

매립장 지역의 VOC 조성 및 배출 특성 연구: 매립장에 대한 배출원 조사연구사업의 총괄 정리 2000-2004

김기현[†] · 최여진 · 선우영

세종대학교 지구환경과학과, 건국대학교 환경공학과

The Composition and Emission Characteristics of VOC from Major Waste Landfill Sites in Korea: a Comprehensive Report on a Four-year Study of LF Emission Inventory from 2000 to 2004

Ki-Hyun Kim[†], Ye-Jin Choi and Young Sunwoo

Dept. of Earth & Environmental Sciences, Sejong University

Dept. of Environmental Engineering, Konkuk University

In order to accurately evaluate the distribution and emission characteristics of volatile organic compounds (VOC) produced in the landfill environment, we conducted a series of field campaign to measure VOC emissions from a total of eight landfill sites located all across the Korean Peninsula. During the field measurements made from Sept. 2000 to Dec. 2004, we investigated VOC emission characteristics from 1 large-scale, 5 mid-scale, and 2 small-scale landfill sites. The results of our 4-years study are used to provide valuable information for the management of landfill facilities in Korea. If annual emission rates of VOC are compared in terms of toluene, the magnitude of its emission differed between the closed and active landfills. Whereas closed landfills show emission rates from a few tens to 500 g/yr, those of active ones were recorded as 1,000 to 40,000 g/yr.

Key words: landfill, VOC, methane, emission, emission inventory

1. 서 론

매립지로부터 배출되는 휘발성 유기화합물들 (volatile organic compounds: VOC)의 배출은 여러 가지 사회환경학적 문제를 야기한다. 매립장 환경의 VOC와 관련된 문제가 다각도로 주목을 받는 원인은 여러 가지로 요약할 수 있다. 이 중에서도 특히 매립지 표층 내부에서 활발하게 생성되고, 매립지의 지표면이나 배출공 등을 통해 배출되는 VOC 성분들이 주변 지역의 악취문제 유발 또는 대기질 저하를 초래할 수 있다는 점들을 간과할 수 없다¹⁾. 이러한 요인들로 인해, 매립장 지역은 환경학적 또는 보건학적 관점에서 적절한 관리방안을 요구하고 있다. 보다 구체적으로 이러한 목표에 도달하기 위해서는, 매립물의 양과 종류, 매립 방식, 매립종료시기, 매립 시설물의 규모 등과 같이 기

본적인 관리방식에 대한 정보 외에도 오염물질의 종류, 성상, 이들과 연계된 주요 환경인자에 대한 정보 등을 어떻게 VOC의 배출특성과 연계시키고 설명할 수 있는가의 여부가 중요하다. 이는 VOC와 같은 중요한 오염물질들의 배출규모를 결정하는 복합적인 변수로써 작용하기 때문이라고도 할 수 있다.^{2,3)}

본 연구진은 2000년에 예비적 성격의 연구로 서울시 난지도 매립장을 조사하였다. 이를 시발점으로, 2001년부터 2004년 기간까지 차세대 연구과제 사업의 수행을 통해 이러한 연구를 지속적으로 확장하였다. 본 연구진은 2001년부터 현재까지 전국에 산재한 다양한 규모의 매립장들을 대상으로 선정하여, VOC 배출특성을 규명하기 위한 연구를 지속하였다. 2003년까지, 광주시 운정동, 경상북도 경산시의 삼풍동, 제주시의 2개 지역(노형, 회천) 등에 산재한 매립장들에 대한 조사를 수행하

[†]To whom correspondence should be addressed.

였다.^{4,5)} 그리고 2004년에는 광역시 규모의 중규모 매립장에 해당하는 대구시 방천동 매립장지역에 대한 조사를 추가하였다. 연구의 최초 시점부터 2004년 초까지 확보한 모든 연구결과는 중간보고의 형태로 발표한 바 있다.⁶⁾ 그리고 연구사업의 마지막 해인 2004년도에는 새로이 신, 구 매립시설물이 인접한 거리에 공존하는 강원도 동해시의 2개 중규모 매립장을 주 연구대상으로 설정하고 매 계절별로 조사를 진행하였다.⁷⁾ 특히 이들 매립장의 경우, 설치 연한 외에도 계절적 변화라는 인자를 추가하여 보다 광범위한 시간적 기준에서 VOC의 배출특성을 조사하였다.

본문에서는 기존의 연구결과들과 2004년도에 새로이 추가한 신규 조사대상지역들에 대한 연구결과들을 포괄적으로 종합하여, 본 연구진이 2000년부터 2004년의 기간동안 수행한 차세대 연구사업의 결과를 총괄적으로 정리하고자 하였다. 본 연구의 결과를 바탕으로 다양한 매립시설물들에 대한 VOC 성분의 배출규모와 배출특성에 대한 총괄적인 설명을 제시하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 매립장 특성

본 연구에서는 총 8개의 매립장을 대상으로 4년 이상의 기간에 걸쳐 VOC의 배출특성을 조사하였다. 이러한 연구결과를 토대로 VOC 성분의 배출특성을 조사하였다. 각 매립장에 대한 정보는 Table 1에 제시하였다. 편의상 비교대상 매립장 중 매립면적이 2.72 km²로 규모가 가장 큰 난지도를 대형매립장으로 분류하였다. 이에 비해 1/10수준의 규모에 해당하는 작은 운정, 회천, 방천, 동해의 신, 구매립장은 중형으로 분류하였다.

회천, 방천, 동해의 신, 구매립장은 중형으로 분류하였다. 그리고 이들 중규모 보다 1/10수준으로 작은 삼풍, 노형매립장은 소형 매립시설물로 분류하였다. 또 다른 측면에서 전체 8개의 매립장 중 절반이 현재 매립이 진행 중이며, 나머지는 매립이 완전히 종료되거나 부분적으로 안정화 단계가 진행 중에 있다. 난지도 매립지는 전체 관측대상 매립지 중에 가장 큰 매립 면적으로 조성되었다. 전형적인 비위생 매립방식을 적용한 국내의 가장 오래된 매립지 중의 하나로 간주된다. 본 연구진은 난지도 매립장을 대상으로 수은과 같은 중금속 성분에 대한 관측을 실시한 바 있으며, 이와 동시에 VOC 성분의 주요 배출원으로써 매립장의 특징을 자세히 소개한 바 있다.²⁾ 매립이 종료된 난지도 매립장에 대한 현장관측은 매립지의 안정화 단계로 접어드는 2000년 9월에 집중적으로 실시하였다. 그 외에 삼풍과 노형, 동해 구매립장도 종료된 매립장으로 분류할 수 있다. 이와 대조적으로 중규모 매립장에 해당하는 운정, 회천, 방천, 동해 신매립장은 2005년 시점을 기준으로 모두 활발하게 매립이 진행중인 지역에 해당한다. 한편 운정동 매립장에 대한 관측은 VOC 배출량 산정을 위한 목적과 더불어 매립장 지역에 나타나는 계절간의 VOC의 배출 특성(여름과 겨울철)을 파악하고자 하는데도 의미를 두었다. 운정동 매립장에 대한 관측은 겨울(2002년 12월)과 여름철(2003년 7월), 두 차례에 걸쳐 실시하였다. 방천 매립장도 이와 유사하게 겨울(2004년 1월)과 여름철(8월)에 걸쳐 계절적 변화를 관측하였다. 그리고 가장 마지막으로 선정된 동해 매립장은 이미 매립이 종료된 구매립장과 이에 인접한 신매립장이 공존하는 중규모 시설물로서 양 지점 모두에 대

Table 1. A list of Korean landfill sites investigated in this study: detailed information of all sites is provided.

Order	Name	Short Name	Location	Operation type	Size	Operation period		Area (km ²)	Volume (m ³)	Study period (Sample collection)
						Start	End			
1	Nan Ji Do	NJ	Seoul	Nonsanitary	Large	1978	1992	2.72	1.10x10 ⁸	20 Sept.~4 Oct. '00
2	Woon Jung Dong	WJ	Gwang Ju	Mixed*	Medium	1991	Present	0.28	4.37x10 ⁶	9~11 Dec. '02/ 4~5 Aug. '03
3	Sam Poong Dong	SP	Kyung San	Mixed*	Small	1989	1997	0.03	2.90x10 ⁴	14~15 Jan. '03
4	Hoei Chun Dong	HC	Jeju	Sanitary	Medium	1992	Present	0.2	2.29x10 ⁶	22~23 July '03
5	No Hyung Dong	NH	Jeju	Nonsanitary	Small	1980	1992	0.08	1.66x10 ⁶	Same as above
6	Bang Chun	BC	Dae Gu	Sanitary	Medium	1990	Present	0.6	1900 t/d	13~16 Jan., 14~15 Aug. '04 15~16 May, 14~15 Jul.,
7	Dong Hae	DH-New	Dong Hae	Nonsanitary	Medium	1981	1999	0.32	0.60x10 ⁶	8~9 Oct., 6~7 Nov., 20~21 Dec., '04
8	Dong Hae	DH-Old	Dong Hae	Sanitary	Medium	1999	Present	0.35	0.32x10 ⁶	Same as above

*Mixed type denotes that non-sanitary treatment was applied in the early phase of operation, while sanitary one in the later phase.

