

소규모 도시 생활폐기물 매립장 대기 중 VOC의 농도 측정  
-경산시 삼풍동 매립장을 대상으로-

Measurement of VOC in the Ambient Air of a Small Scale  
Municipal Landfill Site

-A Case Study at the Sampung-dong Landfill in Gyung-san City-

백성옥\* · 김배갑 · 서영교

영남대학교 토목도시환경공학부

(2003년 8월 16일 접수, 2003년 11월 12일 채택)

Sung-Ok Baek\*, Bae-Kap Kim and Yeoung-Kyo Seo

*School of Civil, Urban, and Environmental Engineering, Yeungnam University*

(Received 16 August 2003, accepted 12 November 2003)

**Abstract**

In this study, we investigated the concentrations of volatile organic compounds (VOC) in the ambient air of a small scale municipal waste landfill site. Seasonal sampling was carried out simultaneously at two sites, i.e. one in the center of the landfill area, and the other at a boundary site. Among 38 target VOC, toluene appeared to be the most dominant compound, followed by benzene, and xylenes. The higher levels of BTX imply that paint-containing materials and/or organic solvents are the most significant sources of the VOC in the landfill environment. Seasonal variations for the samples collected at the landfill site indicated that the VOC concentrations tend to be higher in the spring and fall season and lower in the winter season. In addition, night-time concentrations appeared to be generally higher than day-time. Such daily variation might be due to more stabilized atmosphere during the night-time. Similar patterns were also found in samples collected at a boundary site. This study demonstrated that the municipal landfill, although it is small-scaled, could be an important emission source of atmospheric VOC, particularly in the vicinities of the landfill. Thus, an appropriate control strategy is required to prevent any undesirable secondary pollutions from the environmental sanitary facilities such as landfill.

**Key words** : VOC, Benzene, BTEX, Landfill, Environmental sanitary facilities

**1. 서 론**

휘발성 유기화합물질 (VOC)에 의한 환경오염과

그 유해성은 여러 분야에서 연구되고 있으나 특히 이들 중 염화 유기물, 방향족 탄화수소, 농약 등은 매립 후 토양환경에서 잘 분해되지 않을 뿐 아니라 그 독성으로 인하여 주변 대기과 토양 및 지하수에 대해 큰 문제를 일으킬 수 있다(국회환경포럼, 1999). VOC로 인한 토양 오염에 대한 연구는 지하수를 주

\* Corresponding author  
Tel : +82-(0)53-810-2544, E-mail: sobaek@yu.ac.kr

요 상수원으로 하는 미국 및 유럽 등지에서 많이 연구된 바 있으며 (Fischer *et al.*, 1996), 그 주된 내용은 음용수질 관리와 오염 토양 및 지하수의 복원이 관점이었다. 그러나, 오염된 토양의 VOC는 지하수만 오염시키는 것이 아니라 오염원으로부터 상당한 거리에 있는 불포화대의 토양을 오염시키며, 또한 지표층을 통하여 공기 중으로 확산하여 대기오염을 유발하게 된다. 외국에서는 1980년대 후반부터 이에 대한 조사와 연구가 많이 수행되었으며, 그 좋은 예가 미국의 뉴저지주 모리스군의 피카티니 알스넬에서의 트리클로로에틸렌 유출에 의한 지하수와 지표 토양층 및 주변 대기질이 심각하게 오염된 사례를 들 수 있다 (Smith *et al.*, 1990). 결국 종합적인 환경관리 측면에서 볼 때 지금까지의 환경문제는 물, 대기, 토양 등 개별 매체를 대상으로 부분적인 접근을 해 왔으나 향후에는 “대기, 물, 토양, 식생”과 같은 cross media형의 환경문제로서의 접근방법이 차세대의 환경연구에 중요하게 부각될 것으로 예상된다.

쓰레기 매립장에서 배출되는 가스 중에는 이산화탄소, 메탄, 황화수소, 암모니아, VOC 등을 들 수 있다. 그러나 국내에서는 매립장으로부터의 이차적인 대기오염문제에 있어서 지금까지는 악취문제의 차원에서 취급되어 왔으며, 관능법에 의한 악취 측정만은 매립장 배출가스의 성상과 농도를 정량적으로 파악하는 데는 효과적이지 못하였다. 특히 환경보건학적으로 관심이 높은 VOC의 종류별 배출양상에 대한 국내의 연구는 미약한 실정이며, 최근에 들어서야 서울특별시 난지도와 대구광역시 방천동 매립장과 같은 대규모 도시 쓰레기 매립장의 측정사례가 보고된 바 있다 (백성욱 등, 2003; 김기현 등, 2001). 이들 측정결과에 의하면 매립장 지표면 대기 중 농도는 대도시 도심의 10차선 도로변에서 측정된 VOC 농도를 상회하는 수준의 고농도로 나타나 쓰레기 매립장이 VOC의 인위적 발생원의 중요한 한 범주로 관리되어야 할 것으로 사료된다. 2003년 현재 전국적으로 광역자치단체에서 운영하는 대규모 매립장은 9개소가 있으나 기초자치단체에서 관리하는 매립장은 총 223개소에 이르고 있다 (환경부, 2003). 기초자치단체의 매립장은 비록 그 규모는 적으나 숫자면에서는 월등히 많으므로 이들 소규모 매립장에서의 VOC 배출양상을 파악하는 것 역시 매우 중요한 사안이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 기초자치단체의 전형적인 소규모 생활쓰레기 매립장을 대상으로 매립이 진행중인 현장과 부지경계선에서의 VOC 시료를 동시에 채취하여 분석함으로써 매립장 지표 상부 대기 중 VOC 농도 수준과 계절변동 및 일간 변동의 특성을 파악하여 향후 관리대책의 기초자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 조사대상지점 개황

