들과 연계된 주요 환경인자에 대한 정보까지 포괄적인 부분을 의미한다. 이러한 요인들은 VOC와 같은 중요한 오염물질들의 배출규모를 결정하는 복합적인 변수로써 작용한다. 따라서 이들에 대한 정보는 매립지로부터 발생하는 환경변화를 체계적으로 설명하는데 중요한 단서를 제공할 수 있다. 본 연구진은 매립지로부터 배출되는 VOC 성분들에 대한 총

량적 관리를 목표로 매립장 지역에 대한 연구를 지속하였다. 이를 위해, 매립시설물의 규모와 매립방식을 고려하여 관측대상 매립지를 선정하고, VOC의 환경대기 중 농도, 배출규모를 연구하였다(김민영 외, 2002; 김기현 외, 2003a; 김기현 외, 2003b).

본 연구진은 2000년에 서울시 난지도 매립장을 조사하는 것을 기점으로 광주시 운정동, 경산시 삼풍동, 제주도 노형, 회천 매립장 등을 조사하였고, 2004년 1월 대구시 방천동 매립장까지 전국적으로 다양한 규모와 연령의 매립장 지역들에 대해 VOC 성분의 배출규모와 배출특성을 조사하였다.

## II. 연구방법

### 1. 매립장 특성

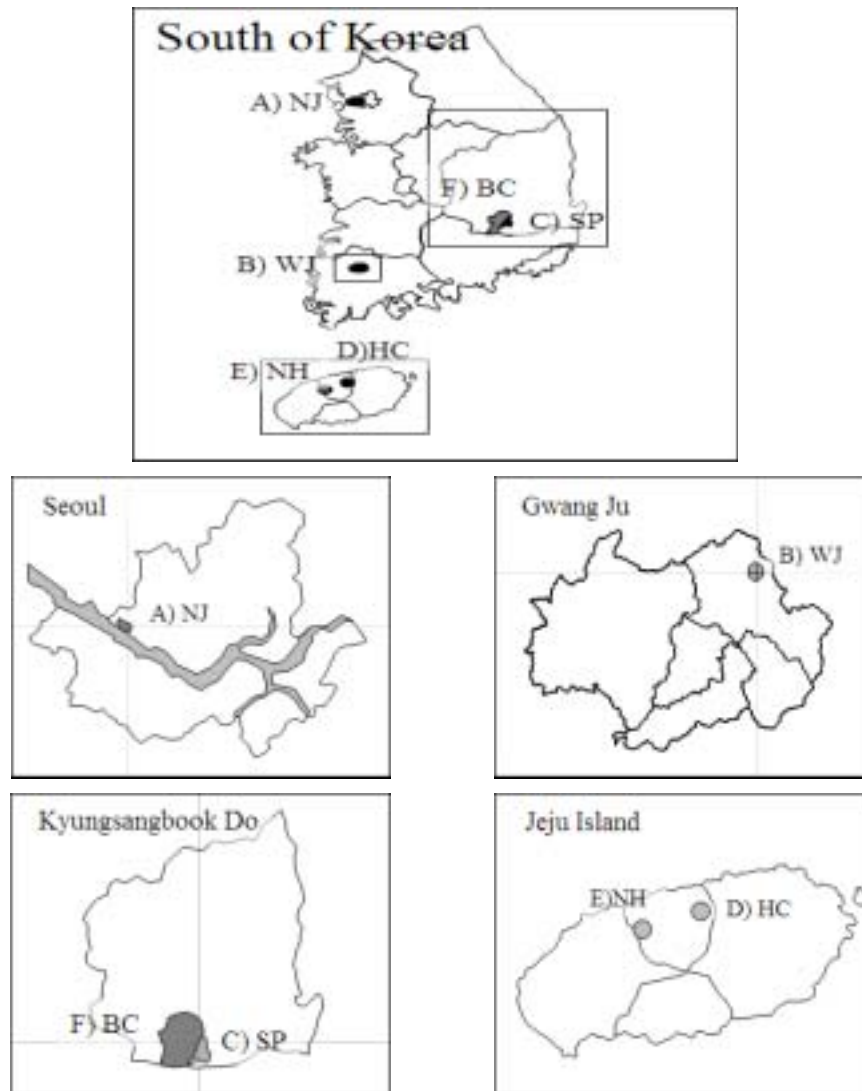
본 연구에서는 총 여섯 개의 매립장을 대상으로 VOC 성분의 관측을 실시하였다. 각 매립장에 대한 정보는 <표 1>에 제시하였다. 편의상 비교대상 매립장 중 매립면적이 2.72km<sup>2</sup>로 규모가 가장 큰 난지도를 대형매립장으로 분류하였다. 이에 비해 1/10수준으로 작은 운정, 회천, 방천 매립장은 중형으로, 그리고 이보다 1/10수준으로 작은 삼풍과 노형은 소형 매립장으로 분류하였다. 또 다른 측면에서 전체 여섯 개의 매립장 중 절반이 현재 매립이 진행중이며, 나머지는 매립이 완전히 종료되거나 부분적으로 진행중인 안정화 단계에 있다. 난지도 매립지는 전체 관측대상 매립지 중에 가장 큰 매립 면적으로 조성되었으며, 전형적인 비위생

매립방식을 적용한 국내의 가장 오래된 매립지 중 하나이다. 본 연구진은 난지도 매립장을 대상으로 다양한 오염물질 성분에 대한 관측을 실시한 바 있으며, 이들의 배출원으로써 매립장의 특징을 자세히 소개한 바 있다(Kim et al., 2002). 난지도 매립장에 대한 관측은 매립지의 안정화 단계로 접어드는 2000년 9월에 집중적으로 이루어졌다. 관측 당시에는 매립지 대부분에 안정화 작업이 도입중인 상태였기 때문에, 사실상 매립이 종료된 지역으로 구분할 수 있다.

삼풍과 노형 매립장도 종료된 매립장에 해당한다. 이와 대조적으로 3개의 중규모 매립장에 해당하는 운정, 회천, 방천 매립장은 모두 현재 활발하게 매립이 진행중인 지역에 해당한다. 한편 운정동 매립장에 대한 관측은 VOC 배출량 산정을 위한 목적과 더불어 매립장 지역에 나타나는 계절간의 VOC의 배출 특성을 파악하고자 하는데 의미를 두었다. 운정동 매립장에 대한 관측은 겨울(2002년 12월)과 여름철(2003년 7월), 두 차례에 걸쳐 실시하였다. 위에 서술한 매립 규모와 매립 진행여부 이외에도 매립 방식에서 공통점의 유무를 비교할 수 있다. 3개의 중규모 매립장은 모두 위생매립 방식을 적용하고 있는데 반해, 난지도를 포함한 소규모 매립지에서는 매립 시작부터 종료까지 비위생 매립방식을 적용하였다는 점이 특징적이다. 아울러 조사 당시에는 삼풍 매립장은 쓰레기 소각장 및 중간 집하장으로 활용되고 있었으며, 노형 매립장은 생태공원 조성을 위한 작업이 활발히 진행중이었다.