하여 4개월(2004년 5, 7, 10, 11, 12월)에 걸쳐 계절적 경향성을 고르게 조사하였다.

위에 서술한 매립 규모와 매립 진행 여부 이외에도 매립 방식에서 공통점의 유무를 비교할 수 있다. 동해구매립장을 제외한 4개의 중규모 매립장은 모두 위생 매립 방식을 적용하여 매립이 진행중 또는 종료된 상태이다. 이에 반해, 난지도와 소규모 매립지에서는 대부분 매립 시작부터 종료까지 비위생 매립 방식이 주로 적용되었다. 아울러 조사 당시 삼풍매립장은 쓰레기 소각장 및 중간 집하장으로 활용되고 있었으며, 노형 매립장은 생태공원으로 변모시키기 위한 작업이 활발히 진행 중이었다. 참고로 운정 및 삼풍과 같은 곳은 초기에 비위생 방식에서 후기에는 모두 위생 방식으로 전환 운영이 이루어졌다.

2.2. VOC 시료의 채취

본 연구진은 모든 조사 대상 매립장들의 배출공으로부터 배출되는 매립가스 중 방향족 VOC 성분 및 주요 배출가스를 대상으로 관측을 실시하였다. 대부분의 분석대상 시료는 테들러 백을 이용하여 매립장에 산재한 배출공 (또는 중앙회수시설)으로부터 직접 채취하였다 (그러나 보조적으로 튜브방식의 채취를 결정한 경우도 있다). 대부분의 매립장에서 배출공에 대한 직접 채취를 원칙으로 적용하였지만, 제주에 위치한 두 개의 매립장에서는 복합적인 방식으로 시료를 채취하였다. 우선 최천매립장의 경우 현재 매립이 진행 중인 상태이며, 극소수의 배출공이 존재한다. 대부분의 배출가스는 발전을 위한 중앙회수 시설을 통해 회수되는 방식으로 매립가스의 배출이 통제되고 있는 실정이다. 따라서 이 지역에서는 중앙회수 시설과 잔여 배출공 두 개로부터 모두 시료채취를 실시하였다. 노형 매립장의 경우, 조사 당시 매립이 완전히 종료된 상태로, 매립장 지역에는 체육 및 공원시설이 조성 중이었다. 배출공이 완전히 제거된 이들 지역에서는 배출가스를 소각하기 위해, 소규모 단일 중앙회수 시스템이 잔류하였다. 따라서 이 지역의 경우, 이를 통해 배출가스 시료를 채취하였다.

매립가스 중 VOC 시료는 주로 저농도 시료의 분석용으로 사용되는 흡착튜브 대신 10(또는 3) 리터 크기의 테들러백을 진공형 간접채취시스템에 연결하여 채취하였다. 배출공으로부터 배출되는 VOC 성분들에 대한 시료채취와 동시에 이들의 배출량을 산정하기 위해 배출가스의 배출속도, 온도 등의 주요 환경변수도 유속 측정계 (Model 8330-MBC, TSI Instrument)를 이용

하여 직접 측정하였다. 또한 동시에 배출가스에 함유된 메탄, 이산화탄소 등 주요 화학적 성분에 대한 분석도 완료하였다. 아울러 대부분의 매립장에서 매립장 상층부의 대기에 대해서도 유사한 측정방식을 적용하여, 환경대기에 함유된 VOC성분의 농도분석을 위한 시료채취도 동시에 수행하였다.

2.3. 시료의 분석

배출공으로부터 배출되는 VOC 성분의 농도를 정확하게 측정하는 것은 배출계수의 산정 및 배출량을 산출하는데 있어서 가장 기본적인 과정에 해당한다. 본 연구에서는 배출공으로부터 배출되는 가스 (이하에서는 landfill gas의 약어로 LFG로 표기)에 함유된 방향족 VOC 성분들과 주요 가스상성분들의 분석에 주력하였다. 방향족 VOC 성분의 분석은 본 연구진이 선행연구에서 활용한 것과 같이 GC-FID (Model DS 6200, Donam Instrument, Korea)와 열탈착 전용기 (Markes International Ltd., UK)를 조합한 극미량 분석채취시스템을 활용하였다.⁸⁾

테들러 백에 담긴 시료는 전술한 열탈착 전용기 내부에 장착한 흡입펌프와 MFC (mass flow controller)를 통해 일정한 유량 (80 ml/min)으로 5분 정도 열탈착 전용기 내부로 주입시켰다 (총 분석 유량은 400 ml 수준). 곧 바로 펠티어 쿨러를 이용해서 -10°C로 유지하는 조건에서, cold trap에 분석대상 시료가 저온농축 (cryo-focusing)이 되도록 유도하였다. 이렇게 농축된 시료는 열탈착 과정 (320°C에서 10분간)을 거친 후, GC (gas chromatography) column (DB-VRX, 60 m × 0.32 mm × 1.8 μm, SGE사 제조)으로 주입시켜, 최종적인 성분 분석을 수행하였다. 이때 GC의 oven 조건은 초기온도 50°C에서 5분간 유지한 후, 6 °C/min으로 230°C까지 가열시키고, 최종온도에서 5분 동안 유지하였다. GC 분석을 위한 가스조절은 다음의 조건으로 유지하였다: H₂ = 30; N₂ (Makeup gas) = 30; Air = 300 ml/min.

본 연구에서 방향족 성분들의 검량은 gravimetric 방식으로 준비한 표준 시료(EPA Volatile Organic Compounds Mix2, SUPELCO)를 기화시키는 방식으로 접근하였다. 이렇게 준비한 작업용 표준가스의 주입량을 변화시키며, 3개 농도대 (10, 20, 40 ng)에서 반복적으로 분석하는 방식으로 검량선을 확보하였다. 이와 같은 반복분석의 결과로부터 상대표준오차를 산출하면, 모든 성분들에서 정밀도는 약 9% 이하를 유지하는 것

으로 나타났다. 본 분석시스템의 정확도는 TO-14 표준 가스 등을 이용하여 비교 분석한 결과, 5% 내외로 확인되었다. 절대량을 기준으로 할 때, 본 연구에 활용된 GC-FID 시스템은 benzene을 기준으로 대략 0.1 ng 수준의 검출한계를 유지하였다. 본 논문에서 제시한 TVOC의 농도는 GC/FID에서 검출한 모든 VOC 성분 중 개별적으로 정성이 가능한 성분은 각각 개별 성분으로 정량을 하고, 나머지 성분은 모두 톨루엔 검량선을 기준으로 정량한 값이다.

비록 초기 연구에는 주사기형 열탈착시스템 (SPIS, Donam Instrument)을 사용하였지만, 대부분 매립장의 시료분석은 Markes사의 Unity열탈착기를 연계한 GC-FID 방식을 이용하였다. 그러나 예외적으로 운전동 매립장의 1차 조사기간 (겨울철)에 분석한 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 이 방식의 경우, 기기의 특성상 EPA 601 방법에 따라 다수의 할로젠족 방향족 성분, EPA 602 방법의 방향족 성분들, EPA 624 방법에 의한 기타 성분들을 포괄적으로 포함하는 40여 가지 성분을 분석하는 것이 가능하다. 이러한 방식의 경우, 현장시료에 대한 3회 반복분석 자료를 토대로 정밀도를 산출하면, BTEX 성분들은 대략 5% 범위의 정밀도를 유지하였다. GC-PID 시스템의 분석특성은 GC-FID 시스템과의 상호 비교방식으로 검증하였다. 양 시스템의 분석 결과는 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.⁹⁾ GC-PID시스템은 벤젠을 기준으로, 약 50 ppb 수준의 검출한계를 보였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 주요 방향족 VOC 성분의 농도분포

Fig. 1에는 본 연구의 대상이 된 주요 매립장 시설물들의 개괄적인 위치를 도식하였다. Table 2와 Table 3에는 BTEX를 위시한 주요 방향족 VOC 성분들을 중심으로 배출공의 LFG시료와 매립장 주변의 환경대기 시료들에 대한 분석결과를 통계 요약하였다. 그리고

Fig. 2~5에는 운전 (WJ), 방천 (BC), 동해의 신매립장 (DH-New), 동해 구매립장 (DH-Old)들에서 관측한 주요 VOC 성분들의 농도 분포를 관측이 이루어진 배출공 별로 제시하였다. Table 2의 결과에 의하면, 매립장의 가동 여부 및 연한 등에 따라 배출공 내부의 농도에 상당 수준 차이가 난다는 것을 확인할 수 있다. 톨루엔과 같은 주요 성분을 중심으로 매립장간의 농도를 비교하면, 다음과 같은 경향성이 확인되었다.