본 연구에서는 생활폐기물이 매립되어 있는 경산시 삼풍동 매립장을 조사대상지점으로 선정하였다. 삼풍동 매립장은 매립시기가 서로 다른 3개의 매립지역이 있으며, 그 위치와 특성은 그림 1과 표 1에 각각 나타내었다. 1차 매립지역의 경우 10,674 m<sup>3</sup>의 부지에 1989년 9월부터 1992년 12월 31일까지 매립이 이루어졌으며 매립 종료 후 10년이 경과되었다. 당시의 매립방법은 서울의 난지도 매립방법과 동일한 단순투기방식 혐기성 매립방법으로 매립이 완료되었으며, 현재는 최종 복토가 이루어진 토양에 작은 수목이 조성되어있고 아직 안정화가 진행되고 있는 상태이다. 2차 매립지역의 경우 9,884 m<sup>3</sup>의 부지에 1993년 1월 1일부터 1997년 6월 30일까지 매립이 이루어졌으며 매립 종료 후 5년이 경과된 지역이다. 당시의 매립방법은 혐기성 위생매립이었으며 현



Fig. 1. Location of the Sampung-dong landfill and VOC sampling sites.

**Table 1. Characteristics of the Sampung-dong landfill site in Gyungnsan city.**

	1st landfill site	2nd landfill site	3rd landfill site
Filling period	1989. 9. ~ 1992. 12. 31.	1993. 1. 1. ~ 1997. 6. 30.	1998. 9. 20. ~ 2002. 8. 31.
Area	10,674 m <sup>2</sup>	9,884 m <sup>2</sup>	9,196 m <sup>2</sup>
Mean depth	6.2 m	6.2 m	4.15 m
Filling method	Anaerobic open dump	Anaerobic sanitary landfill	Anoxic sanitary landfill

**Table 2. Weather conditions during the VOC sampling periods.**

Sampling period	Temp. (°C)	Rain (mm)	Wind speed (m/sec)	R.H (%)
Winter 2002. 2. 20. ~ 24.	4.8	0.0	2.2	51.1
Spring 2002. 5. 20. ~ 24.	18.9	0.0	1.7	65.9
Summer 2002. 7. 1. ~ 4.	26.7	0.2	2.1	69.7
Fall 2002. 10. 19 ~ 11. 1	16.0	0.0	1.7	61.7

재는 안정화의 진행으로 지반이 낮아져 있으며 주기적으로 복토가 진행중인 상태이다. 3차 매립지역의 경우 9,196 m<sup>3</sup>의 부지에 1998년 9월 20일부터 시작하여 2002년 8월 31일 사용이 종료되었다. 매립방법은 준 호기성 위생매립방법으로 시공되었다.

**2.2 VOC 시료채취 지점 및 기간**

매립장 대기 중의 VOC 시료 채취는 조사 당시 매립이 진행되고 있던 3차 매립장 현장과 전체 매립장의 부지 경계선에서 각각 이루어졌다. 삼풍동 매립장의 3차 매립장은 가로와 세로가 약 100 m 내외(전체 면적 9,196 m<sup>2</sup>)의 비교적 소규모 매립장인 관계로 매립장 중심부 1개 지점을 대표장소로 간주하였다. 한편, 매립장의 부지 경계선은 2차선 국도에 접해있으며, 매립장내 측정지점에서 직선 거리로 약 300 m 정도 떨어져 있다. VOC 측정시기는 연중 4계절 측정을 목적으로 겨울(2002. 2. 20~23), 봄(5. 20~5. 24), 여름(7. 1~7. 4) 및 가을(10. 29~11. 1)로 구분하였으며, 측정 당시의 기상조건은 표 2에 나타내었다.

VOC 시료는 25개의 흡착관을 동시에 장착하여 일정 시간 간격으로 연속 시료 채취가 가능한 STS-25 (Perkin Elmer, UK)를 사용하여 채취하였다. 시료 채취는 지면으로부터 1.5 m 높이에서 매 계절마다 2

시간 간격으로 24시간 연속하여 최소 3일 이상 두 지점에서 동시에 채취하였다.

**2.3 VOC 시료채취 및 분석방법**

VOC 시료는 100 mg의 Carbotrap-C (20/40 mesh, Supelco, USA)와 300 mg의 Carbotrap (20/40 mesh, Supelco, USA)을 충전한 스테인레스 스틸 흡착관 (0.6 cm × 9 cm, Perkin Elmer, UK)을 사용하여 채취하였으며, 유량은 초정밀 유량계 (Ultra-Flo<sup>TM</sup>, SKC., USA)와 휴대용 펌프 (SP15, Casella London, UK)를 이용하여 평균 70 ml/min으로 조정하였다. 시료채취와 교정에 사용된 모든 VOC 흡착관은 사전에 흡착관 전처리용 장치 (TC-20, Markes, UK)를 이용하여 300°C에서 2시간 이상 헬륨가스를 흘려 cleaning 하였다. VOC 시료의 분석은 자동열탈착장치 (ATD-400, Perkin Elmer, UK)가 GC칼럼 (Rtx-502.2, 0.32 mm × 105 m × 1.80 μm)으로 직접 연결된 HP GC/MS (HP6890/5973)시스템을 사용하였다. 자동열탈착장치와 GC/MS의 분석조건은 표 3에 나타내었다.

**2.4 측정대상 VOC 및 표준시료**

본 연구에서는 환경대기 중 출현빈도가 높고 환경학적 관심사가 높은 VOC를 측정대상물질로 선정하였다. 결과적으로 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠 및 자일렌 등 방향족 화합물과 클로로포름, 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌 등 할로젠화 탄화수소를 포함하는 총 38개 물질을 조사연구 대상물질로 선정하였다. VOC 표준물질로는 미국 Scott사의 33개 VOC 혼합가스 및 VOC 혼합용액 (Supelco VOC Mix 1, 2, 7, 8) 등을 병용하였다. 이와 같은 표준물질을 이용한 표준시료제작용 시료함침장치 및 구성과 성능은 다른 문헌에서 찾을 수 있다(백성욱 등, 1998).

