

## 국내 매립지에서의 BTEX 성분을 중심으로 한 VOCs 배출량 산정 연구

### Estimation of VOCs Emissions Based on BTEX Compounds from Landfill Sites in Korea

정성운 · 김유정 · 장석진 · 김기현<sup>1)</sup> · 홍지형<sup>2)</sup> · 김조천 · 선우 영\*

건국대학교 환경공학과/차세대환경기술센터,

<sup>1)</sup>세종대학교 지구환경과학과, <sup>2)</sup>국립환경과학원 대기총량과

(2005년 11월 12일 접수, 2006년 1월 4일 채택)

S.W. Jung, Y.J. Kim, S.J. Jang, K.H. Kim<sup>1)</sup>,

J.H. Hong<sup>2)</sup>, J.C. Kim and Y. Sunwoo\*

*Department of Environmental Engineering/iETec, Konkuk University,*

<sup>1)</sup>*Department of Earth & Environmental Sciences, Sejong University,*

<sup>2)</sup>*Area-Based Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research*

(Received 12 November 2005, accepted 4 January 2006)

#### Abstract

Odor problems brought about by deteriorating air quality occur in areas surrounding landfills because VOCs emissions from landfills are exhausted through surface soil and gas vents. Due to these factors, monitoring of VOCs emissions from landfills are essential. However, only a few studies have been carried out to assess VOCs emissions from landfills. A comprehensive approach to this problem is definitely warranted.

In this study, we estimated BTEX emissions from 7 landfill sites in Korea using field experiments and LandGEM (Landfill Gas Emission Model), which is the USA EPA (Environmental Protection Agency)-recommended model for landfill gas emission estimation. For this purpose, we suitably modified the model's major input parameters  $L_0$  and  $k$  according to 3 classes based on landfill scale after considering the characteristics of field experiments and LandGEM data. Consequently, we estimated VOCs emissions from landfills for cities, provinces and all of Korea after modifying  $L_0$  &  $k$  using LandGEM.

Through the results of this study, we obtained essential basic data with respect to present conditions which will help us understand VOCs emissions from landfills in Korea.

**Key words :** VOCs, Emissions, BTEX, LandGEM,  $L_0$ ,  $k$

---

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-450-3541, Fax : +82-(0)2-455-5175

E-mail : ysunwoo@konkuk.ac.kr

## 1. 서 론

휘발성 유기화합물질 (volatile organic compounds: VOCs)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 대기와 토양 및 지하수에 대해 큰 문제를 일으킬 수 있다(국회환경포럼, 1999).

국내 폐기물 발생량은 경제성장, 인구증가, 산업발달 등에 의해 크게 증가하여 2002년에는 약 269,548 ton/day (생활폐기물, 사업장폐기물, 건설폐기물 포함)가 발생되었으며, 대부분이 매립처분되고 있는 실정이다. 이런 매립으로 인해 발생하는 매립가스 중에는 폐기물 분해과정에서 배출되는 황화합물과 암모니아, 아민류와 같은 악취물질과 폐기물 중 페인트, 유기용제, 세제, 살충제, 접착제, 화장품 등에서 발생하는 휘발성 유기화합물(VOCs)을 들 수 있다(백성우 등, 2003).

VOCs는 광화학 스모그(photochemical smog)의 전구물질로 규명되어, 이들의 생생메커니즘에 대한 포괄적이고 종합적인 연구가 진행되어 지속적으로 발전되어 왔다. 최근에는 도시의 오존농도가 증가하여 규제수준을 초과하는 횡수가 많아짐에 따라 VOCs의 대기 중 거동과 광화학 반응에서의 중요성이 인식되어 이를 규명하기 위하여 활발히 연구가 진행되고 있으며, 오존의 생성을 최소화하기 위한 방법으로 VOCs와 같은 탄화수소류를 제어하는 방법이 연구되고 있다(Barbara *et al.*, 1996).

매립지로부터 배출되는 휘발성 유기화합물질(VOCs)은 지표면이나 배출공 등을 통해 배출이 이루어지므로 주변지역의 악취문제 유발 또는 대기질 저하를 초래할 수 있는 문제점이 발생한다. 이러한 요인들로 인해, 매립지 지역은 환경·보건학적 관점에서 적절한 관리방안이 요구되며, 이를 위해 국내 매립지에서의 VOCs 배출량을 산정하는 것은 중요하다.