대체로 매립이 진행 중인 운전, 방천, 회천, 동해 신매립장 등의 경우, 배출가스에서 관측한 VOC의 농도가 대체로 수~수 십 ppm을 기록하는 것으로 나타났다. 이러한 농도 수준은 이미 국내외를 막론하고, 매립이 진행 중인 매립장에서 일반적으로 발견되는 VOC의 고농도 수준에 가깝다. 참고로, 독일의 두 도심 지역 매립장을 대상으로 방향족 VOC를 관측한 결과에 의하면, 벤젠의 농도가 수백 ppb에 이르고, 다른 성분들은 수~수십 ppm에 달하는 것으로 나타났다.¹⁰⁾ 이에 반해, 매립이 종료된 삼풍, 노형, 동해 구매립장 등에서는 대체로 수 십에서 수 백 ppb의 농도를 기록하였다. 그렇지만, 동해 구매립장에서 확보한 배출공의 농도는 상당히 가변적인 변화가 일어날 가능성을 보여 준다. 여름철에 수 십 ppb 수준을 유지하지만, 가을철 결과는 이보다 10여배 더 증가한 농도를 보여 주었다.

배출공에 대한 조사와 함께 환경대기 중의 농도를 분석한 결과에 의하면 매립이 활발하게 진행되는 매립장 주변 및 인근 지역에서 관측한 VOC농도는 대체로 VOC 오염이 심한 산업단지와 같은 곳에서 발견되는 수준을 훨씬 더 상회하는 것으로 확인되었다 (Table 3). 예를 들어, VOC 오염의 가장 핵심적인 성분이라고 할 수 있는 톨루엔과 같은 성분의 농도를 비교하면, 큰 차이를 볼 수 있다. Na et al. (2001)이 산업재해가 심한 울산이나 여천단지 지역에서 관측한 톨루엔의 평균농도는 각각 3.9와 2 ppb를 기록하였다.¹¹⁾ 본 연구에서 관측한 대부분의 매립장에서 이러한 농도를 훨씬 상회하는 10 ppb에 인접하거나 또는 그 이상 수준이란 점을 감안하면 매립장 지역의 VOC 오염이 심각하다는 것을 알 수 있다. 특히 광주의 운전동 매립장 내부에서 관측한 겨울철 기간의 환경대기 중 농도가 1 ppm을 초과하는 극단적인 수준으로 나타나 여타 모든 분석결과들과는 100여배 차이를 보였다.

Table 4A에는 각 매립장별 메탄, 이산화탄소, NMHC를 위시한 주요 매립가스의 농도를 요약 제시하였다. 그리고 Table 4B에는 주요 성분들과 VOC 성분

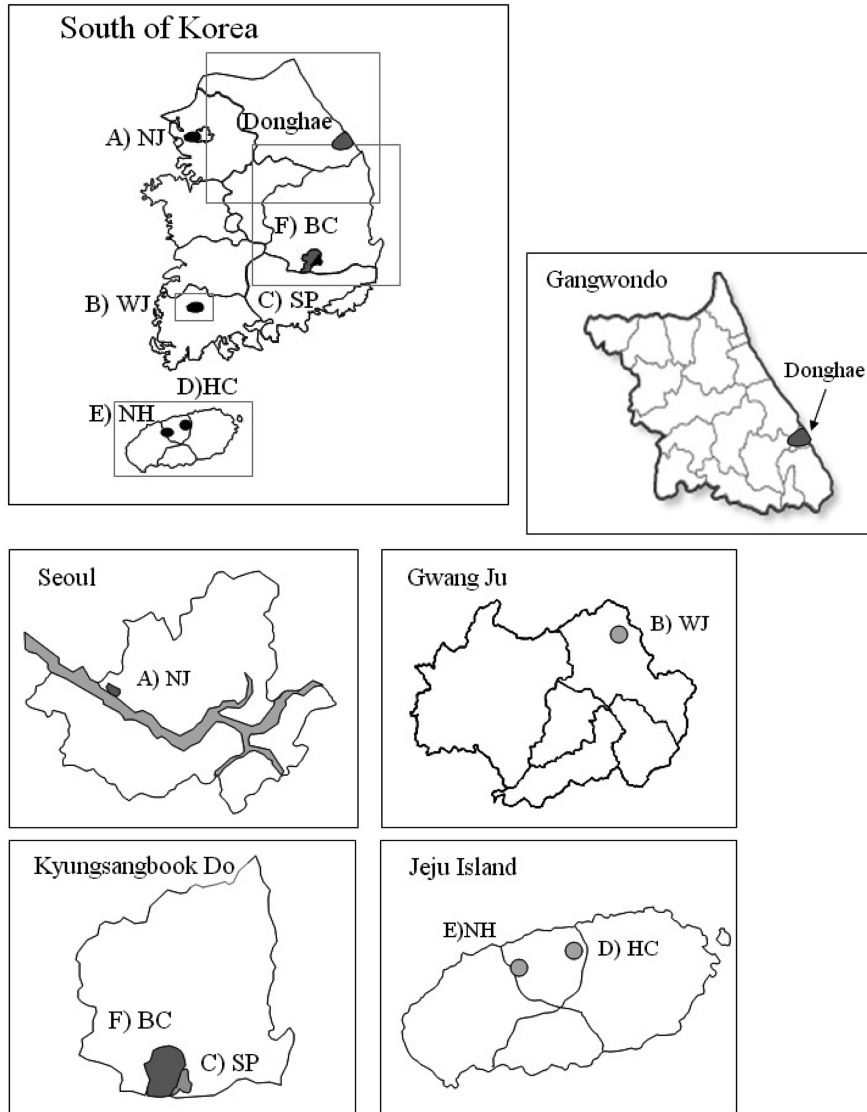


Fig. 1. A geographical location of five landfill sites investigated in this study (For details of each study site, refer to Table 1).

들간에 형성되는 농도비 값 등을 다각도로 제시하였다. 매립가스들 간의 상대적인 농도분포를 비교해 보면, VOC 성분들에 대한 매립장별 특성을 뚜렷하게 반영하는 것으로 나타난다. 실제로 선행연구들의 결과를 보면, 매립가스의 구성 및 농도를 결정하는 요인으로는 매립물의 성분, 매립지 내부의 수분상태, 분해 진전단계, (가스추출율에 따른) 가스 구성의 변동 등이 중요한 것으로 보고된 바 있다.¹⁰⁾ 앞서 살펴본 바와 같이, 각각의 매립장에서 관측한 VOC의 배출농도가 매립장의 상태를 진단할 수 있는 중요한 인자로 간주할 수

있다(Table 4A).

본 연구 결과에서 메탄농도는 매립장의 VOC 배출농도와 어느 정도 강한 연계성을 찾을 수 있다. 대체로 매립이 종료된 매립시설물들에서는 앞서 VOC의 결과와 유사하게 상당히 낮은 수준의 메탄농도를 보이는 것으로 알려져 있다. 그렇지만 일부 매립장에서는 이러한 일반적인 경향과 달리, 고농도의 메탄이 종종 발견되는 경우도 나타났다. 난지도지역이나 노형 매립장의 경우, 메탄 농도가 다소 예외적으로 고농도를 유지하는 것으로 발견되었다. 그러나 삼풍 및 동해 구매립장의 경우,

Table 2. A statistical summary of major aromatic VOC concentrations determined as LFG for all landfill sites investigated in this study (all units in ppb).