〈표 1〉 본 연구에서 조사된 국내 매립장 지역의 목록

Order	Name	Short Name	Location	Operation type	Size	Operation period		Area (km <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Study period (Sample collection)
						Start	End			
1	Nan Ji Do	NJ	Seoul	Nonsanitary	Large	1978	1992	2.72	1.10×10 <sup>8</sup>	20 Sept. ~4 Oct. 2000
2	Woon Jung Dong	WJ	Gwang Ju	Mixed	Medium	1991	Present	0.28	4.37×10 <sup>6</sup>	9~11 Dec. 2002/ 9~10 Aug. 2003
3	Sam Poong Dong	SP	Kyung San	Nonsanitary	Small	1989	1997	0.03	2.90×10 <sup>4</sup>	14~15 Jan. 2003
4	Hoei Chun Dong	HC	Jeju	Sanitary	Medium	1992	Present	0.2	2.29×10 <sup>6</sup>	22~23 July 2003
5	No Hyung Dong	NH	Jeju	Nonsanitary	Small	1980	1992	0.08	1.66×10 <sup>6</sup>	22~23 July 2003
6	Bang Chun	BC	Dae Gu	Sanitary	Medium	1990	Present	0.6	1900 t/d	13~16 Jan. 2004



〈그림 1〉 본 연구에서 조사한 5개 연구대상매립장(자세한 내용은 〈표 1〉 참조)

## 2. VOC 시료의 채취

본 연구에서는 매립장 배출공으로부터 배출되는 매립가스 중 방향족 VOC 성분을 대상으로 집중적인 관측을 실시하였다. 노형 매립장을 제외한 모든 지역에서는 테들러 백을 이용하여 매립장에 산재된 배출공으로부터 직접 시료를 채취하였다. 그러나 노형 매립장의 경우, 조사 당시 매립이 완전 종료된 상태로 매립장 지역에는 체육 및 공원시설이 조성중이었다. 따라서 매립지역의 배출공이 완전히 제거된 상태였다. 그런데 이 지역에서는 아직까지 각종 배출가스를 소각하기 위해 중앙회수 방식으로 수집하였기 때문에 이를 통해 시료를 채취하였다. 회천의 경우에는 현재 매립이 진행중이지만, 노형과 마찬가지로 중앙회수 시설을 통해 매립가스를 통제하는 설비가 완전히 가동중이었고, 제한적으로 배출공을 갖추고 있었다. 따라서 이 지역에 대한 시료 채취는 중앙회수 시설과 잔여 배출공 두 개로부터 모두 시료채취를 실시하였다.

매립가스 중 VOC 시료의 채취에는 이들 성분이 고농도로 존재한다는 점을 감안하여, 저농도 시료의 분석용으로 제작한 흡착튜브를 사용하지 않았다. 그 대신 3ℓ 또는 10ℓ 크기의 테들러 백을 핸드샘플러에 연결하여 약 1 liter min<sup>-1</sup> 이하의 유속으로 시료를 채취하였다(채취 유속이 낮을수록 테들러 백의 블랭크 값이 높아지는 현상을 감안하여, 시료의 채취는 핸드 샘플러의 유속을 증가시킨 상태에서 수행하였다). 배출공으로부터 배출되는 VOC 성분들에 대한 채취와 동시에 배출량을 산정하

기 위한 배출가스의 배출속도, 온도 등의 주요 환경변수를 동시에 측정하였다. 또한 배출가스에 함유된 에탄, 이산화탄소 등 주요 화학적 성분들에 대한 분석도 동시에 진행하였다. 아울러 대부분의 매립장에서 매립장상부의 대기에 대해서도 유사한 방식을 적용하여 시료채취를 동시에 수행하였다.

## 3. 시료의 분석

매립장 환경에서의 정확한 배출공으로부터 유출되는 VOC 농도를 정확하게 측정하는 것은 배출계수 산정 및 배출량을 산출하는데 있어서 가장 기본적인 과정에 해당한다. 본 연구에서는 매립지 환경에 존재하는 VOC 성분을 정량적으로 관측하기 위해, 배출공으로부터 배출되는 가스(이하에서는 landfill gas의 약어로 LFG로 표기) 내의 주요 방향족 VOC 성분과 주요 가스성분에 대한 분석에 주력하였다. 그리고 현장에서 시료 채취가 이뤄진 후 24시간 이내에 모든 분석을 완료하였다. 그런데 LFG 내에는 VOC를 포함하는 탄화수소 성분이 극단적인(수 백 ppb~수 십 %대의) 고농도로 분포할 것으로 예상되기 때문에, 분석 시스템의 오염문제를 고려하지 않을 수 없다. 고농도 시료의 전처리 과정(예를 들어, 희석, split, 가스타이트 시린지 주입 방식) 등의 활용을 통해서 분석 시스템의 오염문제를 피할 수 있지만, 시료의 안정성과 분석정밀도의 확보에 있어서 정도관리가 용이하지 않은 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 LFG 분석에 있어서 다음과 같은 분석방식을 준용하였다.

본 연구에는 기본적으로 GC/FID와 Loop (250  $\mu$ l) 주사 방식에 기초한 열탈착 시스템 (SPIS TD, 도남인스트루먼트)을 연계한 분석 시스템을 활용하였다. 저용량의 샘플링 루프를 통해 시료가 주입됨으로써, (물리적인 split 효과를 정량적으로 증가시켜) 시료의 절대 주입량을 감소시키는 것이 가능하다. 테들러 백을 이용하여 채취한 시료는 전술한 열탈착장치 내부로 주입시켜 (cold trap에서) 농축(focusing)하였다. 이렇게 농축된 시료는 열탈착과정 (320°C에서 2분간)을 거친 후, column(BP 1, 60m 0.32mm, SGE사 제조)을 통해 GC(Gas chromatography) 시스템으로 주입하였다. 또한 column 내에 주입된 혼합성분을 각각의 단일성분으로의 분리를 촉진하기 위해, 다음과 같이 승온 프로그램(Temperature Program)을 시도하였다. 최초 50°C에서 1분간 유지한(holding) 후, 6°C/min으로 온도를 상승(Ramp time)시키고, 최종 210°C에서 2분간 유지시켰다.

검량선을 작성하기 위하여 BTEX를 포함하는 13 가지 VOC 성분을 함유하는 액상 표준시료(EPA VOCs Mix 2)를 사용하여, 작업용 표준시료(working standard)를 제조하였다. 전기적 가열이 가능하도록 고안된 유리재질의 용량 플라스크에서 기지의 액상 표준시료를 기화시킨 후, 초고순도 질소(99.999 %)를 이용하여 희석 제조하였다. 동일 시료를 반복 분석한 결과를 기준으로, 상대 표준오차를 이용하여 정밀도를 산출한 결과 약 9% 이내 수준의 정밀도를 유지하는 것으로 나타났다. 본 분석 시스템의 정확도는 액상으로 제조된 TO-14

표준가스를 GC칼럼에 직접 주입하는 방식을 이용하여 비교분석 하였다. 그 결과, 정확도는 5% 내외로 확인되었다. 절대량을 기준으로 할 때, 본 연구에 활용된 GC-FID 시스템은 벤젠을 기준으로 대략 0.1ng 수준의 검출한계를 유지하였다. VOC 이외의 주요 매립가스 성분인 CH<sub>4</sub>, NMHC(Micro-FID, Photovac Inc, USA), CO<sub>2</sub>(Geotech, USA) 등의 성분은 휴대형 분석장치를 이용하여 현장에서 곧바로 분석하였다.

모든 매립장의 시료분석은 위에서 설명한 GC-FID 방식을 이용하였다. 그러나 예외적으로 운정동 매립장의 1차 조사기간(겨울철)의 시료들은 보다 고농도 시료의 직접 분석에 용이한 휴대형 GC-PID(Voyager Assay # 1, Photovac, Inc.)를 사용하였다. 본 시스템은 분석대상 물질의 분자량을 기준으로 light, medium, heavy VOC성분들에 대하여 각각 독립적으로 내장된 3개의 칼럼을 이용하여 분석할 수 있게 설계되었다. 그리고 기기의 특성상 EPA 601 방법에 의한 다수의 할로젠족 방향족 성분, EPA 602 방법의 방향족 성분들, EPA 624 방법에 의한 기타 성분들을 포괄적으로 포함한 40여 가지 성분을 분석하는 것이 가능하다. 그러나 본 연구에서는 BTEX와 같이 우선적으로 검출이 용이한 15개 성분을 중심으로 분석을 수행하였다. 본 분석방식에 대한 기본적인 정도관리 결과는 다음과 같다. 현장시료에 대한 3회 반복분석 자료를 토대로 정밀도를 산출한 결과, BTEX 성분의 경우 대략 5% 범위의 정밀도를 유지하였다. 본 GC-PID 시스템의 정확도는 배출공 시료 중 상대적으로 저농도(예를 들어, 벤젠 농도가 100ppb 또는 톨루엔 농도가

1000ppb)를 상회하는 시료를 유지하는 경우를 선택하여, 분석특성이 잘 정의된 GC-FID 시스템과의 상호비교방식으로 검정하였다. 양 시스템의 분석결과는 대략 10%를 상회하는 범위 내에서 양호한 일치도를 보여 주었다. 참고로 생산업체가 정의한 바에 의하면, 일반적인 표준시료를 사용하여 분석할 경우, 5% 이내의 정확도를 유지하는 것으로 알려져 있다 (Ebersold and Young, 2002). 본 GC-PID시스템의 검출 한계는 벤젠을 기준으로 정의하면, 약 50ppb 수준을 유지하는 것으로 나타났다.