본 연구는 7개의 국내매립지의 실측자료를 기초로 하고, 미국 EPA의 매립지 배출가스 산출 추천모델인 LandGEM을 사용하여 국내 매립지에서 배출되는 BTEX의 배출량을 산정하였다. 매립지를 규모와 매립 종료 유무를 고려하여 3가지로 분류하였으며, 각

분류에 적합하도록 LandGEM의 주요 입력 파라미터인  $L_0$ 와 K 값을 결정하였다. 앞선 조건을 고려하여 전국 매립지의 VOCs 배출량(2000년 기준)을 시, 도 별로 산정하였다. 본 연구는 국내 매립지의 VOCs 배출량 관리에 중요한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 VOCs 시료채취

본 연구를 위한 시료채취지점은 난지도, 광주, 경산, 제주, 대구, 동해 신·구매립지로서 위치는 그림 1에 나타내었다. 측정기간은 2000년 9월부터 2004년 12월까지이며, 4년간 총 15회 측정을 하였다. 각 매립지별 측정기간 및 기본적인 정보는 표 1에 기록하였다.

본 연구에서는 모든 조사 대상 매립지들의 배출공으로부터 배출되는 매립가스 중 방향족 VOCs 성분을 대상으로 관측을 실시하였다. 대부분의 분석대상 시료는 테들러백을 이용하여 매립지에 산재한 배출공(또는 중앙회수시설)으로부터 직접 채취하였다. 대부분의 매립지에서 배출공에 대한 직접 채취를 원칙

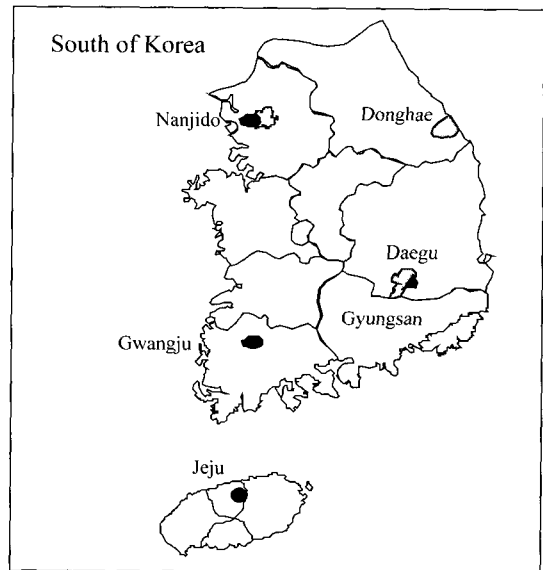


Fig. 1. Geographical location of landfill sites investigated in this study.

**Table 1. Measurement period & basic information for landfill sites in this study.**

Landfill area	Measurement period	Landfill category	Landfill vol. (m <sup>3</sup> )	Landfill period	Landfill type
Gwangju	2002. 12/9 ~ 11, 2003. 8/4 ~ 5	Medium · large class	4,369,000	1993 ~ 2004	Sanitation
Jeju	2003. 7/22 ~ 23		2,294,000	1991 ~ 2008	
Daegu	2004. 1/13 ~ 16, 8/14 ~ 15		9,225,000	1990 ~ 2005	
Donghae*	2004. 5/15 ~ 16, 7/14 ~ 15, 11/6, 12/20	Small class	315,387	1999 ~ 2006	Sanitation
Nanjido	2000. 9/20 ~ 10/4	Completed	113,750,000	1978 ~ 1992	Non-sanitation
Gyungshan	2003. 1/14 ~ 15		165,623	1989 ~ 2003	Sanitation
Donghae**	2004. 5/15 ~ 16, 7/14 ~ 15, 11/6, 12/20		600,000	1981 ~ 1999	Non-sanitation

\* : New, \*\* : Old.

으로 적용하였지만, 제주에 위치한 매립지에서는 배출공 및 중앙회수시설로부터 시료를 채취한 측정치의 평균값을 사용하였다. 매립가스 중 VOCs 시료는 10 (또는 3) 리터 크기의 테들러백을 진공형 간접채취시스템에 연결하여 채취하였다(김기현 등, 2005, 2001).

**2.2 VOCs 분석방법**

본 연구에서는 매립지 환경에 존재하는 VOCs 성분을 정량적으로 관측하기 위해, 배출공으로부터 배출되는 가스(Landfill gas; 이하 LFG) 내의 주요 방향족 VOCs 성분에 대해 분석하였다. 방향족 VOCs 성분의 분석은 GC-FID (Model DS 6200, Donam Instrument, Korea)와 열탈착 전용기 (Markes International Ltd., UK)를 조합한 극미량 분석채취시스템을 활용하였다.