Landfill ID	BEN*	TOL	EB	MPX*	OX	STR
A. NJ	31.8 ± 61.8(14.9) ¹ 0.22~320(52) ²	259 ± 287(204) 3.58~1431(53)	- -	10.4 ± 16.9(4.12) 0.16~69.4(25)	45.1 ± 61.1(28.3) 0.14~311(51)	- -
B. WJ	234 ± 143(201)	10883 ± 10355(7218)	2978 ± 2286(2286)	2362 ± 1553(2142)	-	2590 ± 1501(3015)
[1] Winter	35~479(14)	1018~32316(14)	604~8133(15)	454~7072(15)	-	895~4795(8)
[2] Summer	924 ± 1054(494) 135~2767(6)	2610 ± 2354(1484) 661~6341(6)	982 ± 498(999) 412~1723(6)	1045 ± 522(960) 509~1794(6)	- -	91.5 ± 79.5(56.0) 37.3~248(6)
C. SP	2.51 ± 3.07(1.24) 0.49~8.62(10)	34.4 ± 28.7(24.5) 6.03~102(10)	11.1 ± 9.92(8.40) 2.47~32.3(10)	10.2 ± 7.33(8.56) 3.22~24.5(10)	13.4 ± 15.1(8.7) 2.43~52(10)	- -
D. HC**	828 ± 718(697) 184~1603(3)	1808 ± 1529(1566) 414~3444(3)	1264 ± 874(1624) 267~1899(3)	946 ± 691(1012) 225~1602(3)	1269 ± 886(1495) 292~2020(3)	65.8 ± 32.7(58.6) 37.3~101(3)
E. NH	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)
[1] Winter	126~7125(14)	411~253370(14)	686~10683(14)	472~8374(14)	64.7~1993(14)	40.0~8844(14)
[2] Summer	2674 ± 2186 831~8529(10)	39593 ± 37690 2123~90965(10)	6954 ± 3027 2988~11159(10)	401 ± 2164 1588~7659(10)	2561 ± 1488 107~4732(10)	284 ± 102 95~417(10)
G. DH-New	642 ± 405	5141 ± 3101	1991 ± 745	1081 ± 394	536 ± 273	168 ± 94
[1] Spring	285~1220(4)	1962~9036(4)	996~2703(4)	693~1519(4)	244~820(4)	77~264(3)
[2] Summer	5091 ± 3695 1276~8611(4)	6142 ± 6749 719~15984(4)	3353 ± 3216 568~6320(4)	2556 ± 1719 374~4503(4)	1760 ± 1062 212~2587(4)	488 ± 263 138~719(4)
[3] Fall	171 ± 150 17.2~329(4)	1364 ± 899 390~2148(4)	1778 ± 1226 133~3030(4)	777 ± 501 113~1312(4)	80.3 ± 85.9 0.12~184(4)	707 ± 450 74.4~1130(4)
[4] Winter	139 ± 112 16.9~238(3)	538 ± 363 133~834(3)	1293 ± 1013 124~1909(3)	536 ± 435 88.2~957(3)	142 ± 123 18.3~264(3)	1515 ± 1351 42.3~2696(3)
H. DH-Old	29.5 ± 10.8	303 ± 49.5	107 ± 62.5	123 ± 70.9	53.3 ± 24.4	60.7
[1] Spring	22.8~42(3)	246~333(3)	51.1~175(3)	49.4~191(3)	25.5~71.2(3)	60.7(1)
[2] Summer	7.73 ± 0.69 7.31~8.53(3)	21.1 ± 8.45 13.5~30.2(3)	19.4 ± 21 0.94~42.3(4)	12.6 ± 13 0.18~26.2(3)	9.34 ± 9.09 1.77~19.4(3)	2.93 ± 2.03 1.26~5.19(3)
[3] Fall	0.44 ± 0.15 0.27~0.6(4)	8.83 ± 5.04 2.51~13(4)	4.33 ± 1.79 1.75~5.62(4)	2.96 ± 1.17 1.22~3.67(4)	2.59 ± 2.66 0.37~6.15(4)	1.89 ± 0.76 0.76~2.40(4)
[4] Winter	52.7 ± 101 0.35~203(4)	582 ± 753 6.78~1613(4)	174 ± 226 3.02~488(4)	128 ± 180 2.36~387(4)	83.9 ± 158 0.43~321(4)	96.1 ± 133 1.41~286(4)

Superscript 1 denotes mean and 1SD with the median value in the parenthesis. Superscript 2 shows the concentration range with the total number of measurements. *Short names of BEN through STR denote benzene, toluene, ethylbenzene, m, p-xylene, o-xylene, and styrene, respectively.

**In the case of HC site, the values were derived from 3 LFG samples that cover both vent pipes (2 sites) and a centralized collection system.

다른 지역과는 현저한 차이를 보일 정도로 % 단위 또는 그 이하 수준을 유지하는 것으로 나타났다. 메탄 농도가 현저하게 낮은 매립장들에서는 예외 없이 산소 농도가 대기 중의 농도 (20%)에 근접한 수준으로 나타났다.

VOC성분의 농도자료로부터 성분별 농도비를 비교해도, 여러 가지 사실을 유추할 수 있다 (Table 4B). 매립이 진행 중인 매립장에는 톨루엔/벤젠의 비율이 최저

1.24 서 최고 55배까지 확인된다. 특히 겨울철에 운영, 회전 매립장의 톨루엔/벤젠 비율은 50 이상으로 상대적으로 매우 높은 것이 확인되었다. 이에 반해, 매립이 종료된 매립장에서는 대부분 10정도의 비율을 보였다. 종료된 매립장에서는 톨루엔이 정량적인 관점에서 가장 중요하지 않다는 점을 감안하면, 벤젠과 같은 성분의 유입은 상대적으로 더 강하게 진행되었을 것이라는 점을 추정할 수 있다. 일반 대기 중에서 양자간의 농도

Table 3. A statistical summary of aromatic VOC compositions determined from ambient air samples collected in the vicinity of landfill sites.

Landfill ID	BEN*	TOL	EB	MPX*	OX	STR
A. NJ	0.96±0.65(0.72) 0.28~3.24(28)	8.99±6.10(6.32) 0.27~22.6(28)	- -	0.89±0.72(0.66) 0.00~2.78(28)	0.21±0.20(0.16) 0.07~0.70(10)	- -
B. WJ	13.0±19.9(2.44)	1023±1650(110)	250±401(26.3)	151±241(16.1)	184±300(15.9)	-
[1] Winter	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) 0.20~1.97(6)	9.18±9.63(6.03) 2.74~28.3(6)	1.86±2.86(0.76) 0.46~7.68(6)	0.88±0.18(0.86) 0.67~1.17(6)	0.72±0.26(0.62) 0.49~1.18(6)	- -
D. HC**	0.79±0.66(0.72) 0.15~1.83(5)	9.59±5.01(8.80) 3.63~16.2(5)	10.4±7.17(8.52) 2.74~18.7(5)	9.86±6.87(7.82) 2.66~18.2(5)	15.3±10.8(12.9) 3.75~27.1(5)	3.59±2.75(3.85) 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)
[1] Winter	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)
[2] Summer	- -	- -	- -	- -	- -	- -
G. DH-New	3.35±2.06	15.3±12.4	1.96±1.30	4.00±2.70	0.352	0.51±0.44
[1] Spring	0.58~6.58(9)	2.50~35.98(9)	0.44~4.14(9)	1.05~8.19(9)	0.352(1)	0.18~1.42(9)
[2] Summer	8.34±12.6 1.78~37.9(8)	11.2±7.63 4.27~29.3(8)	1.72±0.60 0.97~2.63(8)	2.01±0.59 1.19~3.19(8)	3.11±6.74 0.20~19.8(8)	1.02±0.30 0.67~1.70(8)
[3] Fall	0.47±0.07 0.43~0.58(4)	2.72±0.65 1.92~3.37(4)	0.45±0.13 0.28~0.58(4)	1.11±0.28 0.77~1.42(4)	0.45±0.13 0.35~0.62(4)	0.49±0.11 0.39~0.64(4)
[4] Winter	0.56±0.06 0.48~0.61(4)	23.11±8.08 14.69~32.4(4)	35.2±8.87 27.89~48.1(4)	31.1±7.78 25~42.4(4)	17.8±4.10 14.8~23.7(4)	0.48±0.54 0.12~1.26(4)

Table 4. A statistical summary of the major LFG components and their concentration ratios (all units in %).

A. The concentrations of major LFG components

	Major gases in percent unit			
	NMHC	CH ₄	CO ₂	O ₂
A. NJ	-	58.0±4.38(59.9) 50.4~63.4(44)	27.7±3.15(29.3) 20.7~31.0(44)	-
B. WJ	0.51±0.38(0.39)	26.8±17.7(26.0)	18.9±9.36(17.2)	9.40±4.64(10.0)
[1] Winter	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) 0.25~1.01(6)	28.6±13.5(25.9) 12.9~44.8(6)	21.4±11.2(18.0) 8.10~35.2(6)	7.85±5.24(9.40) 1.30~13.6(6)
C. SP	0.06±0.10(0.01) 0.00~0.32(10)	1.53±3.01(0.20) 0.00~9.41(10)	3.35±4.95(0.15) 0.00~13.4(10)	17.4±4.41(20.3) 8.40~20.5(10)
D. HC**	0.80±0.36(1.00) 0.38~1.01(3)	38.1±11.5(44.7) 24.8~44.8(3)	29.7±9.24(34.8) 19.0~35.2(3)	4.83±7.59(0.50) 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)
[1] Winter	0.28~1.25(14)	15.5~52.4(14)	23.0~44.9(14)	0.60~8.80(14)

Table 4. Continued

F. BC		1.63 ± 0.88	38.0 ± 15.5	41.3 ± 17.9	28.8 ± 12.4
[2] Summer		0.32~3.08(10)	9.84~57.1(10)	10.2~63.4(10)	6.70~41.1(10)
G. DH-New		-	15.2 ± 11.1	12.9 ± 6.19	-
[1] Spring		-	3.20~26.8(4)	5.79~20.83(4)	-
[2] Summer		-	3.82 ± 2.35	2.37 ± 1.22	-
		-	0.66~6.22(4)	0.77~3.70(4)	-
[3] Fall		-	24.5 ± 9.46	18.8 ± 7.5	-
		-	13.3~33.3(4)	12.1~28.2(4)	-
[4] Winter		-	1.51 ± 1.19	1.08 ± 0.67	-
		-	0.16~2.41(3)	0.34~1.65(4)	-
H. DH-Old		-	0.01 ± 0.01	0.07 ± 0.02	-
[1] Spring		-	0.001~0.02(3)	0.06~0.10(3)	-
[2] Summer		-	0.01	-	-
		-	0.01(1)	-	-
[3] Fall		-	0.10	-	-
		-	0.10(1)	-	-
[4] Winter		-	0.10	-	-
		-	0.10(1)	-	-