**2.5 측정방법의 정도관리(QC/QA)**

본 연구에서는 VOC의 현장시료 측정에 있어서

**Table 3. Summary of instrumental conditions for the VOC analysis.**

ATD 400 (Perkin Elmer, UK)		GC/MSD (HP6890/5973, Hewlett Packard, USA)	
Oven temp.	300°C	GC column	Rtx-502.2 (0.32 mm, 105 m, 1.8 µm)
Desorbing time and flow	15 min, 95 ml/min	Initial temp.	35°C (10 min)
Cold trap holding time	5 min	Oven ramp rate	5°C/min
Cold trap high / low temp.	350°C / -30°C	Final temp.	230°C (11 min)
Cold trap packing	Carbotrap 50 mg	Column flow	~2.5 ml/min
Min. pressure	20 psi	Detector type	Quadrupole
Inlet split	No	Q-pole temp.	150°C
Outlet split	15 ml/min	MS source temp.	230°C
Valve and line temp.	200°C	Mass range	35~220 amu

**Table 4. Method detection limits(MDL) and percentage of data less than MDL for each target VOC.**

No.	VOC	MDL (ppb)	% of Data < MDL
1	1, 1-Dichloroethene	0.02	100
2	<i>trans</i> -1, 2-Dichloroethylene	0.02	100
3	<i>cis</i> 1, 2-Dichloroethylene	0.02	100
4	Chloroform	0.01	97.5
5	1, 1, 1-Trichloroethane	0.01	99.0
6	Carbon Tetrachloride	0.01	98.1
7	1, 2-Dichloroethane	0.02	97.8
8	Benzene	0.01	6.5
9	Trichloroethylene	0.05	69.2
10	1, 2-Dichloropropane	0.03	100
11	Bromodichloromethane	0.02	100
12	Toluene	0.01	2.3
13	Tetrachloroethene	0.03	97.5
14	Dibromochloromethane	0.08	100
15	Chlorobenzene	0.03	100
16	Ethylbenzene	0.02	18.6
17	<i>m</i> -Xylene	0.02	13.1
18	<i>p</i> -Xylene	0.02	13.1
19	<i>o</i> -Xylene	0.02	27.9
20	Styrene	0.03	39.5
21	Isopropylbenzene	0.01	100
22	Bromoform	0.06	100
23	<i>n</i> -Propylbenzene	0.05	94.9
24	Bromobenzene	0.04	100
25	1, 3, 5-Trimethylbenzene	0.02	64.8
26	2-Chlorotoluene	0.05	100
27	4-Chlorotoluene	0.05	99.7
28	<i>tert</i> -Butylbenzene	0.06	100
29	1, 2, 4-Trimethylbenzene	0.02	36.6
30	<i>sec</i> -Butylbenzene	0.01	100
31	<i>p</i> -Isopropyltoluene	0.01	85.9
32	1, 3-Dichlorobenzene	0.02	100
33	1, 4-Dichlorobenzene	0.03	100
34	<i>n</i> -Butylbenzene	0.02	98.1
35	1, 2-Dichlorobenzene	0.02	94.3
36	1, 2, 4-Trichlorobenzene	0.03	100
37	Naphthalene	0.01	52.9
38	1, 2, 3-Trichlorobenzene	0.03	100

흡착제를 이용한 시료채취방법과 열탈착/GC/MS를 이용한 VOC 분석방법의 전반적인 성능을 평가하기 위하여 재현성과 방법검출한계를 평가하였다. 분석 재현성은 모든 측정항목에 대하여 10% 이내로 나타났으며, 같은 유량으로 채취된 중복 시료에 대한 평균중복정밀도는 10~25% 이내의 범위로 나타났다. VOC분석방법에 대한 기기검출한계는 피크면적의 검출에 적용된 signal 대 noise 값을 고려하여 추정하였으며, 이 값의 약 4~5배 되는 낮은 농도의 액상 표준물질을 7회 반복 분석한 농도에 대한 표준편차를 이용하여 방법검출한계 (method detection limit, MDL)를 추정하였다(EPA, 1990). 표 4에는 전체 측정 대상 VOC 중 측정결과가 검출한계 이하로 나타난 자료의 빈도를 MDL 자료와 함께 나타내었다. BTEX와 일부 방향족 화합물을 제외한 대부분의 물질들이 상당수 검출한계이하로 나타나고 있어 측정 결과에 대한 고찰에서는 주로 고농도로 출현빈도가 큰 물질들을 대상으로 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 매립장 및 부지경계선에서의 VOC 농도

매립장 현장과 부지경계선에서의 4계절에 걸쳐 측정된 결과를 표 5과 6에 각각 요약하였다. 한편, 매시간별 측정자료에 대한 시계열 변화는 그림 2에 나타내었다. 총 38종의 측정대상 VOC 중 농도가 가장 높은 물질은 톨루엔으로 나타났으며, 다음으로 벤젠, 자일렌, 에틸벤젠의 순으로 나타나 도시쓰레기 매립장에서도 여전히 페인트나 유기용제 사용과 관련 있는 BTEX 계열의 방향족 VOC가 다량 배출되고 있음을 알 수 있다. BTEX 이외에도 고무제품이