### III. 결과 및 토론

#### 1. 주요 방향족 VOC 성분의 농도분포

배출공을 통해 확보한 LFG시료와 매립장 주변 대기로부터 확보한 환경대기시료의 분석 결과를 BTEX를 위시한 주요 방향족 VOC 성분들을 중심으로 <표 2>에 통계요약하였다. 운정동 매립장의 대기 중 VOC 농도가 대체로 다른 지역에 비해 비정상적으로 높게 나타나는데, 이는 한 개의 시료로부터 측정된 값이 극단적으로 높게 관측된 결과에 의한 것이다. 실제로 최소, 최대값의 농도 범위(30~2927 ppb)가 약 100 배에 이르며, 이러한 결과는 배출공으로부터 배출되는 VOC가 매립지 주변의 환경대기 중의 농도에도 직접적으로 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 이와 같은 차이는 운정동과 유사한 LFG 농도 수준을 나타내는 방천 매립장의 경우에서도 확인된다. 방천동의 경우, 실제로 대기 중 평균농도가 기타 지역과

유사한 수준으로 나타남으로써, 운정동과는 다소 다른 양상을 보여준다. 개별 배출공의 농도 분포 변이 특성을 이해하기 위해, <그림 2a>와 <그림 2b>에서는 유사한 중규모급 매립장인 운정동과 방천동 매립장의 배출공을 대상으로 이들의 농도를 배출공에 지정한 임의 번호의 함수형태로 표기해 보았다. 그 결과 동일한 매립장 내 배출공마다 유사한 VOC 성분들의 농도가 다양한 범위에서 비균질적으로 배출됨을 알 수 있다. 그러나 배출공 번호를 따라 VOC 농도의 상대적 분포 형태를 비교하면, 성분들 간에 매우 유사한 점을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 대구지역에서 관측한 에틸벤젠과 m, p-자일렌 성분 간에 두드러지게 나타난다.

관측지역을 매립이 종료된 것과 진행중인 것으로 나누어 살펴보았을 때, 일반적으로 구분되는 사실은 전자에 해당하는 난지도, 삼풍, 노형 매립장의 VOC 농도가 후자보다 확연하게 낮은 농도를 유지한다는 것이다. 이들 중에서도 각 매립장의 VOC 농도 수준은 특별히 구별이 가능하다. 삼풍의 경우, 대기 중 농도에 비해 매립가스의 농도가 겨우 2~10배를 초과하는 수준에 불과하다. 비록 삼풍 매립장의 경우, 운영이 종료된 매립장이지만, 노형 매립장과 같이 중앙회수 시설에서 채취된 LFG의 농도와 직접적으로 비교하는 것은 다소 어려운 것으로 볼 수 있다. 본 연구 결과에서 가장 높은 VOC 농도 분포를 취한 운정동의 경우, 겨울철 톨루엔의 농도가 10ppm을 초과하는 것으로 나타났다. 이는 가장 농도가 낮은 삼풍동보다 300배 이상 높은 수준이다. 이러한 매립장 VOC의 고농도 관측 사례는 독일에서 찾아

볼 수 있다. 독일의 두 도심 지역 매립장을 대상으로 방향족 VOC의 관측결과에서는 벤젠의 농도가 수백 ppb에 이르고, 다른 성분들은 수~수십 ppm에 이르는 것으로 보고된 바 있다 (Schweigkofler and Niessner, 1999). 아울러 지역마다 대기 중 개별 VOC 성분의 농도 수준

에는 차이가 있음은 확인하지만(<표 2>), 다른 성분들 간의 비율(톨루엔/벤젠)이 다른 매립장 지역 간에서도 유사한 경향성으로 나타난다는 점은 매립장의 배출 원적 특성을 일관성 있게 반영하는 것으로 볼 수 있다.

<표 2a> 매립장 배출가스에 함유된 주요 VOC성분의 분석결과(모든 농도는 ppb단위)

Landfill ID	BEN*	TOL	EB	MPX*	OX	STR
I. Aromatic VOC compositions in LFG collected from each study site						
A. NJ	31.8±61.8 (14.9) <sup>1</sup>	259±287 (204)	-	10.4±16.9 (4.12)	45.1±61.1 (28.3)	-
	0.22~320 (52) <sup>2</sup>	3.58~1431 (53)	-	0.16~69.4 (25)	0.14~311 (51)	-
B. WJ [1] Winter	234±143 (201)	10883±10355 (7218)	2978±2286 (2286)	2362±1553 (2142)	-	2590±1501 (3015)
	35~479 (14)	1018~32316 (14)	604~8133 (15)	454~7072 (15)	-	895~4795 (8)
	[2] Summer					
	924±1054 (494)	2610±2354 (1484)	982±498 (999)	1045±522 (960)	-	91.5±79.5 (56.0)
C. SP	135~2767 (6)	661~6341 (6)	412~1723 (6)	509~1794 (6)	-	37.3~248 (6)
	2.51±3.07 (1.24)	34.4±28.7 (24.5)	11.1±9.92 (8.40)	10.2±7.33 (8.56)	13.4±15.1 (8.7)	-
D. HC**	0.49~8.62 (10)	6.03~102 (10)	2.47~32.3 (10)	3.22~24.5 (10)	2.43~52 (10)	-
	828±718 (697)	1808±1529 (1566)	1264±874 (1624)	946±691 (1012)	1269±886 (1495)	65.8±32.7 (58.6)
E. NH	184~1603 (3)	414~3444 (3)	267~1899 (3)	225~1602 (3)	292~2020 (3)	37.3~101 (3)
	117	21.9	53.7	34.2	48.9	248
F. BC	1564±1695 (1178)	64765±74438 (28902)	5893±3423 (6120)	4431±2656 (4644)	1001±745 (1081)	1130±2234 (551)
	126~7125 (14)	411~253370 (14)	686~10683 (14)	472~8374 (14)	64.7~1993 (14)	40.0~8844 (14)

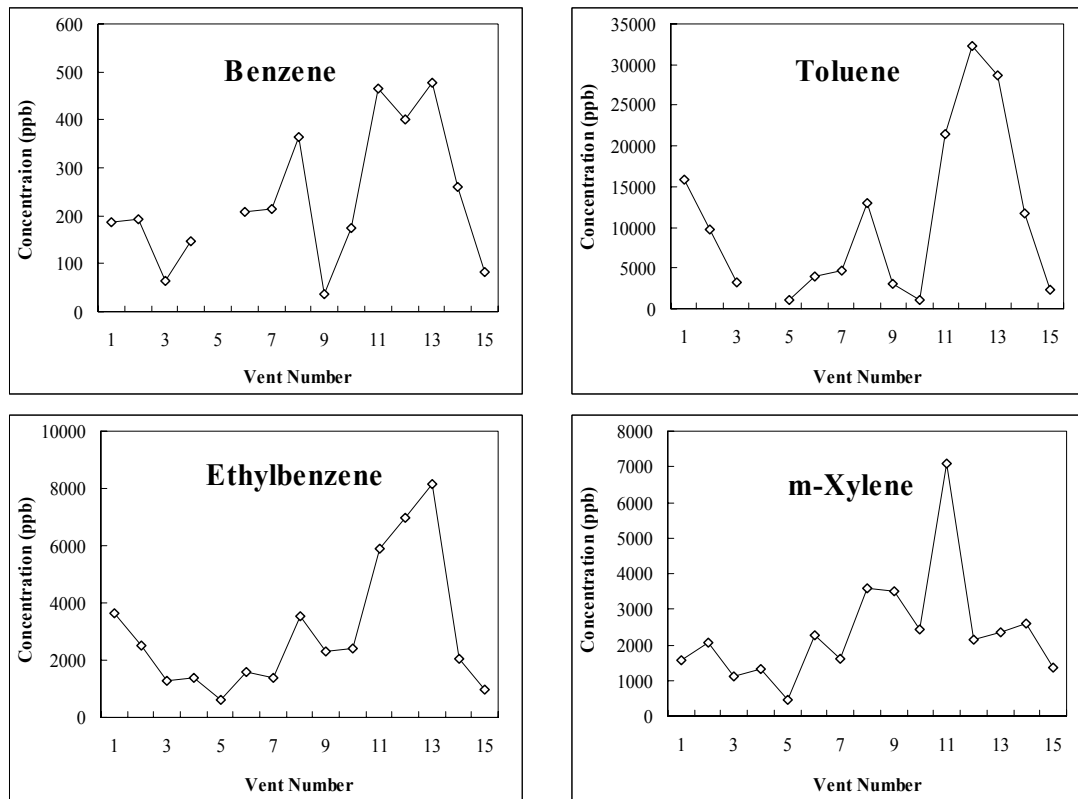
1. 평균 ± 표준편차 (중앙값), 2. 범위 (자료수)