B. The volume-to-volume ratios between major components.

	T/B	Σ BTEX/NMHC*	CH ₄ /NMHC
A. NJ	$9.84 \pm 1.67(10.2)$ 7.89~11.7(5)	-	-
B. WJ	$55.4 \pm 30.3(53.9)$ 7.63~103(13)	$1.88 \pm 1.66(1.40)$ 0.57~4.16(4)	$53.7 \pm 16.6(56.6)$ 34.0~67.6(4)
[2] Summer	$6.28 \pm 4.41(6.07)$ 0.75~12.9(6)	$1.18 \pm 0.63(1.10)$ 0.53~2.17(6)	$48.47 \pm 11.1(48.2)$ 32.0~65.2(6)
C. SP	$39.8 \pm 53.8(15.6)$ 5.06~174(10)	$0.85 \pm 2.42(0.02)$ 0.00~7.30(9)	$1.04 \pm 0.03(1.03)$ 1.01~1.09(9)
D. HC**	$2.59 \pm 0.07(2.62)$ 2.51~2.63(3)	$0.83 \pm 0.68(0.90)$ 0.12~1.48(3)	$51.4 \pm 11.9(44.7)$ 44.4~65.2(3)
E. NH	0.22	0.04	32.0
F. BC	$52.6 \pm 56.5(37.4)$ 1.35~207(14)	$0.09 \pm 0.10(0.06)$ 0.00~0.31(14)	$59.6 \pm 17.6(57.8)$ 31.1~108(14)
[2] Summer	15.8 ± 13.6 0.79~36.5(10)	0.03 ± 0.01 0.005~0.04(10)	29.08 ± 16.97 9.46~61.5(10)
G. DH-New	8.65 ± 4.60 4.98~15.4(4)	-	-
[1] Spring		-	-
[2] Summer	1.24 ± 0.64 0.57~1.86(3)	-	-
[3] Fall	21.4 ± 20.8 1.19~46.9(4)	0.13 ± 0.10 0.01~0.25(4)	6.35 ± 3.16 3.24~9.57(4)
[4] Winter	5.13 ± 2.38 3.50~7.86(3)	-	-
H. DH-Old	10.94 ± 3.29 7.94~14.5(3)	-	-
[1] Spring		-	-
[2] Summer	2.68 ± 0.85 1.85~3.54(3)	-	-
[3] Fall	20.1 ± 11.5 9.42~35.5(4)	-	-
[4] Winter	19.5 ± 28.9 3.5~62.9(4)	-	-

*Computation based on carbon based concentration (such as ppb C or ppm C); results are shown in percent unit.

비가 4~5배 수준 내외에 유지된다는 점을 감안하면, 이러한 차이는 현격하다. 결과적으로 매립시설물에서 배출되는 여러 가지 VOC 성분 중에서 톨루엔의 배출은 중요한 인자로 간주할 수 있을 것이다.

3.2. 계절적 요인에 따른 VOC 성분의 농도분포

계절적인 기준으로 매립장 배출공의 VOC측정결과를 해석할 수 있는 경우는 광주의 운정, 대구의 방천, 동해의 신규 매립장 등을 위시한 4개 매립장에 국한된다. 운정과 방천 매립장의 경우, 기온의 차이가 가장 큰 겨울과 여름에 걸쳐 관측이 이루어졌다. 이들 매립장의 결과는 각각 Fig. 2와 Fig. 3에 제시하였다. 이에 반해, 신규 매립시설물이 가까운 거리에 인접한 동해 매립장은 봄, 여름, 가을, 겨울의 4계절에 걸쳐 고르게 이루어졌다(Fig. 4, 5). 이들 3개 지역의 4개 매립시설물들에 대한 분석결과들은 매립장 배출공을 통해 배출되는 VOC 성분의 농도 분포를 계절적요인과 연계하여

설명할 수 있다.

각 지역별 관측결과들은 지역별 또는 계절별로 상당 수준 차이를 보이는 것으로 나타났다. 예를 들어, 광주 운정의 경우, 거의 예외없이 겨울철의 농도가 여름철보다 높게 나타난다. 참고로 톨루엔의 경우, 겨울철 10 ppm 수준에서 여름철에는 그 보다 3, 4배 줄어든 2.6 ppm 농도로 나타났다 (Fig. 2). 방천의 경우, 그 결과가 조금 더 복잡해진다. 다수의 성분들이 운정의 결과와 같이 겨울철에 높게 나타난다. 특히 톨루엔은 겨울철에 여름철보다 2배 높게 나타난다. 그러나 벤젠, 에틸벤젠과 같은 성분들은 여름철에 더 높은 농도를 보였다 (Fig. 3~5). 동해 신 매립장의 경우, 스티렌을 제외하고는 모든 성분들이 여름철에 더 높은 것으로 나타났다. 벤젠과 자일렌류는 여름철 농도대 다음으로 봄, 겨울, 가을의 농도 순으로 높은 농도를 보였지만, 그 밖에 다른 성분들은 조금씩 다른 차이를 보였다. 이에 반해, 동해 구매립장의 경우, 겨울철에 모든 성분이

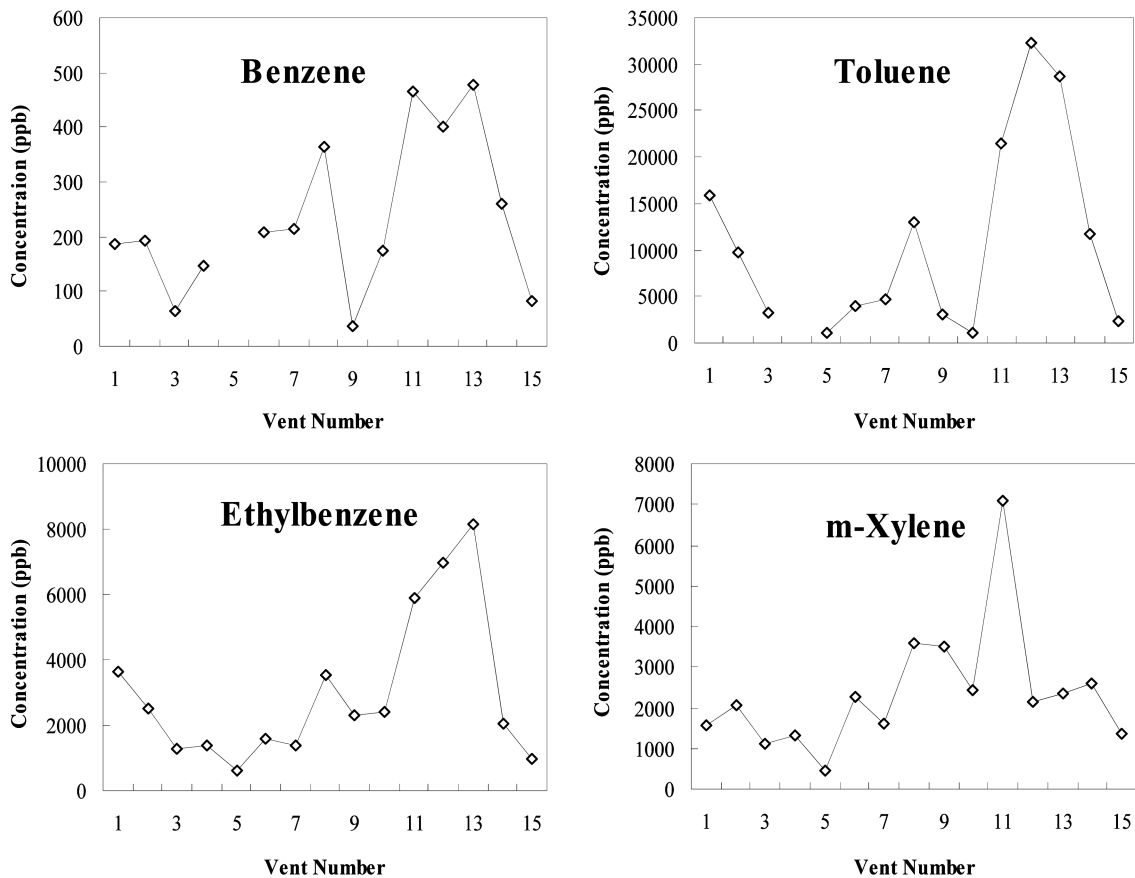


Fig. 2. The LFG concentration of major aromatic VOC determined from the WJ site during winter 2002 period are compared as a function of vent number.