테들러백에 담긴 시료는 열탈착 전용기 내부에 장착된 흡입펌프와 MFC (mass flow controller)를 통해 일정한 유량 (80 mL/min)으로 5분간 열탈착 전용기 내부로 주입시켰다 (총 분석유량은 400 mL 수준). 주입된 시료는 펠티어쿨러에 의해 -10°C로 유지되는 조건에서 cold trap을 통해 저온농축 (cryo-focusing) 시켰다. 이렇게 농축된 시료는 열탈착과정 (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 가열시켜 최종온도에서 5분 동안 유지하도록 하였다. GC분석을 위한 가스는 다음의 조건으로 사용하였다: H<sub>2</sub>=30; N<sub>2</sub> (Makeup gas)=30; Air=300 mL/min (김기현 등, 2005, 2001).

**2.3 LandGEM 모델의 원리 및 BTEX 배출량 산정방법**

매립가스는 쓰레기매립지의 가스발생을 유발시키는 내적·외적인자에 의해서 변한다고 보는데 먼저 내부요인으로 온도, 함수율, pH, 알칼리도, 영양분, 독성물질 등을 들 수 있고, 다음에 외부요인으로 대기 온도, 기압, 강수량, 지형, 수분 등을 들 수 있다. 또 매립가스는 쓰레기 성분 중 유기물이 분해되어 생성되며 이 유기물의 분해는 크게 두 가지 형태로 진행되는데 즉, 매립후의 초기에는 호기성분해가 이루어지고 그 후 어느 정도 시간이 경과하여 토양 속의 산소가 소비되면 혐기성분해가 일어나게 된다. 일반적으로 쓰레기 1톤 (유기물의 양 200 kg)이 분해될 경우, 약 200 m<sup>3</sup>의 가스가 이론적으로 발생하는 것으로 되어 있으나, 실제로 측정결과는 약 60 ~ 180 m<sup>3</sup>가 발생하고 있다 (장영기와 서정배, 1998).

매립지 속에 있는 화합물에 대한 미처리 배출물을 계산하기 위해서는 우선, 전체 매립가스 배출을 계산해야 한다. 일반적으로 매립 후 1~2년 후, 즉 매립지가 평형상태에 이르면 매립가스의 조성은 대략적으로 CH<sub>4</sub> 50%, CO<sub>2</sub> 50%, 그리고 미량의 비메탄 유기화합물로 구성되므로 전체 매립가스 배출량 계산은 CH<sub>4</sub>와 CO<sub>2</sub> 배출량의 합산으로 유도된다 (EPA, 1998). 그러므로 전체 매립가스 배출량은 이론적 CH<sub>4</sub> 발생 이론에 기초한 1차 속도식 모델에 의하여 각각의 쓰레기 매립지별로 계산이 되어진다. LandGEM에서 매립가스 배출량 계산 방정식은 식(1)과 같다.

$$Q_{CH_4} = L_0 R (e^{-kc} - e^{-kt}) \tag{1}$$

$Q_{CH_4}$  : Methane Generation rate, m<sup>3</sup>/yr

$L_0$  : Methane Generation Potential,  $m^3 CH_4/Mg$  refuse  
 R ; Annual waste landfill rate,  $Mg/yr$   
 k : Methane Generation Rate Constant,  $yr^{-1}$   
 c : Time after completing landfill, yr  
 t : Time after starting landfill, yr

매립지 정보인 변수 R, c 및 t는 대상매립지의 매립처리현황자료(환경부, 2003)를 사용하였으며, 폐기물 매립율 정보가 부족할 때 연간 폐기물 매립율 R은 총 매립된 폐기물의 양을 매립시작 연도부터 매립종료 연도까지로 나누어 사용하였다. k는 폐기물의 수분함량, pH, 온도, 기질영양 등의 함수이다.  $L_0$ 는 폐

기물의 수분과 유기물 함량의 함수이다.  $L_0$ , k값 및 NMOCs(Nonmethane organic compounds) 농도는 사용자에 의해 결정되거나 AP-42에서 권장하는 default 값을 사용할 수 있다.