3. HC 지점은 2개의 배출공과 한 개의 중앙회수시스템으로부터 분석한 값임.

<표 2b> 매립장 인근 지역의 환경대기시료에 대한 VOC 성분의 분석결과

Landfill ID	BEN*	TOL	EB	MPX*	OX	STR
A. NJ	0.96±0.65 (0.72)	8.99±6.10 (6.32)	-	0.89±0.72 (0.66)	0.21±0.20 (0.16)	-
	0.28~3.24 (28)	0.27~22.6 (28)	-	0.00~2.78 (28)	0.07~0.70 (10)	-
B. WJ [1] Winter	13.0±19.9 (2.44)	1023±1650 (110)	250±401 (26.3)	151±241 (16.1)	184±300 (15.9)	-
	0.58~36.0 (3)	30.4~2927 (3)	10.8~714 (3)	7.12~429 (3)	6.61~530 (3)	-
	[2] Summer					
	-	-	-	-	-	-
C. SP	0.99±0.81 (0.80)	9.18±9.63 (6.03)	1.86±2.86 (0.76)	0.88±0.18 (0.86)	0.72±0.26 (0.62)	-
	0.20~1.97 (6)	2.74~28.3 (6)	0.46~7.68 (6)	0.67~1.17 (6)	0.49~1.18 (6)	-
D. HC	0.79±0.66 (0.72)	9.59±5.01 (8.80)	10.4±7.17 (8.52)	9.86±6.87 (7.82)	15.3±10.8 (12.9)	3.59± 2.75 (3.85)
	0.15~1.83 (5)	3.63~16.2 (5)	2.74~18.7 (5)	2.66~18.2 (5)	3.75~27.1 (5)	0.76~7.06 (5)
E. NH	-	-	-	-	-	-
F. BC	0.91±1.14 (0.63)	8.42±5.38 (8.28)	1.34±1.44 (0.99)	1.01±0.96 (0.79)	0.24±0.19 (0.21)	0.45±0.44 (0.31)
	0.15~6.69 (43)	0.57~17.7 (43)	0.19~7.82 (43)	0.18~5.37 (43)	0.05~1.03 (43)	0.10~2.50 (43)

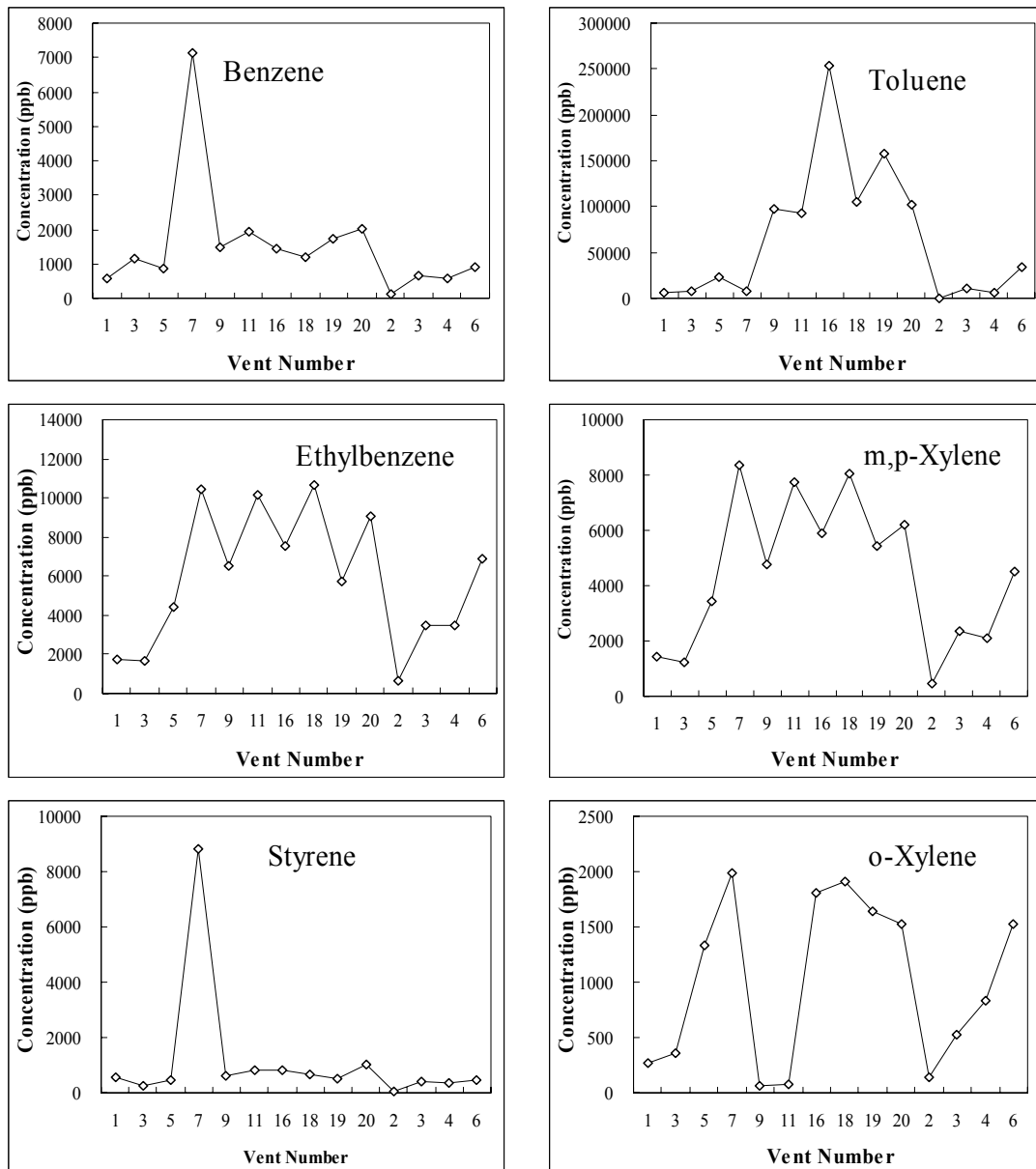




〈그림 2a〉 WJ 매립장에서 관측한 주요 방향족 VOC의 농도분포(X축=배출공 번호)

〈표 3〉에는 각 매립장별 메탄, 이산화탄소, NMHC를 위시한 주요 매립가스의 농도를 제시하였다. 이러한 결과의 비교는 매립가스 중 VOC 성분과 더불어, 주요 매립가스의 농도분포 역시 매립장별로 다소 차이가 있음을 시사한다. 실제로 매립가스의 구성 및 농도를 결정하는 요인으로서는 매립물의 성분, 매립지 내부의 수분상태, 분해 진전단계, (가스추출률에 따른) 가스 구성의 변동 등이 기인하는 것으로 알려져 있다(Schweigkofler and Niessner, 1999). 앞서 살펴본 바와 같이, 각각의 매립장에서 관측되는 VOC의 농도 수준이 매립장의 상태를 가늠할 수 있는 중요한 요인으로 작용할 수 있는 것처럼, 주요 매립가스 성분의 농도분포 또한 매립지 내부의 상태를 가늠할 수 있는 중요

한 정보를 제공한다. 본 연구 결과에서 난지도의 메탄 농도가 다소 예외적으로 고농도로 존재하기는 하지만, 삼풍의 경우 다른 지역과는 현저한 차이를 나타내며 매우 낮은 농도의 메탄을 포함한다. 그러나 이 지역의 산소 농도는 대기 중 농도(20%)와 매우 근접한 수준으로써 이 역시 다른 지역에 비해 높은 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 삼풍의 경우, 다양한 LFG 성분의 배출원으로써의 매립지 수명이 다한 것으로 사료된다. 그러나 삼풍과 기타 지역 간의 VOC 농도 및 주요 매립가스의 상이한 구성비에도 불구하고, VOC 성분들 간에는 여타 지역과 마찬가지로 높은 상관관계를 나타내고 있다는 점에 주목할 필요가 있다(〈그림 3〉).