**Table 5. Concentrations of selected VOC at a site within the Sampung-dong landfill.**

VOC (ppb)	Winter (n = 36) (2002. 2. 20. ~ 23.)			Spring (n = 48) (2002. 5. 20. ~ 24.)			Summer (n = 36) (2002. 7. 1. ~ 4.)			Fall (n = 36) (2002. 10. 29. ~ 11. 1.)			Annual (n = 156)		
	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max
Benzene	0.2	0.1	1.2	0.9	n.d*	1.9	0.9	n.d	1.5	1.2	n.d	2.0	0.8	n.d	2.0
Trichloroethylene	0.1	n.d	0.5	0.1	n.d	0.3	0.8	n.d	0.3	0.2	n.d	2.1	0.1	n.d	2.1
Toluene	1.6	0.3	7.9	4.5	0.5	9.7	8.1	0.3	37.2	9.3	0.5	33.8	6.6	0.3	37.2
Ethylbenzene	0.1	n.d	0.8	0.4	n.d	1.0	0.4	n.d	0.9	0.7	n.d	1.9	0.5	n.d	1.9
<i>m, p</i> -Xylene	0.1	n.d	0.5	0.8	n.d	2.0	0.8	n.d	2.0	1.5	n.d	4.2	0.9	n.d	4.2
<i>o</i> -Xylene	0.1	n.d	0.3	0.3	n.d	0.7	0.2	n.d	0.6	0.5	n.d	1.3	0.3	n.d	1.3
Styrene	0.1	n.d	0.4	0.3	n.d	1.0	0.2	n.d	1.4	0.5	n.d	2.0	0.3	n.d	2.0
1, 3, 5-TMB	0.1	n.d	0.2	0.1	n.d	0.4	0.1	n.d	0.3	0.1	n.d	0.3	0.1	n.d	0.4
1, 2, 4-TMB	0.1	n.d	0.2	0.2	n.d	0.7	0.2	n.d	0.7	0.5	n.d	1.8	0.3	n.d	1.8
Naphthalene	0.1	n.d	0.2	0.1	n.d	0.3	0.2	n.d	0.5	0.3	n.d	0.9	0.2	n.d	0.9

\* not detected.

**Table 6. Concentrations of selected VOC at a boundary site of the Sampung-dong landfill.**

VOC (ppb)	Winter (n = 36) (2002. 2. 20. ~ 23.)			Spring (n = 48) (2002. 5. 20. ~ 24.)			Summer (n = 36) (2002. 7. 1. ~ 4.)			Fall (n = 36) (2002. 10. 29. ~ 11. 1.)			Annual (n = 156)		
	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max
Benzene	0.2	n.d	0.4	1.0	n.d	1.8	1.0	n.d	1.8	1.4	n.d	2.6	0.9	n.d	2.6
Trichloroethylene	0.1	n.d	0.5	0.2	n.d	0.7	0.1	n.d	0.5	0.2	n.d	2.2	0.1	n.d	2.2
Toluene	2.0	0.3	6.9	4.7	0.1	14.8	2.5	0.1	9.6	6.6	0.3	41.9	4.1	0.1	41.9
Ethylbenzene	0.1	n.d	0.3	0.4	n.d	0.8	0.3	n.d	0.7	0.5	n.d	1.8	0.3	n.d	1.8
<i>m, p</i> -Xylene	0.2	n.d	0.5	0.8	n.d	1.7	0.6	n.d	1.4	1.2	n.d	3.6	0.7	n.d	3.6
<i>o</i> -Xylene	0.1	n.d	0.2	0.3	n.d	0.6	0.2	n.d	0.5	0.4	n.d	1.1	0.2	n.d	1.1
Styrene	0.1	n.d	0.4	0.2	n.d	0.7	0.2	n.d	1.3	0.4	n.d	1.8	0.3	n.d	1.8
1, 3, 5-TMB	0.1	n.d	0.3	0.1	n.d	0.4	0.1	n.d	0.3	0.1	n.d	0.3	0.1	n.d	0.4
1, 2, 4-TMB	0.1	n.d	0.3	0.2	n.d	0.4	0.1	n.d	0.3	0.3	n.d	0.7	0.2	n.d	0.7
Naphthalene	0.1	n.d	0.2	0.1	n.d	0.3	0.1	n.d	0.4	0.2	n.d	0.5	0.1	n.d	0.5

\* not detected.

나 합성수지제품과 관련 있는 스티렌과 비교적 휘발성이 약한 고분자 VOC 그룹에서는 트리메틸벤젠류 및 나프탈렌 등이 빈번히 검출되는 항목으로 나타났다. 그러나 방향족 그룹과는 달리 할로겐화 VOC의 경우 트리클로로에틸렌을 제외하고는 대부분 검출빈도가 전체 자료 중 5% 이하로 나타났는데 이는 측정 대상 매립장이 생활폐기물만을 매립하고 있어 산업체에서의 발생량이 많은 할로겐화 폐기물의 반입량이 엄격히 제한되고 있었기 때문으로 이해된다.

전반적으로 볼 때, 본 연구에서 측정한 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠 및 자일렌 계통의 BTEX 농도는 서울과 대구 등 대도시의 교통밀집지역에서의 환경대기 측정결과(김미현 등, 2000; 나광삼 등, 1998)와 유사한 수준으로 나타났으며, 대구·경산지역의 배경농도(백성욱 등, 2003a) 보다는 높은 농도로 나타났다.