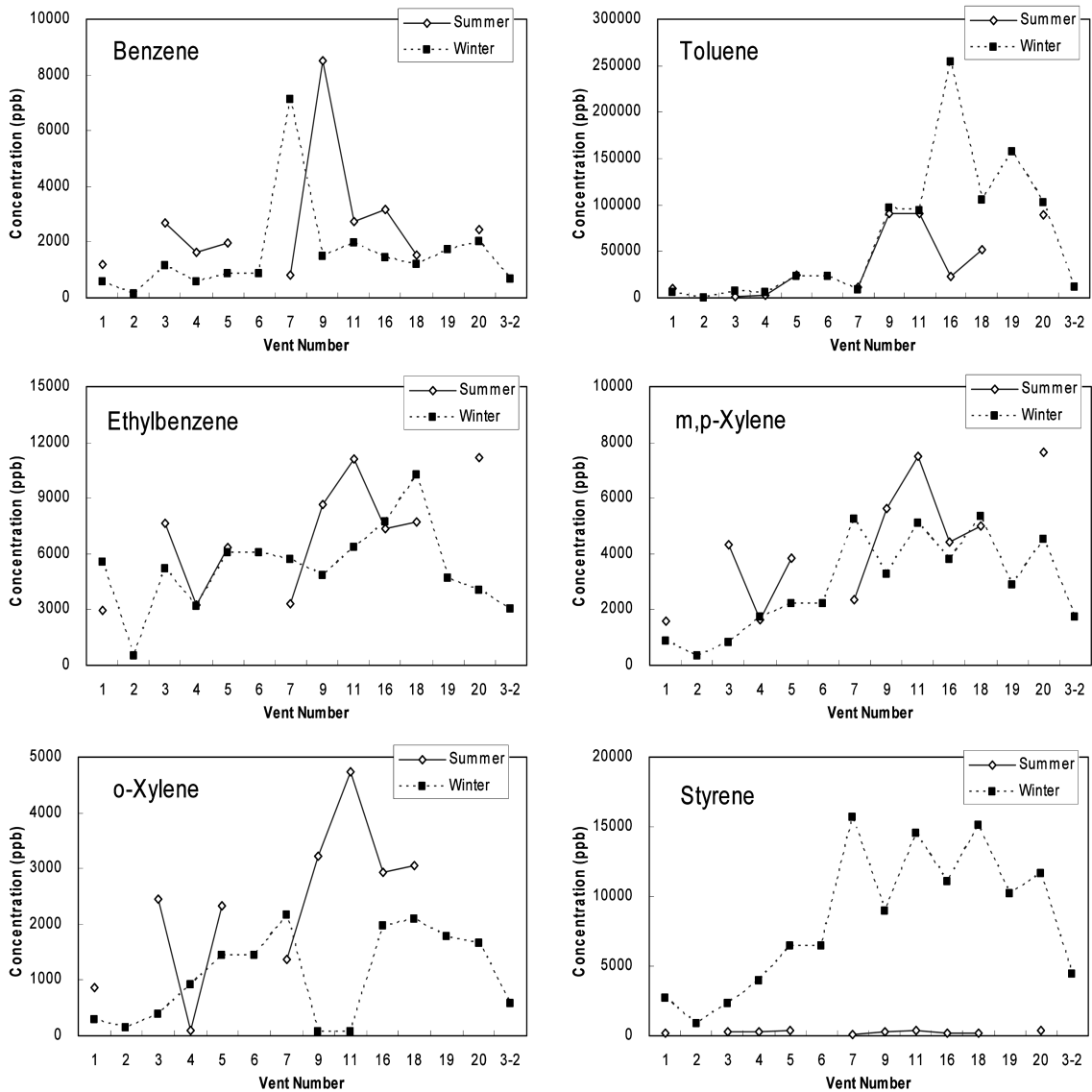


Fig. 3. The LFG concentration of major aromatic VOC determined from the BC site between winter (Jan) and summer (Aug.) 2004 period are compared as a function of vent number.

가장 높은 농도를 보이고, 그 뒤에 봄, 여름, 가을 순으로 따랐다.

동해 신매립장의 자료를 제외하면, 대체적으로 겨울철에 관측한 VOC의 배출농도가 상대적으로 높은 양상을 취하는 것으로 나타난다. 이러한 경향을 벗어나는 예외적 현상이 벤젠의 경우에 발견되기도 한다. 그렇지만, 그 농도 차이는 다른 것에 비해 뚜렷하지는 않다. 여름과 겨울로 대비되는 외기 및 일사량의 현저한 차이를 감안할 경우, 이러한 요인이 계절적인 분포 양상에 어느 정도 영향을 미칠 가능성을 배제할 수 없다.

실제로 양 계절 중 배출공의 매립가스 배출속도는 겨울철에 상당히 높게 관측되었다. 이는 겨울철에 매립지 표면이 동결되면서, 매립가스의 배출이 배출공을 통해 집중되면서 촉진되었을 가능성을 배제할 수 없다. 이처럼 겨울철 배출공의 LFG 배출속도가 현저하게 변화하는 현상은 결과적으로 배출량의 추정 결과에도 어느 정도 반영될 것으로 사료된다.

이러한 해석을 뒷받침 할만한 근거는 다른 연구사례에서도 일부 찾아 볼 수 있다. 백성욱 외 (2003)가 경산시의 소규모 매립지를 대상으로 연구한 결과를 보면,

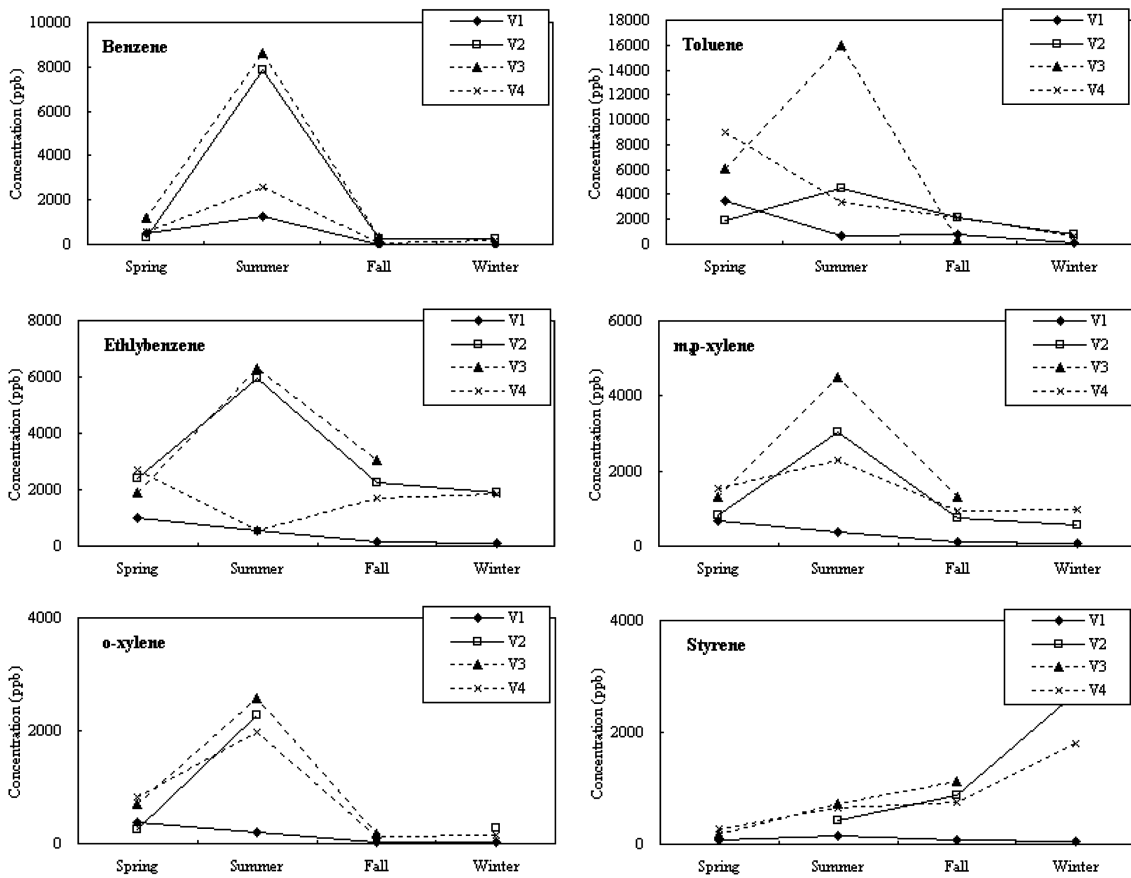


Fig. 4. Comparison of major aromatic VOC in LFG samples, collected from the new landfill site in Dong Hae, is made as a function of vent number.

매립지 표면의 VOC 배출량이 계절적인 요인에 따라서도 어느 정도 증감의 경향을 띠는 것으로 나타났다.¹²⁾ 특히 여름철의 경우 강수가 집중되어서, 지표면이 젖은 상태에서 토양 공극을 채운 수분의 영향으로 지표면에서의 VOC 배출이 억제되는 반면, 배출공로의 유입량이 상대적으로 증가하였을 가능성도 배제할 수 없다. 그리고 운정지역의 경우, 2차 조사에 해당하는 여름철에는 매립가스 중앙회수 장치의 건설을 위해, 대부분의 배출공이 폐쇄되는 과정에 있었다. 따라서 이 기간의 측정은 6 개의 잔여 배출공으로 제한되었다. 이러한 요인을 감안한다고 하여도, 이와 같은 매립장 내부의 구조 변화나 계절적 요인만으로 VOC의 시간적 배출양상 변화를 설명하기는 용이하지 않다.