미국 환경청은 쓰레기 매립지에서 발생하는 매립가스량을 예측하기 위해 기존의 1997년 LAEEM을 1998년 LandGEM(Landfill Gas Emission Model)으로 발전시켰다. 이 모델은 미 환경청의 대기오염배출계수 AP-42의 계산방식을 적용한 PC용 대기오염배출량 산출모델로서 미국 환경청의 EIIP(Emission Inventory Improvement Program)에서 보고된 “대기오염 배출량 산정을 위한 선정 및 대안적인 방법(Preferred and Alternative Methods for Estimating Air

**Table 2. Comparison of emissions estimation methodology.**

	Method I	Method II	Method III	Method IV	
Principles	Basics	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estimation of emissions based on population</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Using a regression model</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Using AP-42 formulas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Using modified AP-42 formulas</li> </ul>
	Details	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wastes per a person and estimation of waste emissions using population</li> <li>• Estimation of emissions using method II</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regression analysis between waste and surrogate factor</li> <li>• Estimation of waste emissions</li> <li>• Estimation of emissions using method II</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Using AP-42 data</li> <li>• Estimation of emissions using AP-42 formulas (LandGEM)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Collection and experiment domestic data</li> <li>• Modification for parameter of AP-42 formulas (LandGEM)</li> <li>• Estimation of emissions using AP-42 formulas</li> </ul>
Use	<ul style="list-style-type: none"> <li>• As estimating waste emissions, using the case of no other method</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estimation of total emissions from landfill sites at inventory area</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Using if landfill amount and landfill period are only</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estimation of reliable emissions rather than each landfill site</li> </ul>	
Spatial emissions	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inventory area included landfill sites</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inventory area included landfill sites</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Each landfill</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Each landfill</li> </ul>	
Input data	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Population No.</li> <li>• Wastes (ton/person/year)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prospect No. for landfill sites at inventory area</li> <li>• Surrogate activities (population, population density, educational level, land use etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Landfill amount</li> <li>• Landfill period</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Landfill amount</li> <li>• Landfill period</li> <li>• Yes/no → disposal for both hazardous and life wastes</li> <li>• Information for control device of LFG (landfill Gas)</li> <li>• Methane generation rate constant (k)</li> <li>• Potential methane generation (<math>L_0</math>)</li> <li>• Concentrations of LFG (ppmv)</li> </ul>	
Merit/fault	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No need for expert data</li> <li>• Possibility with a little efforts</li> <li>• No explaining for landfill sites, waste reduction program, waste transport, reduction device</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suitable for big inventory area</li> <li>• As preparing statistic ability, data collection and preparation are a need for know-how</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possible for a little efforts</li> <li>• Big uncertainty because of using assumption and common data</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estimation of more reliable emissions</li> <li>• Need for much budget and time</li> <li>• Need for expert opinion</li> </ul>	

Emissions)” 중 쓰레기매립지에 적용할 수 있는 모델로 추천하고 있다. 이 모델은 쓰레기 매립지의 연도별 매립량에 의하여 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, NMOCs 및 유해대기 오염물질의 연도별 발생량을 매립 시작 연도부터 매립 종료 후 지정된 연도까지 산출할 수 있다.

본 연구를 진행하기에 앞서 국내외에서 적용되고 있는 매립가스 배출량 산정방법들을 조사하였으며 각 연구에서 사용한 여러 방법에 대한 장·단점 등을 비교하였다(표 2). 매립지에서의 매립가스 배출량 산정을 위한 여러 방법을 검토한 결과, 국내에 실정을 반영하기에 가장 유리한 방법 IV를 선택하였다. 미국 EPA에서 권장하는 매립지 배출량 모델인 LandGEM을 사용하기로 하였고, 매립가스량에 대한 주요한 파라미터는 국내 매립지의 실측 자료를 사용하여 수정하기로 하였다. LandGEM 모델은 매립지에서의 매립가스 배출량 산정을 위해 EPA에서 개발한 모델이며, 톨루엔을 비롯하여 주요 42개의 VOCs에 대하여 배출량을 산정할 수 있다.

수정된 AP-42식의 파라미터를 변경하여 배출량을 산정하는 방법 IV는 표 3과 같은 LandGEM 모델의 입력파라미터가 필요하다. 이 중 매립량, 매립기간, 위생/비위생 항목은 각 매립지들에 대한 정보로서 환경부의 자료를 사용하였고, NMOCs 및 VOCs 농도, 제어장치효율, 메탄생성잠재력 (L<sub>0</sub>), 메탄생성속도 (k) 항목은 측정된 7개 매립지의 결과를 사용하였다.

LandGEM 모델을 이용하여 매립지로부터 배출되는 VOCs 배출량의 산정방법은 다음과 같다. 측정된 BTEX 성분의 농도를 LandGEM 모델에 입력한 후, 본 연구의 3가지 분류별로 실측값에 가장 근접한 모델값을 구하기 위해 LandGEM 모델의 주요 입력파라미터(L<sub>0</sub>와 k)를 보정하면서 모델을 실행하였다. 그 결과 각 분류별로 보정된 L<sub>0</sub>와 k값을 구하였으며, 이

를 국내 매립지에 적용하여 전국 시·도별 VOCs 배출량을 산정하였다.