그러나 본 매립장 보다 훨씬 규모가 큰 서울 난지도의 측정 결과(김기현 등, 2001) 보다는 대체로 낮은 농도를 나타내었다. VOC 물질 상호간의 공변동성(covariation)을 파악하기 위하여 전체자료를 대상으로 상관성을 평가하였으며, 그 결과를 표 7에 나타내었다. BTEX간에는 대체로 0.6 이상의 양호한 상관성이 있는 반면, 트리클로로에틸렌과 다른 VOC와는 상관성이 매우 약하여 그 발생원이 상이함을 알 수 있다. 또한, 같은 방향족 물질이라 하더라도 스티렌과 1, 3, 5-트리메틸벤젠의 경우 역시 다른 방향족 VOC 그룹에 비하여 상대적으로 상관성이 떨어지는 것으로 나타나 매립장에서의 VOC 물질의 배출양상은 물질에 따라 특징적으로 다르게 나타날 수 있음을 암시하고 있다. 따라서 향후 매립장 관련 VOC 배출량 관리에 있어서 한두 종류의 지표물질에 의존하는 것보

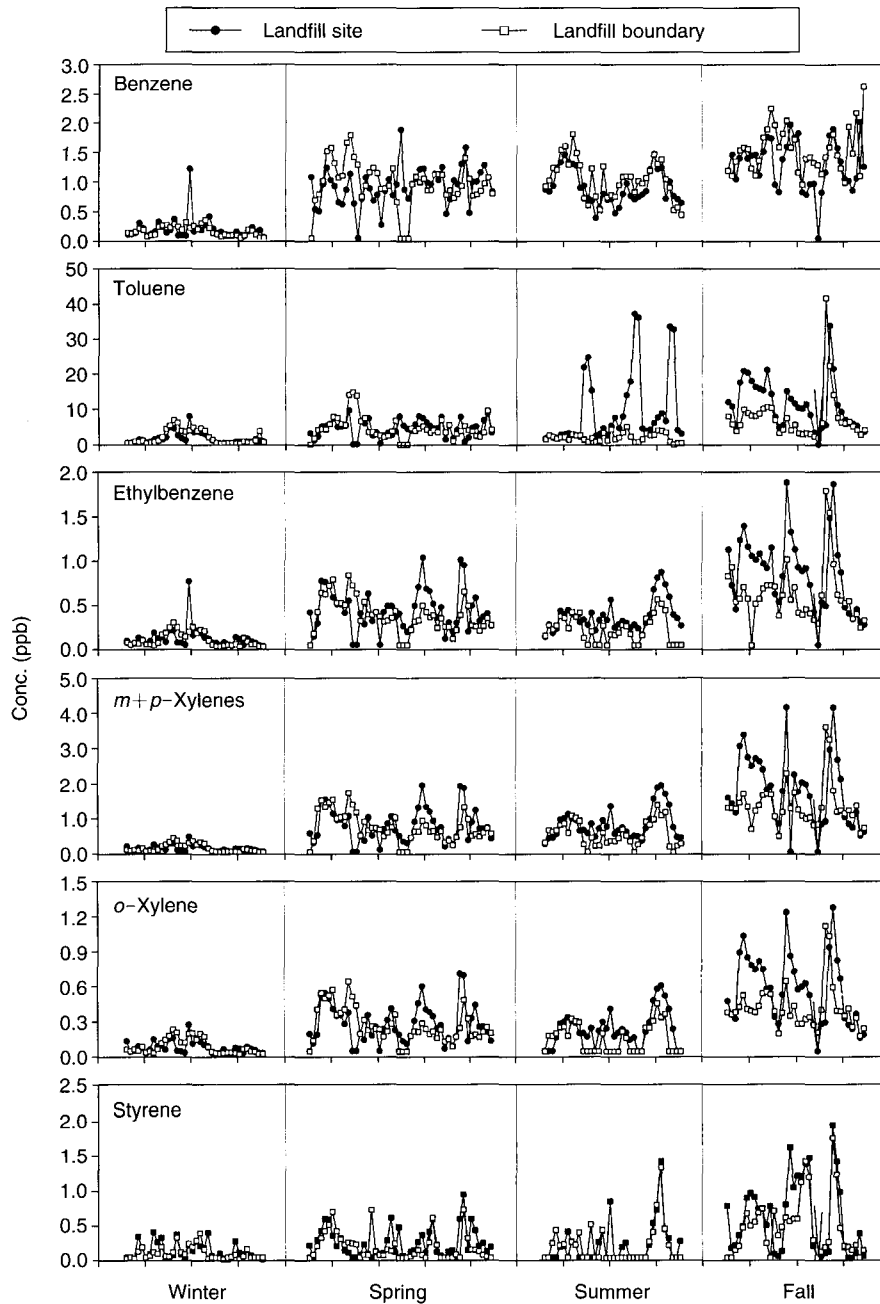


Fig. 2. Seasonal variations of VOC levels in the ambient air of the Sampung-dong landfill site.

다는 가급적 개별 물질에 대한 정성·정량을 통한 접근 방식이 요구된다.

그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 매립장내부와

부지경계선에서의 VOC 농도는 몇몇 극한치를 제외하고는 두 지점간에 큰 차이가 없었으며 시간에 따른 농도변화 역시 유사한 경향을 보이고 있음을 알

Table 7. Correlation coefficients between VOC concentrations (n = 312).

	BZ	TCE	TOL	EBZ	mp-XYL	o-XYL	STR	135-TMB	124-TMB	NAPHT
Benzene (BZ)	1.00									
Trichloroethylene (TCE)	0.27*	1.00								
Toluene (TOL)	0.41*	0.56*	1.00							
Ethylbenzene (EBZ)	0.69*	0.54*	0.65*	1.00						
<i>m, p</i> -Xylene (mp-XYL)	0.70*	0.50*	0.63*	0.95*	1.00					
<i>o</i> -Xylene (o-XYL)	0.69*	0.53*	0.63*	0.97*	0.96*	1.00				
Styrene (STR)	0.48*	0.19*	0.29*	0.63*	0.61*	0.66*	1.00			
1, 3, 5-TMB	0.22*	0.15*	0.18*	0.43*	0.40*	0.47*	0.38*	1.00		
1, 2, 4-TMB	0.51*	0.27*	0.48*	0.79*	0.78*	0.82*	0.69*	0.52*	1.00	
Naphthalene (NAPHT)	0.58*	0.27*	0.42*	0.74*	0.74*	0.77*	0.69*	0.42*	0.90*	1.00

\* significant at a level of 0.05.