3.3. LFG의 배출량 산출

본 연구의 주요 목적 중의 하나는 매립가스로 배출되는 VOC의 배출량을 정확하게 정량적으로 산출하는

데 있다. 이러한 과정은 결국 주어진 매립장 환경의 총체적 배출량을 평가하는데 있어서 기본적인 정보를 확인할 수 있다. 이를 위하여, 본 연구진은 모든 방향족 VOC와 주요 매립가스의 배출량을 조사하였다. 이러한 방법은 이미 Kim & Kim(2002)에 의한 난지도 매립장 지역의 배출공을 통한 수은의 배출량을 산출한 사례와 유사한 방식이다.³⁾ 우선 개별 배출공으로부터 배출되는 배출가스의 양을 배출공의 입구에서 관측된 배출가스의 배출속도와 개별 벤트의 내부 용적을 동시에 감안하여 산출하였다. 개별 배출공은 외경 16cm 그리고 5미터 깊이로 매립지 표면을 통해 내부 매립층으로 매설되었다. 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

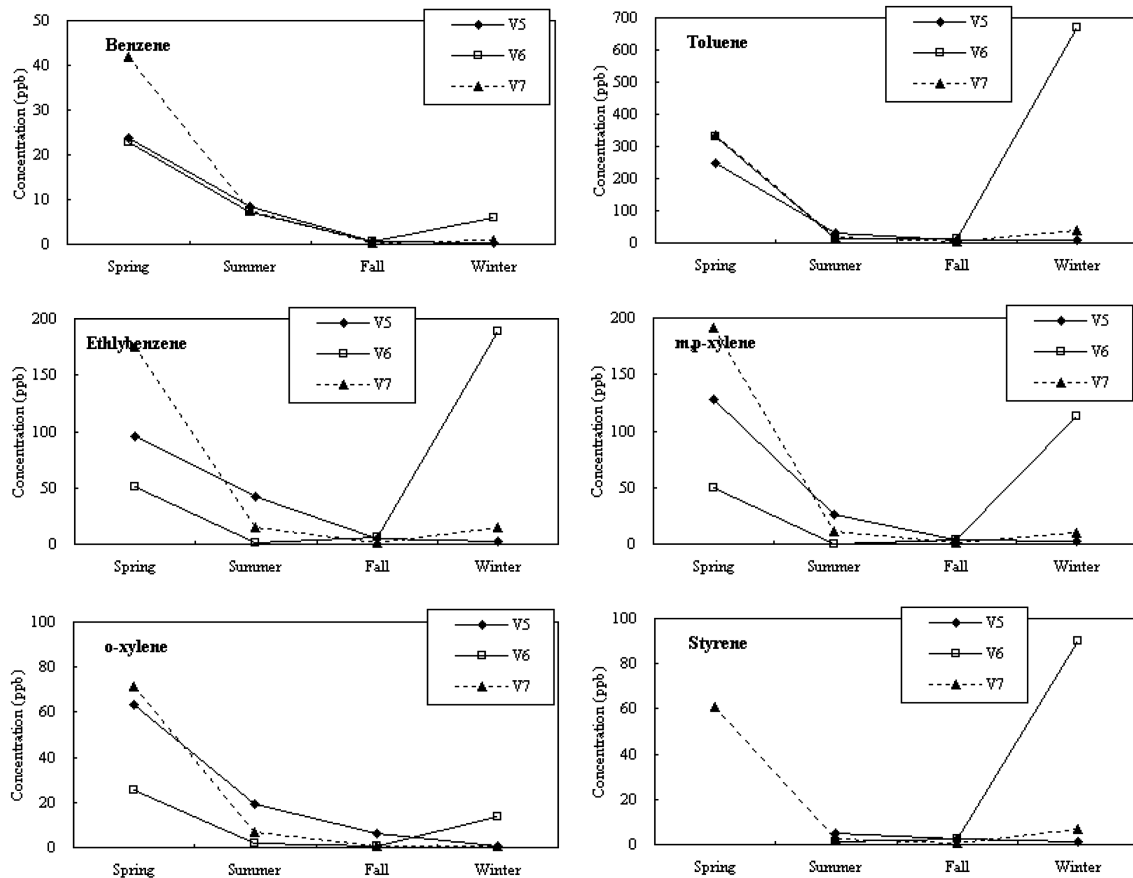


Fig. 5. Comparison of major aromatic VOC in LFG samples, collected from the old landfill site in Dong Hae, is made as a function of vent number.

해당하는 용적만큼의 배출가스가 한번 배출이 이루어진다고 볼 수 있다. 따라서, 이들 벤트의 경우, 동시에 관측된 기온조건으로 보정해주면, 연간단위로 배출되는 배출가스의 양을 추정할 수 있다. 최종적으로 각각의 벤트를 대표하는 농도값을 산출된 LFG에 곱해주면, 개별 벤트에 대한 각 성분의 연간단위별 배출량을 산출할 수 있다. 이렇게 구해진 VOC 성분들에 대한 배출량을 표기하였다 (Table 5).

본 연구에서 관측한 일부 지역의 매립장에서는 비교적 단기간의 실험을 통해 자료의 수집이 이루어졌다. 따라서 이들 자료를 이용한 배출량의 산출결과가 갖는 의미는 상대적으로 제한적 일수도 있다. 이렇게 산출한 배출량 수치는 서로 다른 매립장 환경과 연계하여 설명할 수 있게 매립장의 조건에 맞추어 배출 강도를 평가하는데 개략적인 기준으로 사용하였다. 각 매립장 지역의 VOC 배출 규모를 산정하기 위한 가장 기본적인 수준으로, 실측을 통해 확보한 LFG의 농도에 배출공의

단면적과 배출속도를 고려하여, 개별 배출공들에 대한 VOC 성분의 배출량을 산출하였다. 앞서 매립장별 비교 결과에서 나타나듯이, 서로 다른 지역 간의 LFG 배출량에서 주목할 수 있을 정도로 큰 차이점도 발견되었다. 특히 배출공의 농도 수준을 중심으로 비교한 앞서 결과와 유사하게, 매립이 진행 중인 매립시설물들과 종료된 시설물들 간에는 현저한 차이가 발견되었다. 톨루엔을 기준으로 배출량을 비교해 보면 대략 다음과 같은 차이를 확인할 수 있다. 매립이 진행 중인 시설물들에서는 최저 1000 g/yr 수준 (가을철 동해 신매립장)에서 최대 40,000 g/yr 수준 (겨울철 운정, 겨울철 방천 매립장)까지의 배출량이 확인된다. 이에 반해, 매립이 종료된 시설물들에서는 최저 수십 단위 (여름철 삼풍, 여름철 동해 구매립장)에서 최대 500 g/yr를 상회하는 수준 (난지도)까지 다양하게 나타난다. 이러한 경향을 보다 세밀하게 분류하고 이해하기 위해서, 매립장의 규모나 운영방법 등과 관련된 여러 가지 변수들을 상호

Table 5. A statistical summary of landfill gas (LFG) fluxes of major aromatic VOCs from all landfill sites. LFG fluxes are computed as mean values for all vent pipes (all units in g yr^{-1}).

	BEN	TOL	EB	MPX*	OX	STR
A. NJ	58.8 ± 148 0.17~902(42)	494 ± 689 1.33~2979(43)	- -	22.4 ± 39.2 0.13~113(15)	97.3 ± 133 0.04~632(41)	- -
B. WJ	588 ± 633 62.7~2558(14)	30952 ± 46279 2394~180985(14)	10308 ± 14176 1636~59042(15)	7360 ± 5886 1227~22589(15)	- -	6152 ± 4298 1811~14571(15)
[1] Winter						
[2] Summer	1230 ± 1186 221~3018(6)	4078 ± 2279 2058~7131(6)	2130 ± 960 917~3417(6)	2190 ± 714 1167~3125(6)	4895 ± 1836 2289~6960(6)	169 ± 66.1 99.2~282(6)
C. SP	1.28 ± 1.57 0.24~4.91(10)	19.8 ± 13.5 3.80~42.7(10)	7.64 ± 6.88 1.40~25.0(10)	14.2 ± 10.2 3.16~38.0(10)	9.36 ± 11.4 1.23~40.3(10)	- -
D. HC**	1607 ± 1390 236~3196(3)	4136 ± 3757 627~8100(3)	3338 ± 2515 466~5147(3)	4985 ± 3973 784~8683(3)	3345 ± 2557 509~5474(3)	143 ± 38.81 99.2~173(3)
E. NH	100	22.1	62.3	79.4	56.8	282
F. BC	762 ± 927(405) 35.4~3148(14)	43627 ± 57676(14689) 136~117687(14)	4374 ± 5545(3927) 145~22325(14)	6637 ± 8475(5439) 218~34038(14)	557 ± 467(596) 32.0~1200(14)	653 ± 1076(305) 14.9~4065(14)
[1] Winter						
[2] Summer	702 ± 628 97.6~1878(10)	13908 ± 18129 184~54698(10)	2787 ± 2502 267~7891(10)	1790 ± 1670 134~5416(10)	1057 ± 1006 8.70~3229(10)	108 ± 89.2 14.3~288(10)
G. DH-New	608 ± 411 239~1188(4)	4947 ± 1490 3474~6971(4)	2621 ± 1556 1490~4861(4)	1339 ± 421 838~1722(4)	626 ± 220 452~939(4)	160 ± 45.9 124~212(3)
[1] Spring						
[2] Summer	6989 ± 2873 3157~9593(4)	8679 ± 7021 4302~19120(4)	5861 ± 4156 940~9840(4)	4407 ± 1566 2576~6207(4)	3011 ± 1053 1461~3756(4)	919 ± 154 706~1069(4)
[3] Fall	109 ± 97 21~248(4)	1665 ± 1291 112~3024(4)	1721 ± 1321 220~2856(4)	779 ± 600 186~1539(4)	94 ± 84 33~190(4)	712 ± 547 123~1246(4)
[4] Winter	205 ± 182 29.8~392(3)	979 ± 809 276~1863(3)	2835 ± 2972 296~6104(3)	1333 ± 1601 43.1~464(3)	265 ± 212 43.1~464(3)	3016 ± 2937 102~5974(3)
H. DH-Old	11.0 ± 6.06 6.48~17.9(3)	128 ± 34.3 106~167(3)	56.2 ± 41.4 19.7~101(3)	64.4 ± 45.7 19.0~110(3)	27.5 ± 16.0 9.8~41.2(3)	34.5 34.5(1)
[1] Spring						
[2] Summer	2.90 ± 0.78 2.08~3.63(3)	9.7 ± 5.33 4.53~15.2(3)	11.1 ± 12.3 0.36~24.5(3)	7.20 ± 7.57 0.07~15.1(3)	5.23 ± 5.43 0.68~11.2(3)	1.56 ± 1.26 0.48~2.95(3)
[3] Fall	0.25 ± 0.07 0.20~0.36(4)	5.30 ± 2.83 2.11~8.60(4)	3.18 ± 1.24 1.57~4.56(4)	2.16 ± 0.77 1.11~2.88(4)	1.75 ± 1.59 0.34~3.75(4)	1.40 ± 0.53 0.68~1.95(4)
[4] Winter	1.31 ± 1.36 0.29~3.32(4)	122 ± 208 6.49~433(4)	55.4 ± 61.8 3.33~140(4)	32.9 ± 36.5 2.60~84(4)	3.38 ± 4.58 0.46~10.2(4)	27.0 ± 29.6 1.56~66.9(4)