### 2.4 LandGEM 모델의 주요 파라미터인 L<sub>0</sub>, k 값의 산정

LandGEM 모델의 이론식 [ $Q_{CH_4}=L_0 R(e^{-kc}-e^{-kt})$ ]에서 매립지가 매립이 종료되었는지 진행 중인지의 여부에 의해 메탄생성속도인 k값과 메탄생성량인 Q<sub>CH<sub>4</sub></sub>값의 관계가 달라진다. 매립이 종료되면 k값이 증가할수록 Q<sub>CH<sub>4</sub></sub>값은 감소하지만 매립이 진행 중일 경우는 c=0이므로 k값이 증가할수록 Q<sub>CH<sub>4</sub></sub>값 또한 증가하게 된다. 또한 매립종료와 함께 매립가스의 배출량은 점점 감소하게 된다. 따라서 매립이 진행 중인 매립지와 매립이 종료된 매립지의 경우로 나누어서 파라미터를 산정하는 것이 용이하다.

매립가스의 발생에는 폐기물의 수분함량, pH, 온도, 기질영양 등의 영향을 받으며, 기온과 강수량 등의 외부요인도 크게 작용한다. 이러한 영향인자들은 매립지의 규모에 따라 영향을 받는 정도가 다르다. 따라서 매립용량에 따라 파라미터를 달리하는 것도 타당할 수 있다.

매립의 종료 유무와 매립의 용량을 고려하여 매립지를 분류하여 각 분류별로 L<sub>0</sub>와 k를 구하였다. 매립지의 용량은 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> 이상을 중·대형, 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> 미만의 매립지를 소형으로 분류하였다. 매립지의 용량에 따른 분류는 매립이 진행 중인 매립지에 대해서만 적용하였다. 매립이 종료된 매립지의 배출량은 매립이 진행 중일 때의 배출량과 비교하여 크게 낮아 용량에 따라 L<sub>0</sub>와 k를 변화하여도 큰 변화가 없어 매립지 용량에 따라 분류를 하지 않았다.

본 연구에서 실측한 매립지 중 매립 진행 중인 중·대형 매립지는 광주, 대구, 제주 매립지이고 소형 매립지는 동해 신 매립지이다. 매립이 종료된 매립지는 난지도, 경산, 동해 구 매립지이다.

**Table 3. Basic data to estimate VOCs emissions from landfill site using LandGEM.**

No.	Basic data categories
1	Landfill amount
2	Landfill period
3	Sanitation/insanitation
4	NMOCs (Non methane organic compounds) concentrations
5	VOCs (Volatile organic compounds) concentrations
6	Control device efficiency
7	Methane generation potential (L <sub>0</sub> ), Methane generation rate constant (k)

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 현장측정을 이용한 매립지에서의 BTEX 배출량 산정

3.1.1 BTEX 배출량 산정을 위한 농도 측정 결과  
표 4~5에서는 BTEX 성분들을 중심으로 배출공

의 LFG시료와 매립장 주변의 환경대기 시료들에 대한 분석결과를 통계적으로 요약하였다. 표 4의 결과에 의하면, 매립장의 가동 여부 및 연한 등에 따라 배출공 내부의 농도에 상당 수준 차이가 난다는 것을 확인할 수 있다. 톨루엔과 같은 주요 성분은 중심으로 매립장간의 농도를 비교해 볼 때 다음과 같은 경향을 보였다.

매립이 진행 중인 중·대형매립지의 광주, 대구, 제주와 소형매립지인 동해 신 매립장 등의 경우, 배출가스에서 관측한 VOCs의 농도가 대체로 수~수십 ppm을 기록하는 것으로 나타났다. 이러한 농도 수준은 이미 국내외를 막론하고, 매립이 진행 중인 매립장에서 일반적으로 발견되는 VOCs의 고농도 수준에 가깝다. 참고로, 독일의 두 도심 지역 매립장을 대

상으로 방향족 VOCs를 측정된 결과에 의하면, 벤젠의 농도가 수백 ppb에 이르고, 다른 성분들은 수~수십 ppm에 달하는 것으로 나타났다(Schweigkofier and Reinhard, 1999). 이에 반해, 매립이 종료된 경산, 동해 구매립장 등에서는 대체로 수십에서 수백 ppb의 농도를 기록하였다. 그러나 동해 구매립장에서 확보한 배출공의 농도는 상당히 변화가 클 가능성을 보여 준다. 여름철에 수 십 ppb 수준을 유지하지만, 가을철 결과는 이보다 10여 배 더 증가한 농도를 보였다.