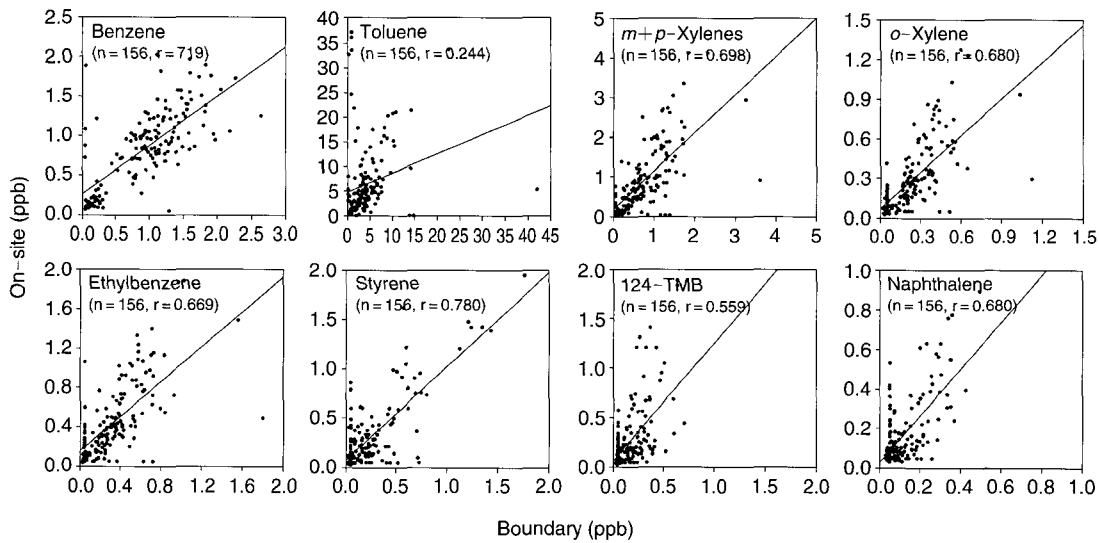


Fig. 3. Correlations of VOC concentrations within and outside the landfill site.

수 있다. 동시에 측정한 두 지점에서의 VOC 농도간의 상관성을 분석한 결과는 그림 3에 나타내었다. 톨루엔을 제외하고는 대체로 두 지점간의 상관성은 유의적인 것으로 나타났다. 톨루엔의 경우 특히 여름철에 매립장 내부에서 일시적으로 매우 고농도로 나타나는 현상이 관측되었는데 이들 자료를 제외할 경우 상관성은 다른 항목들과 유사한 수준으로 나타났다. 따라서 부지 경계면의 대기는 매립장의 영향권에 속해 있다고 볼 수 있으며, 인근지역의 대기 중 VOC의 주된 배출원은 매립장이라고 추정할 수 있다. 실제 매립장 인근지역은 교통량은 그리 많지 않으며 부지 경계면에 인접한 2차선 국도 건너편(약 20 m

거리)에는 상가와 주거지역이 형성되어 있는 전형적인 중소 도시(인구 22만명)의 외곽 개발지역으로서 특별한 산업체 배출원이 없는 지역이다.

### 3.2 VOC 농도의 계절 변동

표 5와 6 및 그림 2에 나타낸 바와 같이 계절별 VOC 농도분포를 보면 기온 저하에 따라 매립장 지표면에서의 휘발성 배출량이 적은 겨울철에 가장 낮으며 대체로 봄과 가을철의 농도가 여름철보다 약간 높은 것으로 나타났다. 봄과 가을철에 높은 농도분포를 보인 주된 이유는 봄철의 경우 해빙기를 거치면서 매립장내 지표면에서 VOC 배출량이 증가한 영