〈그림 2b〉 EC 매립장에서 관측한 주요 방향족 VOC의 농도분포(X축=배출공 번호)

〈표 3〉 배출가스의 주요화합성분에 대한 조성분석 결과(농도 = %)

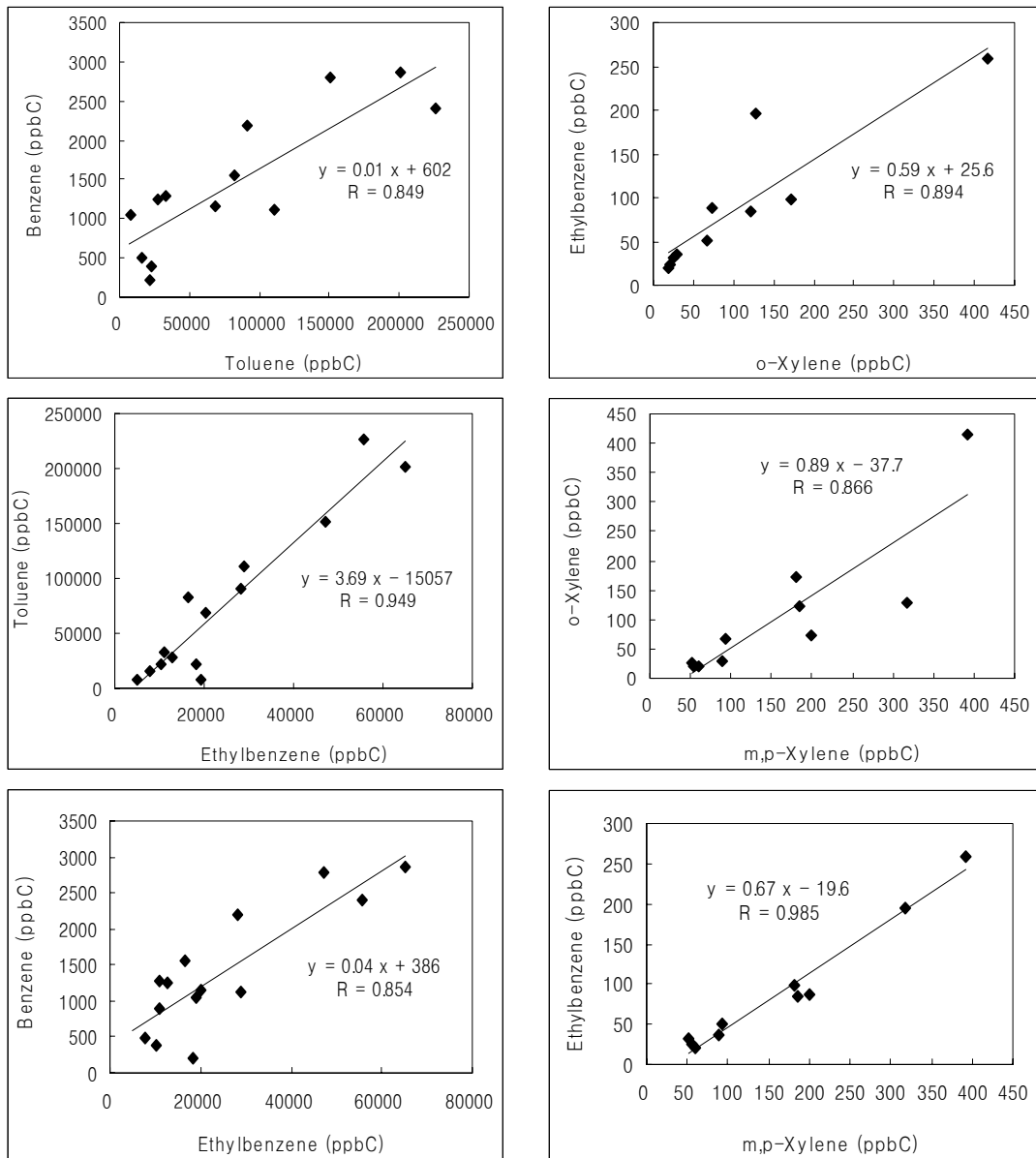
(A) 주성분의 농도

	Major gases in percent unit			
	NMHC	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
A. NJ	-	58.0±4.38 (59.9)	27.7±3.15 (29.3)	-
	-	50.4~63.4 (44)	20.7~31.0 (44)	-
B. WJ [1] Winter	0.51±0.38 (0.39)	26.8±17.7 (26.0)	18.9±9.36 (17.2)	9.40±4.64 (10.0)
	0.20~1.05 (4)	6.93~48.3 (4)	9.80~31.4 (4)	3.50~14.2 (4)
	[2] Summer	0.62±0.32 (0.53)	28.6±13.5 (25.9)	21.4±11.2 (18.0)
		0.25~1.01 (6)	12.9~44.8 (6)	8.10~35.2 (6)
C. SP	0.06±0.10 (0.01)	1.53±3.01 (0.20)	3.35±4.95 (0.15)	17.4± 4.41 (20.3)
	0.00~0.32 (10)	0.00~9.41 (10)	0.00~13.4 (10)	8.40~20.5 (10)
D. HC	0.80±0.36 (1.00)	38.1±11.5 (44.7)	29.7±9.24 (34.8)	4.83±7.59 (0.50)
	0.38~1.01 (3)	24.8~44.8 (3)	19.0~35.2 (3)	0.40~13.6 (3)
E. NH	2.45	37.7	21.5	1.50
F. BC	0.71±0.28 (0.73)	40.0±12.7 (44.3)	38.0±7.54 (41.7)	2.19±2.60 (0.98)
	0.28~1.25 (14)	15.5~52.4 (14)	23.0~44.9 (14)	0.60~8.80 (14)

(B) 주성분의 부피분율

	T/B	ΣBTEX/NMHC*	CH <sub>4</sub> /NMHC
A. NJ	9.84±1.67 (10.2)	-	-
	7.89~11.7 (5)	-	-
B. WJ [1] Winter	55.4±30.3 (53.9)	1.88±1.66 (1.40)	53.7±16.6 (56.6)
	7.63~103 (13)	0.57~4.16 (4)	34.0~67.6 (4)
	[2] Summer	6.28±4.41 (6.07)	48.47±11.1 (48.2)
		0.75~12.9 (6)	32.0~65.2 (6)
C. SP	39.8±53.8 (15.6)	0.85±2.42 (0.02)	1.04±0.03 (1.03)
	5.06~174 (10)	0.00~7.30 (9)	1.01~1.09 (9)
D. HC	2.59±0.07 (2.62)	0.83±0.68 (0.90)	51.4±11.9 (44.7)
	2.51~2.63 (3)	0.12~1.48 (3)	44.4~65.2 (3)
E. NH	0.22	0.04	32.0
F. BC	52.6±56.5 (37.4)	0.09±0.10 (0.06)	59.6±17.6 (57.8)
	1.35~207 (14)	0.00~0.31 (14)	31.1~108 (14)