3. 1. 2 BTEX의 배출량 산정

본 연구의 주요 목적 중의 하나는 매립가스로 배출되는 BTEX 배출량을 정확하게 정량적으로 산출하

Table 4. A statistical summary of landfill gas (LFG) emission concentration of BTEX compounds from all landfill sites (unit: ppb).

Landfill area	Benzene	Toluene	Etylbenzene	M, P-xylene	O-xylene
Nanjido	31.8±61.8 (14.9)* 0.2~320 (52)**	259±287 (204) 3.6~1431 (53)	- -	10.4±16.9 (4.12) 0.2~69.4 (25)	45.1±61.1 (28.3) 0.1~311 (51)
Gwangju (winter)	234±143 (201) 35~479 (14)	10,883±10,355 (7,218) 1,018~32,316 (14)	2,978±2,286 (2,286) 604~8,133 (15)	2,362±1,553 (2,142) 454~7,072 (15)	-
Gwangju (summer)	924±1,054 (494) 135~2,767 (6)	2,610±2,354 (1,484) 66~6,341 (6)	982±498 (999) 412~1,723 (6)	1,045±522 (960) 509~1,794 (6)	-
Gyungsan	2.5±3.1 (1.2) 0.5~8.6 (10)	34.4±28.7 (24.5) 6.0~102 (10)	11.1±9.9 (8.4) 2.5~32.3 (10)	10.2±7.3 (8.6) 3.2~24.5 (10)	13.4±15.1 (8.7) 2.4~52 (10)
Jeju	828±718 (697) 184~1,603 (3)	1,808±1,529 (1,566) 414~3,444 (3)	1,264±874 (1,624) 267~1,899 (3)	946±691 (1,012) 225~1,602 (3)	1,269±886 (1,495) 292~2,020 (3)
Daegu (winter)	1,564±1,695 (1,178) 126~7,125 (14)	64,765±74,438 (28,902) 411~253,370 (14)	5,893±3,423 (6,120) 686~10,683 (14)	4,431±2,656 (4,644) 472~8,374 (14)	1,001±745 (1,081) 64.7~1,993 (14)
Daegu (summer)	2,674±2,186 831~8,529 (10)	39,593±37,690 2,123~90,965 (10)	6,954±3,027 2,988~11,159 (10)	401±2,164 1,588~7,659 (10)	2,561±1,488 107~4,732 (10)
Donghae*** (spring)	642±405 285~1,220 (4)	5,141±3,101 1,962~9,036 (4)	1,991±745 996~2,703 (4)	1,081±394 693~1,519 (4)	536±273 244~820 (4)
Donghae*** (summer)	5,091±3,695 1,276~8,611 (4)	6,142±6,749 719~15,984 (4)	3,353±3,216 568~6,320 (4)	2,556±1,719 374~4,503 (4)	1,760±1,062 212~2,587 (4)
Donghae*** (fall)	171±150 17.2~329 (4)	1,364±899 390~2148 (4)	1778±1226 133~3030 (4)	777±501 113~1312 (4)	80.3±85.9 0.12~184 (4)
Donghae*** (winter)	139±112 16.9~238 (3)	538±363 133~834 (3)	1,293±1,013 124~1,909 (3)	536±435 88.2~957 (3)	142±123 18.3~264 (3)
Donghae**** (spring)	29.5±10.8 22.8~42 (3)	303±49.5 246~333 (3)	107±62.5 51.1~175 (3)	123±70.9 49.4~191 (3)	53.3±24.4 25.5~71.2 (3)
Donghae**** (summer)	7.7±0.7 7.3~8.5 (3)	21.1±8.5 13.5~30.2 (3)	19.4±21 0.9~42.3 (4)	12.6±13 0.2~26.2 (3)	9.3±9.1 1.8~19.4 (3)
Donghae**** (fall)	0.4±0.2 0.3~0.6 (4)	8.8±5.0 2.5~13 (4)	4.3±1.8 1.8~5.6 (4)	3.0±1.2 1.2~3.7 (4)	2.6±2.7 0.4~6.2 (4)
Donghae**** (winter)	52.7±101 0.4~203 (4)	582±753 6.8~1,613 (4)	174±226 3.0~488 (4)	128±180 2.4~387 (4)	83.9±158 0.4~321 (4)

\*: Mean ± s.d (median), \*\*: Concentration range (sample number), \*\*\*: New, \*\*\*\*: Old.