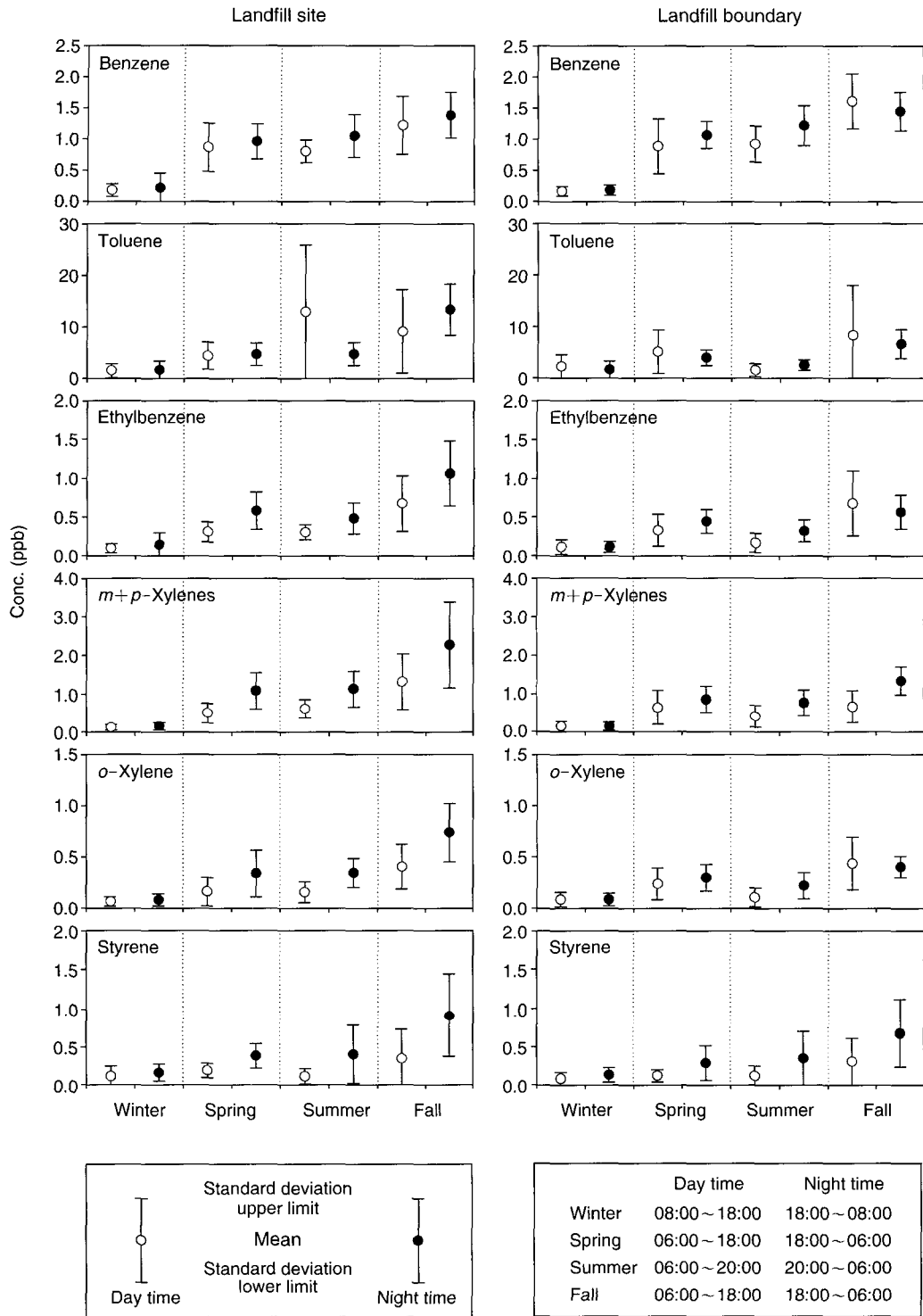


Fig. 4. Comparison of day- and night-time VOC concentrations in the ambient air of the Sampung-dong landfill site.



향으로 보아지며, 측정 당시의 기온 역시 20°C를 넘는 초여름 날씨를 보였다. 가을철의 경우 측정기간 중 농도변동이 다른 계절에 비해 크게 나타나고 있는데, 이는 하루 중 기온의 일교차가 커지면서 대기안정도의 급격한 변화에 따라 낮 시간대와 밤 시간대의 농도가 큰 차이를 보이는 것으로 사료된다. 특히 야간 시간대의 농도 증가(그림 2) 및 이른 아침과 저녁 시간대의 지표면 대기안정화에 따른 확산 억제 현상이 전반적인 농도상승을 주도한 것으로 추정된다.

반면에 여름철 시료는 채취 전날 비가 내렸으며 채취기간 중에도 흐리고 습한 날씨가 계속되어 다른 계절에 비해 상대적으로 낮은 농도를 나타낸 것으로 추정된다. 즉, 강우로 인하여 지표면이 젖은 상태에서 토양 공극을 채운 수분의 영향으로 확산에 의한 배출강도에 방해요인으로 작용한 것으로 보인다. 툴루엔의 경우 여름철 고농도가 나타난 시료는 모두 매립장 내의 측정 장소에서 나타났으며, 발생 시간대 역시 모두 주간이었다. 따라서 이러한 고농도 현상은 지표면이나 가스배출공에서의 지속적인 배출량에서 기인하였다기 보다는 특정 폐기물의 부정기적인 유입에 따른 일시적인 현상으로 보아진다.

참고로 본 연구와는 별도로 수행된 지표 토양 공극층 및 가스배출공에서의 VOC 배출량을 측정 한 결과(백성욱 등, 2003b)에 의하면 VOC 배출량에 대한 월간 변동양상은 대부분의 VOC가 연중 가장 기온이 올라가는 7월의 배출량이 지표면에서나 가스배출공에서나 모두 가장 낮게 나타났다. 또한 지표면에서 휘발성으로 인한 배출량은 오히려 6월과 8월 및 10월 등의 기간에 배출량이 전반적으로 다른 월에 비하여 상대적으로 많은 것으로 나타났으며 기온이 가장 낮은 겨울철(12~3월) 기간은 연중 최저치를 보였다. 따라서 장마기간인 7월의 경우 측정기간 중 기온은 높았으나 시료 채취기간 중 비가 오거나 흐린 날이 포함되어 VOC 배출량이 감소한 것으로 추정된다. 그러나, 본 연구에서는 8월 중의 측정을 하지 못한 제한 요인으로 인하여 매립장에서의 하절기의 VOC 배출이 항상 7월과 유사한 양상으로 나타날 것이라고 단정하기는 어렵다. 따라서 향후 하절기 동안의 매립장에서의 VOC 배출량 추정 등을 위해서는 6월과 8월을 포함하는 기간의 측정이 중요하다고 사료된다.