*In the case of NH site, samples were collected from a centralized collection system. Hence, for the computation of fluxes, vent pipes of the same physical condition as the HC site were assumed.

연계하기 위한 노력이 추가되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구진은 차세대 연구사업의 일환으로 2000년부터 2004년의 기간 동안 주요 매립장에서 LFG의 형태로 배출되는 VOC의 조성 및 배출특성을 규명하기 위한 연구를 지속적으로 수행하였다. 이러한 연구사업의 수행을 통해, 전국에 산재한 다양한 매립지들에 대한 현장 중심의 관측자료를 확보하고 배출원 목록작성의 기

초자료를 생산하였다. 본 연구의 결과에 따르면, 매립장에서 나타나는 VOC 성분의 배출은 매립연한과 같은 조건에 따라 대단히 다양한 형태로 VOC 성분의 배출이 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 예를 들어, 매립이 종료된 매립장에서 VOC 배출량은 매립이 진행 중인 매립장보다 현저하게 낮은 수준으로 나타났다. 그러나 전자의 경우에도 그 발생량은 적지만 환경대기 중의 농도보다 약 10배에 가까운 수준까지 높은 농도로 꾸준히 배출이 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다. 참고로 톨루엔을 기준으로 보면, 배출공에서 배출되는

톨루엔의 배출량이 매립이 종료된 시설물들에서는 최저 수십 단위 (여름철 삼풍, 여름철 동해 구매립장)에서 최대 500 g/yr를 상회하는 수준 (난지도)까지 다양하게 나타났다. 이에 반해, 매립이 진행 중인 시설물들에서는 톨루엔의 배출이 최저 1000 g/yr (가을철 동해 신매립장)에서 최대 40,000 g/yr (겨울철 운영, 겨울철 방치 매립장) 수준까지 더 폭넓은 범위에서 확인되었다.

본 연구결과를 토대로 VOC의 배출특성을 계절적인 기준에서도 비교해 보았다. 이러한 분석결과에 의하면, 매립장의 운영방식이나 종류에 따라 그 특성이 다양하게 나타날 수 있다는 것이 확인되었다. 따라서 이들 성분의 배출특성을 시간적 경향성과 연계하여 설명하기 위해서는, 보다 세밀한 조사가 필요할 것으로 사료된다. 특히 방향족 VOC를 위시한 중요 성분들의 배출특성을 명확하게 정의하기 위해서는 매립장의 규모, 운영방법, 매립종료 후의 관리 계획 등과도 연계한 관점에서 배출특성을 설명할 수 있는 노력이 추가되어야 할 것으로 사료된다.

본 조사에서도 확인된 바와 같이, 매립장에서 BTEX 류를 위시한 다양한 VOC 성분들이 대량으로 배출되고 있다. 이러한 영향으로 인해, 주변 대기 중에서 관측한 VOC 성분들의 농도도 국내 중요 산업시설이 인접한 지역에서 나타나는 수준의 수 배를 상회하는 것으로 확인된다. 따라서, 단순히 매립장 내부뿐만 아니라 주변 지역의 특성을 감안한 관리대책의 수립도 진지하게 강구되어야 할 것이다. 특히 새로이 시설을 확장하거나 준공하는 매립시설물들은 기본설계단계부터 가스채집시설과 연소시설 등에 대한 고려가 기본적으로 포함되어야 할 것이다. 그리고 이들 시설물에 대한 여러 가지 관리대책과 운영계획에 대한 많은 노력을 기울일 필요가 있다고 평가된다. 특히 본 조사 기간에 연구진이 경험한 바로는 매립지의 운영 주체 별로 관리에 임하는 기준에서 상당한 차이를 발견할 수 있었다. 매립지별로 운영 주체에 따라 다양한 관리기준이 적용되는 것을 확인할 수 있었다. 일부 매립장의 경우, 적극적인 자세로 문제를 찾고, 개선하기 위해 노력하는 경우도 발견할 수 있었지만, 또 다른 일부에서는 본 연구진이 조사를 시도할 수조차 없는 상황도 경험하였다. 매립장 시설을 관리하는 모든 관리주체가 보다 적극적으로 문제의 원인 파악 및 개선대책을 수립하고 공유하기 위해, 여러 유형의 협조 체계를 상정하는 것도 진지하게 고려해 보

아야 할 시점이다.

참고문헌

1. James, K. J. and M. A. Stack, The impact of leachate collection on air quality in landfills, *Atmospheric Environment*, **1997**, 34(8), pp. 1713-1721.
2. 김민영, 윤중섭, 조석주, 김기현, 배출공을 통한 VOC 성분의 배출규모와 특성에 대한 연구: 난지도 지역을 중심으로 한 사례연구, *한국환경분석학회지*, **2002**, 5(1), pp. 13-24.
3. Kim, K. H. and M. Y. Kim, The distributions of BTEX compounds in the ambient air of the Nan-Ji-Do landfill site in Seoul, *Atmospheric Environment*, **2002**, 36(14), pp. 2433-2446.
4. 김기현, 오상인, 최여진, 선우영, 주도원, 매립장의 배출 가스 중VOC 성분의 조성과 배출 규모: 경산시의 소 규모 매립장에 대한 연구, *한국환경분석학회*, **2003a**, 6(1), pp. 7-14.
5. 김기현, 최규훈, 오상인, 최여진, 선우영, 전의찬, 주도원, 광주광역시 운정동 매립장지역에 대한 VOC 성분의 조성과 배출특성에 대한 연구, *한국분석과학회지*, **2003b**, 16(5) pp. 407-417.
6. 김기현, 김민영, 선우영, 오상인, 최여진. 주요 매립장 지역에 대한 VOC 성분의 조성과 배출 특성에 대한 연구. *서울도시연구*. **2004**. 5(3). pp. 99-116.7.
7. 최여진, 김기현, 마영일, 선우영, 전의찬, 두 개의 중규모 매립장을 대상으로 한 배출가스 중 VOC 성분의 측정과 배출특성 연구-동해지역을 중심으로, *한국냄새환경학회지*, **2005**, 4(1), pp. 5-14.
8. 최여진, 오상인, 김기현, 서울시 북동지점에서 휘발성 유기화합물의 겨울철 연속관측 연구, *한국대기환경학회지*, **2003**, 19(5), pp. 491-502.
9. Ebersold, P. and W. Young, "Here and now", *Environmental Protection*, May **2002**. 2002,
10. Schweigkofier, M. and R. Niessner, Determination of siloxanes and VOC in landfill gas and sewage gas by canister sampling and GC-MS/AES analysis, *Environmental Science & Technology*, **1999**, 33, pp. 3680-3685.
11. Na, K., YP Kim, K.-C. Moon, I. Moon, and K. Fung, Concentrations of volatile organic compounds in an industrial area of Korea, *Atmospheric Environment*, **2001**, 35, pp. 2747-2756.
12. 백성욱, 송정환, 김미현, 김수현, 원양수, 공인철, 김승현, 도시 쓰레기 매립장 지표면에서의 VOC 배출특성, *한국환경공학회지*, **2003**, 25(10), pp. 1258-1270.