는 데 있다. 이러한 과정은 결국 주어진 매립장 환경의 총체적 배출량을 평가하는데 있어서 기본적인 정보를 확인할 수 있다. 이를 위하여, BTEX와 주요 매립가스의 배출량을 조사하였다. 이러한 방법은 이미 Kim and Kim (2002)에 의한 난지도 매립장 지역의 배출공을 통한 수은의 배출량을 산출한 사례와 유사한 방식이다. 표 5에서는 이를 적절하게 조절하여 BTEX 성분들에 대한 배출량 산정을 시도하였다.

본 연구에서 측정된 일부 지역의 매립장에서는 비교적 단기간의 실험을 통해 자료의 수집이 이루어졌다. 따라서 이들 자료를 이용한 배출량의 산출결과가 갖는 의미는 상대적으로 제한적일 수도 있다. 이렇게 산출한 배출량 수치는 서로 다른 매립장 환경과 연

계하여 설명할 수 있도록 매립장의 조건에 맞추어 배출 강도를 평가하는데 개략적인 기준으로 사용하였다. 각 매립장 지역의 BTEX 배출 규모를 산정하기 위한 가장 기본적인 수준으로, 실측을 통해 확보한 LFG의 농도에 배출공의 단면적과 배출속도를 고려하여, 개별 배출공들에 대한 BTEX 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

**Table 5. A statistical summary of landfill gas (LFG) flux of BTEX compounds from all landfill sites. LFG flux is computed for each vent pipe (unit: g/yr).**

Landfill area	Benzene	Toluene	Etylbenzene	M, P-xylene	O-xylene
Nanjido	58.8 ± 148* 0.2 ~ 902(42)**	494 ± 689 1.3 ~ 2,979 (43)	- -	22.4 ± 39.2 0.1 ~ 113 (15)	97.3 ± 133 0.0 ~ 632 (41)
Gwangju (winter)	588 ± 633 62.7 ~ 2,558 (14)	30,952 ± 46,279 2,394 ~ 180,985 (14)	10,308 ± 14,176 1,636 ~ 59,042 (15)	7,360 ± 5,886 1,227 ~ 22,589 (15)	- -
Gwangju (summer)	1,230 ± 1,186 221 ~ 3,018 (6)	4,078 ± 2,279 2,058 ~ 7,131 (6)	2,130 ± 960 917 ~ 3,417 (6)	2,190 ± 714 1,167 ~ 3,125 (6)	4,895 ± 1,836 2,289 ~ 6,960 (6)
Gyung-san	1.28 ± 1.57 0.2 ~ 4.9 (10)	19.8 ± 13.5 3.8 ~ 42.7 (10)	7.6 ± 6.9 1.4 ~ 25.0 (10)	14.2 ± 10.2 3.2 ~ 38.0 (10)	9.4 ± 11.4 1.2 ~ 40.3 (10)
Jeju	1,607 ± 1,390 236 ~ 3,196 (3)	4,136 ± 3,757 627 ~ 8,100 (3)	3,338 ± 2,515 466 ~ 5,147 (3)	4,985 ± 3,973 784 ~ 8,683 (3)	3,345 ± 2,557 509 ~ 5,474 (3)
Daegu (winter)	762 ± 927 35.4 ~ 3,148 (14)	43,627 ± 57,676 136 ~ 117,687 (14)	4,374 ± 5,545 145 ~ 22,325 (14)	6,637 ± 8,475 218 ~ 3,4038 (14)	557 ± 467 32.0 ~ 1200 (14)
Daegu (summer)	702 ± 628 97.6 ~ 1,878 (10)	13,908 ± 18,129 184 ~ 54,698 (10)	2,787 ± 2,502 267 ~ 7,891 (10)	1,790 ± 1,670 134 ~ 5,416 (10)	1,057 ± 1,006 8.7 ~ 3,229 (10)
Donghae*** (spring)	608 ± 411 239 ~ 1,188 (4)	4,947 ± 1,490 3,474 ~ 6,971 (4)	2,621 ± 1,556 1,490 ~ 4,861 (4)	1,339 ± 421 838 ~ 1,722 (4)	626 ± 220 452 ~ 939 (4)
Donghae*** (summer)	6,989 ± 2,873 3,157 ~ 9,593 (4)	8,679 ± 7,021 4,302 ~ 19,120 (4)	5,861 ± 4,156 940 ~ 9,840 (4)	4,407 ± 1,566 2,576 ~ 6,207 (4)	3,011 ± 1,053 1,461 ~ 3,756 (4)
Donghae*** (fall)	109 ± 97 21 ~ 248 (4)	1,665 ± 1,291 112 ~ 3,024 (4)	1,721 ± 1,321 220 ~ 2,856 (4)	779 ± 600 186 ~ 1,539 (4)	94 ± 84 33 ~ 190 (4)
Donghae*** (winter)	205 ± 182 29.8 ~ 392 (3)	979 ± 809 276 ~ 1,863 (3)	2,835 ± 2,972 296 ~ 6,104 (3)	1,333 ± 1,601 43.1 ~ 464 (3)	265 ± 212 43.1 ~ 464 (3)
Donghae**** (spring)	11.0 ± 6.1 6.5 ~ 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)
Donghae**** (summer)	2.9 ± 0.8 2.1 ~ 3.6 (3)	9.7 ± 5.3 4.5 ~ 15.2 (3)	11.1 ± 12.3 0.4 ~ 24.5 (3)	7.2 ± 7.6 0.1 ~ 15.1 (3)	5.2 ± 5.4 0.7 ~ 11.2 (3)
Donghae**** (fall)	0.3 ± 0.1 0.2 ~ 0.4 (4)	5.3 ± 2.8 2.1 ~ 8.6 (4)	3.2 ± 1.2 1.6 ~ 4.6 (4)	2.2 ± 0.8 1.1 ~ 2.9 (4)	1.8 ± 1.6 0.3 ~ 3.8 (4)
Donghae**** (winter)	1.3 ± 1.4 0.3 ~ 3.3 (4)	122 ± 208 6.5 ~ 433 (4)	55.4 ± 61.8 3.3 ~ 140 (4)	32.9 ± 36.5 2.6 ~ 84 (4)	3.4 ± 4.6 0.5 ~ 10.2 (4)