### 3.3 주간과 야간의 VOC 농도

그림 2에 나타난 계절별 VOC 농도 분포를 보면 가을철 측정자료가 평균치 측면에서는 봄철과 유사한 수준으로 나타났으나 시간대별 농도의 변동폭이 매우 큰 것으로 나타났다. 이는 기온의 일교차가 커짐에 따라 매립장 상부 대기 중의 VOC 농도가 주간과 야간에 따라 큰 폭으로 변하고 있음을 의미한다. 따라서 하루 중 기온과 일사량 변화에 따른 농도 변화의 경향을 파악하기 위하여 측정자료들을 각 계절별로 주간과 야간대로 구분하여 비교하였으며, 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 매립장 내의 측정지점에서는 여름철 주간에 일시적으로 고농도를 나타낸 툴루엔 자료를 제외하고는 모두 야간의 농도가 주간의 농도에 비하여 높은 것으로 나타났으며, 김기현 등(2001)의 난지도 측정결과에서도 이와 매우 유사한 경향이 나타난 바 있다. 따라서 야간에 매립장 지표 부근의 대기가 안정화되면서 희석·혼합할 수 있는 환경용량이 감소함에 따라 농도가 상승하게 되는 요인이 주간의 기온 상승에 따른 배출량 증가 요인보다는 크게 작용하는 것으로 사료된다. 그러나 매립장 내의 측정지점과는 달리 도로에 가까이 위치한 부지 경계선에서는 주간과 야간의 농도차이가 매립장 내부에 비해 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 낮 시간대에 증가한 도로 통행 차량에서 배출된 VOC의 기여분으로 인하여 주간 농도가 상대적으로 상승하였기 때문으로 보아진다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 환경학적 관심사가 높은 총 38종의 VOC를 대상으로 기초자치단체에서 운영하는 소규모 매립장 지표부근 대기를 4계절로 나누어 측정하였다. 그 중 가장 높은 농도로 나타난 물질은 툴루엔이었으며, 다음으로 벤젠과 자일렌의 순으로 나타났다. 따라서 폐기물 매립장에서는 페인트나 유기용제 사용과 관련 있는 BTEX 계열의 방향족 VOC가 다량 배출되고 있음을 알 수 있다. 한편, 비교적 휘발성이 약한 고분자 VOC그룹에서는 1,2,4-트리메틸벤젠과 나프탈렌이 꾸준히 검출되었다.

지표 대기 중 VOC 농도는 동절기에 가장 낮았으며, 봄철과 가을철에 배출량이 증가하는 것으로 나타

났다. 매립장 부지경계선에서의 측정 결과 역시 매립장 내부의 농도와 상관성이 높게 나타나 전반적으로 매립장내의 농도변동양상이 인근지역에 그대로 반영되고 있다고 보여진다. 또한 하루 중에는 야간의 농도가 주간에 비하여 높게 나타나 도심지의 주·야간 농도 변동과는 반대되는 양상을 나타내었다.

실제 매립장 인근지역의 상황은 교통량은 그리 많지 않으며 전형적인 중소 도시의 외곽 개발지역으로서 특별한 산업상 배출원이 없는 지역이다. 따라서 향후 매립장과 같은 환경기초시설의 유지와 운영은 불가피하지만 이로 인한 이차적인 대기오염 등 또 다른 환경오염문제를 유발시키지 않도록 하기 위해서는 쓰레기 매립장, 하수처리장, 분뇨처리장 등과 같은 혐오성 환경기초시설에 대한 적정관리방안이 절실히 요구된다.

## 사 사

본 연구의 일부는 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-30900-002-2)지원으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

국회환경포럼(1999) 토양환경문제 워크샵(토양오염 무엇이 문제인가?) (1999. 5. 4.).

김미현, 김민영, 오상인, 윤중섭, 이강웅(2001) 난지도를 중심으로 한 대기 중 BTEX 성분의 농도분포 특성에 대한 연구, 한국대기환경학회지, 17(6), 463-474.

김미현, 박상곤, 백성욱 (2002) 대도시 교통밀집지역 도로변 대기 중 휘발성유기화합물의 농도분포특성, 한국대기환경학회지, 18(2), 113-126.

나광삼, 김용표, 문길주(1998) 서울 대기 중에서의 C<sub>2</sub>~C<sub>9</sub> 휘발성유기화합물의 농도, 한국대기보전학회지, 14(2), 95-105.

백성욱, 김미현, 서영교(2003a) 발생원 유형에 따른 공기 중 휘발성 유기화합물의 비산배출 특성 평가, 한국대기환경학회지, 19(4), 363-376.

백성욱, 송정환, 김미현, 김수현, 원양수, 공인철, 김승현 (2003b) 도시 쓰레기 매립장 지표면에서의 VOC 배출 특성, 대한환경공학회지, 25(10), 1258-1270.

백성욱, 황승만, 박상곤, 전선주, 김병주, 허귀석(1999) 흡착포집 및 열탈착/GC분석에 의한 공기 중 휘발성 유기화합물의 측정방법론 평가, 한국대기환경학회지, 15(2), 121-138.

환경부(2003) 전국폐기물 매립장 현황, 환경부 홈페이지 폐기물자원국 생활폐기물과.

Fischer, M.L., A.J. Bentley, K.A. Dunkin, A.T. Hodgson, W.W. Nazaroff, R.G. Sextro, and J.M. Daisey (1996) Factors affecting indoor air concentrations of volatile organic compounds at a site of subsurface gasoline contamination, Environ. Sci. Technol., 30, 2948-2957.

Hodgson, A.T., K. Garbesi, R.G. Sextro, and J.M. Daisey (1992) Soil-gas contamination and entry of volatile organic compounds into a house near a landfill, J. Air Waste Manage. Assoc., 42, 277-283.

Smith, J.A., C.T. Chiou, J.A. Kammer, and D.E. Kile (1990) Effect of soil moisture on the sorption of trichloroethene vapor to vadosezone soil at Picatinny Arsenal, New Jersey, Environ. Sci. Technol., 24(5), 676-683.

USEPA (1990) Definition and procedure for the determination of the method detection limit, Code of Federal Regulations, Part 136, Appendix B, 537pp.

USEPA (1992) Organic air emissions from waste management facilities, Seminar publications, EPA/625/R-92/003, 115pp.

USEPA (1997) Compendium method TO-17-determination of volatile organic compounds in ambient air using active sampling onto sorbent tubes, Compendium of method for the determination of toxic organic compounds in ambient air, 2nd ed., EPA/625/R-96/010b.