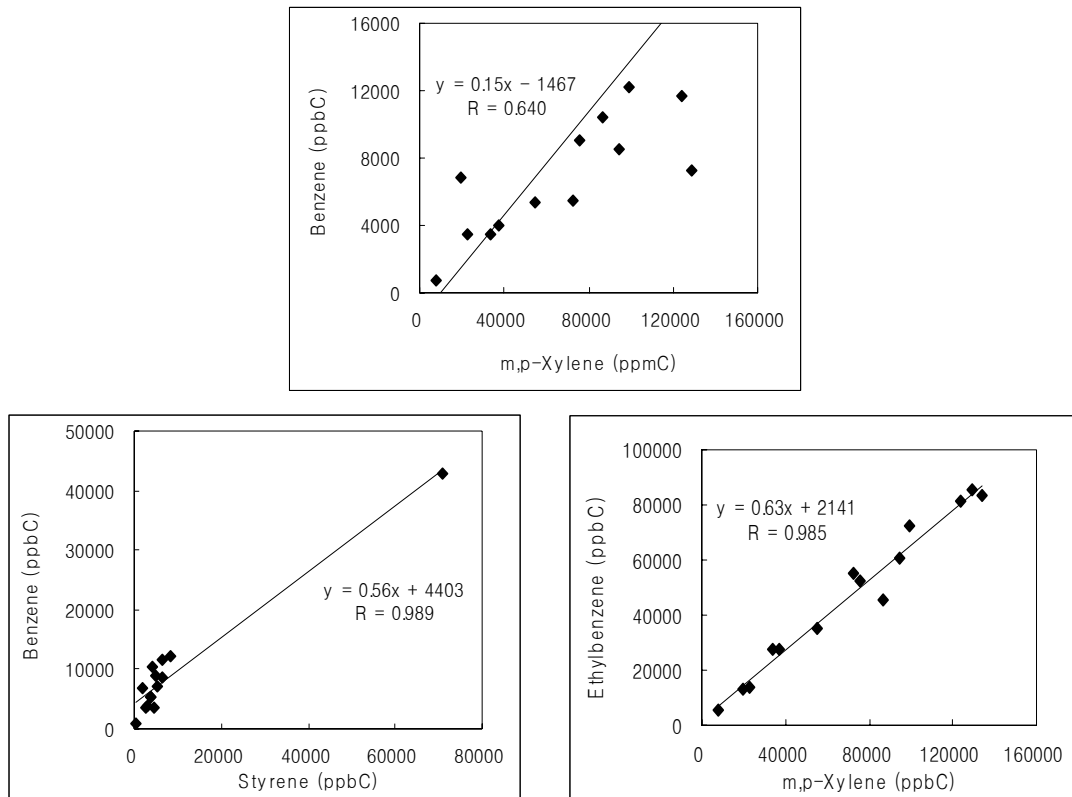
\* 탄소 (C) 중심의 농도: 결과는 % 단위임.



(A) WJ site (winter)

(B) SP site

〈그림 3〉 배출가스 성분들에 대한 상관분석 결과



(C) BC site

〈그림 3〉 배출가스 성분들에 대한 상관분석 결과

## 2. 시간적 요인에 따른 VOC 성분의 농도분포

겨울과 여름철에 운정동 매립장의 VOC 성분의 관측이 이루어진 점을 비추어 볼 때, 매립장 환경의 VOC 성분의 농도 분포를 장주기적 시간 요인에 따라 설명할 수 있을 것으로 기대된다. 아울러 운정동이나 방천동에서 실시한 관측 결과는 단주기적 분포를 평가하는데 활용하는 것도 가능하다. 〈표 2〉와 〈표 3〉에 나타나듯이 운정동에 대한 양 계절 간의 주요 매립가스 성분은 크게 차이가 없는 것으로 나타난다. 그러나 VOC의 상대적 분포양상은 두 기간 동안에 상당히 대조적이다. 두 자료군의

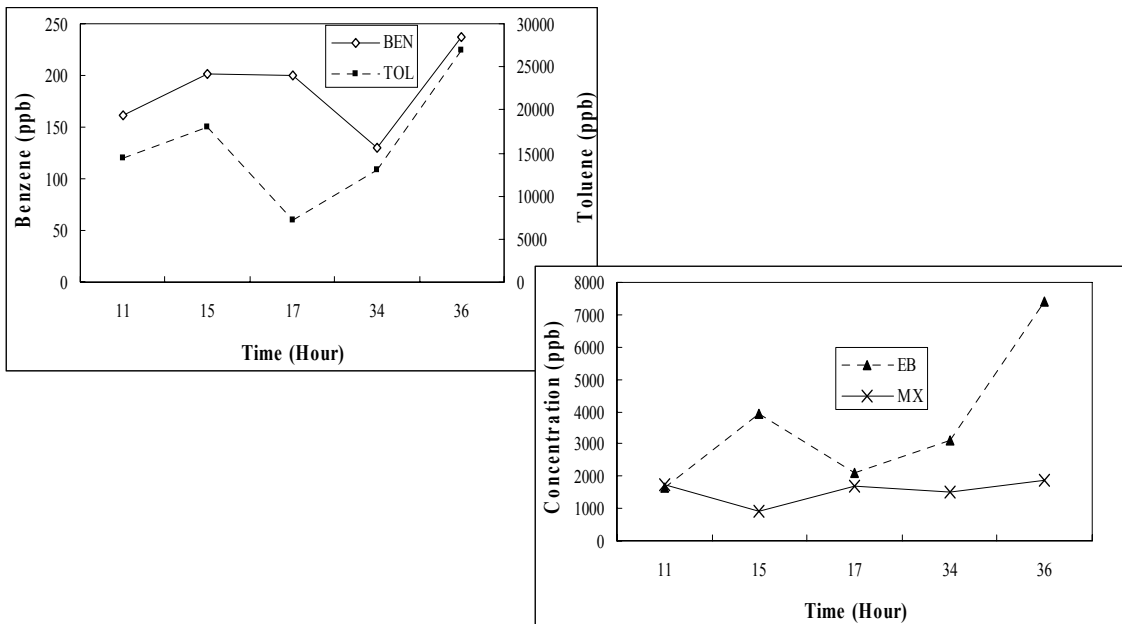
비교에서 명확하게 겨울철 VOC 농도가 상대적으로 우세한 것으로 나타난다. 이러한 경향성의 예외적 현상이 벤젠의 경우에 발견되지만, 그 농도 차이는 다른 것에 비해 현저하지는 않다.

그러한 차이점의 설명은 사실상 몇 가지 요인으로써 요약된다. 우선 2차 조사에 해당하는 여름 조사기간 동안에는 매립가스 중앙회수 장치의 건설을 위해, 대부분이 배출공이 폐쇄되는 과정에 있었다. 따라서 이 기간의 측정은 6개의 잔여 배출공으로 제한되었다. 그렇다고 해도 이러한 매립장 내부의 구조 변화가 VOC 배출양상의 변화를 전적으로 설명하기는 곤란하다. 여

름과 겨울로 대비되는 외기 및 일사량의 현저한 차이를 감안할 경우, 이러한 요인이 계절적인 분포 양상에 어느 정도 영향을 주었을 것으로 사료된다. 실제로 양 계절 중 배출공의 매립가스 배출속도는 겨울철에 상당히 높게 관측되었다. 이는 겨울철에 매립지 표면이 동결되면서, 매립가스의 배출이 배출공을 통해 집중되면서 촉진된 것으로 간주할 수 있을 것이다. 이처럼 겨울철 배출공의 LFG 배출속도의 현저한 증가는 결과적으로 배출량의 추산 결과에도 어느 정도 영향을 미친 것으로 사료된다.

이러한 해석을 뒷받침 할만한 근거는 다른 연구사례에서도 찾아 볼 수 있다. 백성욱 외(2004)가 경산시 소규모 매립지를 대상으로 연구한 결과, 매립지 표면의 VOC 배출량의 증감은 계절적인 요인에 따라 경향을 띠는 것으로 나타났다. 반면, 배출공을 통한 VOC 배출량 변

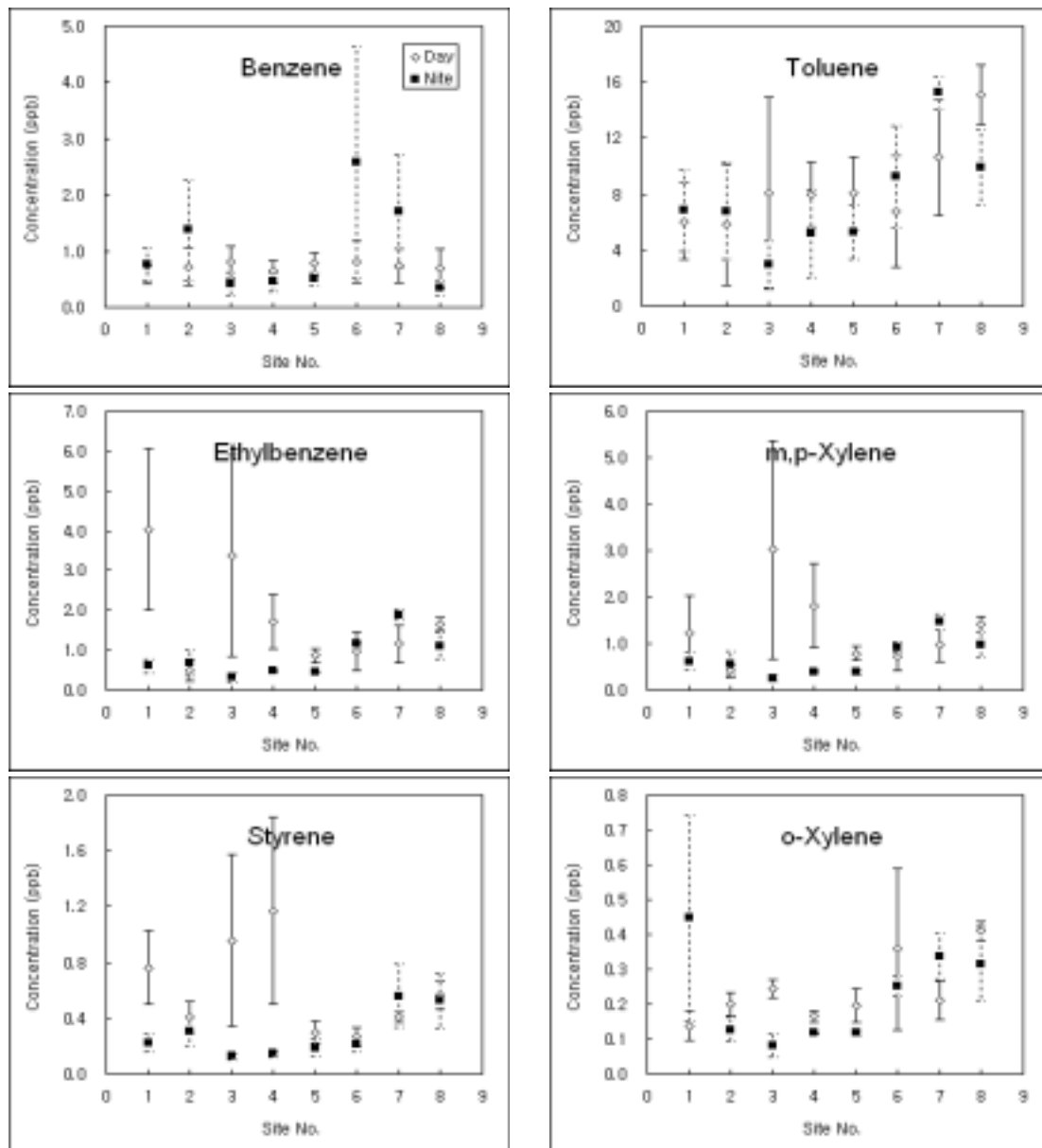
동은 계절 간 뚜렷한 구분없이 일정한 것으로 보고된 바 있다. 따라서 본 연구에서 운정동 매립장의 여름철 VOC 농도의 감소 현상은 중앙회수장치를 통한 안정화 작업과 더불어 다소 복합적인 요인들이 작용한 듯하다. 계절적 변화와 더불어 단주기적 변화를 살펴보았다. <그림 4>에는 배출공에서 배출되는 성분들의 시간적 농도변화의 경향성을 확인하기 위하여 운정동 매립장의 동일한 배출공에서 이를 동안의 시차를 두고 채취한 LFG의 분석결과를 비교한 것이다. 이러한 결과에 의하면, 실험의 종료 시점에 에틸벤젠의 농도가 일정규모 증가한 양상을 제외하고는 경시변화가 대체로 미미한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 이러한 비교가 비교적 짧은 시간에 진행되었는데, 보다 더 긴 시간적 주기로 이러한 양상을 비교하는 부분도 의미있을 것으로 보인다.



<그림 4> 시간에 따른 배출가스의 분포특성변화(2002년 겨울 WJ 지점의 분석결과로부터)

〈그림 5〉는 대기 중의 VOC 농도 변화를 관측하기 위하여, 대구 매립장내 반경 1km 이내의 여러 지점에서 주야간의 환경대기 중 농도를 비교한 결과이다. 결과의 신뢰성을 기하기 위해 각 지점에서 주야로 각각 3회에 걸쳐 농도 관측을 실시하였다. 각 관측 지점의 주야간

농도는 대체로 유사하거나 주야간이 다소 높게 관측되는 사례가 빈번한 것으로 나타났다. 특히 T-test를 통한 양기간대 간의 농도차에 대한 비교에서는 통계적으로 유의한 수준(80% 이하)에 해당하는 자료들이 모두 주야간 고농도인 것으로 나타났다.



〈그림 5〉 VOC 성분의 주야간 농도분포 변화비교(BC 매립장 분석결과로부터)

### 3. LFG의 배출량 산출

본 연구의 주요 목적 중의 하나는 매립가스로서 VOC의 배출량을 정확하게 정량하는데 있다. 이러한 과정은 결국 주어진 매립장 환경의 총체적 배출량을 평가하는데 있어서 기본적인 정보를 제공하게 된다. 이러한 목적으로 본 연구진은 모든 방향족 VOC와 주요 매립가스의 배출량을 조사하였고, 배출량 산출은 Kim & Kim (2002)에 의한 난지도 매립장 배출공의 수은 배출량 산출 사례와 유사한 방식으로 시도하였다. 본 연구에서 관측된 일부 지역 매립장의 경우, 비교적 단기간의 실험을 통해 자료의 수집이 이루어졌으며, 이를 이용한 배출량의 산출결과가 갖는 의미는 상대적으로 제한적일 수도 있다. 이를 감안하여, 산출된 배출량 수치는 서로 다른 매립장 환경과 연계하여 파악함으로써 매립장 조건에 따라 구분되는 LFG의 배출 정도를 평가하는데 대략적으

로 사용하였다. 각 매립장 지역의 VOC 배출 규모를 산정하기 위한 가장 기본적인 수준으로 실측을 통해 확보한 LFG의 농도에 배출공의 단면적과 배출속도를 고려하여 개별 배출공에 대한 VOC 성분의 배출량을 산출하였다. <표 4>에는 모든 조사대상 배출공에 대한 배출량의 요약 통계결과를 제시하였다. 이러한 매립장별 비교 결과에서 나타나듯이, 서로 다른 지역간의 LFG 배출량에 주목할 만한 큰 차이점이 발견되었다. BTEX를 기준으로 한 배출량의 범위는 0.05(삼풍동)~56.0kg/yr(대구시)로 두 지역간에 매우 큰 차이로 나타난다.

아울러 <표 3>의 LFG 간의 농도 비율에서 총 탄소수지(NMHC)에 대한 BTEX 농도 합 비율 역시 지역마다 다르게 나타나는 부분에 대해 유의할 필요가 있다. 하지만 모든 매립지역에서 BTEX의 구성 비율은 NMHC에 대비해 대단히 작은 것임을 알 수 있다.

<표 4> 매립장 배출가스 중 주요 방향족 성분의 분석결과(배출공별로 계산됨: 단위 = g yr<sup>-1</sup>)

	BEN	TOL	EB	MPX*	OX	STR
A. NJ	58.8±148	494±689	-	22.4±39.2	97.3±133	-
	0.17~902 (42)	1.33~2979 (43)	-	0.13~113 (15)	0.04~632 (41)	-
B. WJ [1] Winter	588±633	30952±46279	10308±14176	7360±5886	-	6152±4298
	62.7~2558 (14)	2394~180985 (14)	1636~59042 (15)	1227~22589 (15)	-	1811~14571 (15)
[2] Summer	1230±1186	4078±2279	2130±960	2190±714	4895±1836	169±66.1
	221~3018 (6)	2058~7131 (6)	917~3417 (6)	1167~3125 (6)	2289~6960 (6)	99.2~282 (6)
C. SP	1.28±1.57	19.8±13.5	7.64±6.88	14.2±10.2	9.36±11.4	-
	0.24~4.91 (10)	3.80~42.7 (10)	1.40~25.0 (10)	3.16~38.0 (10)	1.23~40.3 (10)	-
D. HC	1607±1390	4136±3757	3338±2515	4985±3973	3345±2557	143±38.81
	236~3196 (3)	627~8100 (3)	466~5147 (3)	784~8683 (3)	509~5474 (3)	99.2~173 (3)
E. NH*	100	22.1	62.3	79.4	56.8	282
F. BC	762±927 (405)	43627±57676 (14689)	4374±5545 (3927)	6637±8475 (5439)	557±467 (596)	653± 1076 (305)
	35.4~3148 (14)	136~117687 (14)	145~22325 (14)	218~34038 (14)	32.0~1200 (14)	14.9~4065 (14)

\* NH 지점의 경우, 시료는 중앙회수시설에서 관측함, 따라서 플럭스는 HC 지점의 배출공 규모와 동일하다고 가정하고 계산.



#### IV. 결론

본 연구진은 LFG의 형태로 배출되는 VOC의 분포특성을 규명하고 배출량을 산출하기 위해 다양한 매립지를 대상으로 일련의 현장 관측을 수행하였다. 보다 구체적으로는 VOC의 분포특성과 매립 시설의 상대적인 구성을 적절하게 평가하는 수단으로써, 주요 방향족 VOC성분의 농도와 주요 매립 가스의 배출량을 정량화하였다. 매립장의 상태를 설명할 수 있는 다양한 요인들이 절대적 및 상대적 관점에서 VOC성분들의 조성을 결정하는데 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다.

통상 악취 및 유해화학물질 등과 연관된 대기오염은 배출원 주변에 국한된 국지적인 현상이 일반적이다. 그렇지만, 중대규모 쓰레기 매립장에서의 악취와 BTEX류 등은 그 영향이 비교적 광범위한 지역에 영향을 미치게 된다. 지난 2002년, 성공적인 환경월드컵경기대회로 행사를 치루기 위한 서울시의 각종 대책은 매립지관리에 있어서도 국제적인 표본으로 비견될 만한 사례로 볼 수 있다. 상암경기장은 안정화가 끝나지 않은 세계 제1규모의 비위생적 쓰레기 매립장으로서 직선거리로 400여m 떨어진 위치에 세워진 경기시설이다. 이로부터 발생하는 각종 악취와 BTEX류, 그리고 메탄 등의 문제해결을 위하여 가스채집 파이프라인과 열원공장시설을 설치하여 매립지에서 발생하는 각종 가스를 수집하여 소각하고 있다. 한편 안정화가 종료될 때까지 녹화와 공원을 조성하여 생태공원으로서 시민들이 즐겨찾는 친근한 중요시설로 격상시키는 노력을 동시에 경

주하였다. 그러나 아직도 이 지역의 메탄농도는 서울시 평균 메탄농도보다도 약 1ppm정도 높은 수준으로 확인되고 있다. 향후 계획중이거나 현재 이용중인 거의 모든 쓰레기매립장이, 설계나 운영에 있어서 침출수의 처리에 집중되어 있는 경향이 강하고 각종가스는 현장에 파이프를 적당히 삽입하여 연소 처리하는 것이 현실이다.

현재 광화학오존에 대한 대비로서 광화학평가측정망(PAMS)을 설치하고 이의 농도와 변동패턴을 측정조사하고 있다. 그리고 또 한편, 이의 전구물질(precursor)에 대한 주 배출원으로 주목되는 자동차정비공장의 도장시설에 대한 감시감독에 대한 노력을 경주하고 있다. 본 조사에서도 확인되었듯이 매립장에서 BTEX류가 다량 배출되는 현상은, 앞서의 도장시설보다도 매립지에서의 배출총량이 훨씬 크기 때문에, 이에 대한 적절한 관리대책이 없으면 그러한 노력은 별 의미가 없다고 볼 수 있을 것이다. 따라서 매립장은 기본설계단계부터 가스포집시설과 연소시설이 기본시설로서 포함되어야 하며 이의 운영에 많은 노력을 기울일 필요가 있다고 평가된다. 우리에게는 불가피한 혐오시설로서의 매립장에 대한 적절한 관리노력과 배려는 해당 지역주민 및 이해당사자들에 대한 최소한의 보상이 될 것이며, 국가적으로도 악취와 유해화학물질의 통제를 위한 중요한 수단이 될 것이다.

#### 참고문헌

- 김기현 · 오상인 · 최여진 · 선유영 · 주도원, 2003a, “매립장의 배출가스 중VOC 성분의 조성과 배출 규모:

- 경산시의 소규모 매립장에 대한 연구”, 『한국환경 분석학회』, 6(1): 7~14.
- 김기현 · 최규훈 · 오상인 · 최여진 · 선우영 · 전의찬 · 주도 원, 2003b, “광주광역시 운정동 매립장지역에 대한 VOC 성분의 조성 and 배출특성에 대한 연구”, 『한국 분석과학회지』, 16(5): 407~417.
- 김민영 · 윤중섭 · 조석주 · 김기현, 2002, “배출공을 통한 VOC 성분의 배출규모와 특성에 대한 연구: 난지도 지역을 중심으로 한 사례연구”, 『한국환경분석 학회지』, 5(1): 13~24.
- 백성옥 · 김영민, 1996, “도시지역에서의 실내외 주변공 기 중 휘발성 유기화합물의 농도측정에 관한 연구”, 『대기환경공학회지』, 18(2): 181~197.
- 백성옥 · 송정한 · 김수현 · 원양수 · 공인철 · 김승현, 2004, “도시 쓰레기 매립장 지표면에서의 VOC 배출 특성”, 미발표논문
- Ebersold, P. and W. Young, 2002, “Here and now”, *Environmental Protection*, May 2002.
- Ito, A., I. Takahashi, Y. Nagata, K. Chiba, and H. Haraguchi, 2001, “Spatial and temporal characteristics of urban atmospheric methane in Nagoya City, Japan: an assessment of the contribution from regional landfills.” *Atmospheric Environment*, 35: 3137~3144.
- James, K. S. and M. A. Stack, 1997, “The impact of leachate collection on air quality in landfills” *Atmospheric Environment*, 34(8): 1713~1721.
- Kim, K. H. and M. Y. Kim, 2002, “The distributions of BTEX compounds in the ambient air of the Nan Ji Do landfill site in Seoul.” *Atmospheric Environment*, 36(14): 2433~2446.
- Kim, M. Y., Yun, J. S., Cho, S. J., Kim, K. H., 2002, “The emission of VOCs as landfill gas: A case study from Nan Ji Do abandoned landfill site.” *Korean Society for Environmental Analysis*, 5(1): 13~24.
- Schweigkofier, M. and R. Niessner, 1999, “Determination of siloxanes and VOC in landfill gas and sewage gas by canister sampling and GC MS/AES analysis.” *Environmental Science & Technology*, 33: 3680~3685.

원 고 접 수 일 : 2004년 2월 19일  
최종원고채택일 : 2004년 8월 16일