\* : Mean ± s.d (median), \*\* : Concentration range (sample number), \*\*\* : New, \*\*\*\* : Old .

확인할 수 있다. 매립이 진행 중인 시설물들에서는 최저 1,000 g/yr 수준(겨울철 동해 신매립장)에서 최대 40,000 g/yr 수준(겨울철 광주, 겨울철 대구 매립장)까지 배출된다. 이에 반해, 매립이 종료된 시설물들에서는 최저 수십 단위(여름철 경산, 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 연계하기 위한 노력이 추가되어야 할 것으로 사료된다.

### 3. 2 LandGEM을 이용한 매립지에서의 BTEX 배출량 산정

연구기간동안 실측한 매립지들에 대한 BTEX 농도

Table 6. Modified  $L_0$  &  $k$  for estimating BTEX emissions.

Class	Landfill vol. (m <sup>3</sup> )	Landfill area	$L_0$	$k$
Medium · large class	Over 10 <sup>6</sup>	Gwangju, Jeju, Daegu	50	0.04
Small class	Less 10 <sup>6</sup>	Donghae*	80	0.3
Completed	-	Nanjido, Gyungnsan, Donghae**	60	0.5

\* : New, \*\* : Old.

를 LandGEM 모델에 입력한 후, 매립규모 및 종료유무를 고려하여 실측에 의한 배출량 값에 가장 근접한 모델에 의한 배출량 값을 구하기 위하여 LandGEM 모델의 주요 입력파라미터( $L_0$ 와  $k$ )를 보정하면서 모델을 실행하였다. 실행결과, 3가지 분류별로 보정된  $L_0$ 와  $k$ 값을 구하였고 표 6에 나타내었다.

매립이 종료된 매립지에 대해서는 배출량이 매립 중인 매립지에 비해 배출량이 상대적으로 작아  $L_0$ ,  $k$  값을 단일화 했으나, 매립 중인 매립지의 경우 매립지 규모에 따라 다르게 하였다. 매립 중인 중 · 대형 매립지와 소형 매립지는 매립지 용량에 따라 BTEX 배출량이 크게 다르다. 그래서 이를 반영하여  $L_0$ ,  $k$  값을 결정하였다. 보정된  $L_0$ 와  $k$  값을 이용하여 LandGEM 모델을 실행한 후, 실측한 모든 매립지들에 대해 BTEX 배출량을 산정하였다.

측정한 BTEX 농도와 배출유량을 이용하여 실측을 통한 배출량을 산정하였으며, 이를 모델을 통한 배출량과 비교한 결과, 비교적 유사하게 나타났다(그림 2).

매립용량이 약 923만 m<sup>3</sup>으로 대형인 대구 매립지가 약 230~437만 m<sup>3</sup>으로 중형인 제주와 광주 매립지에 비해 BTEX 배출량이 각각 4배와 2.1배이다. 중 · 대형 매립지의 BTEX 성분별 배출량을 비교한 결과, 대형인 대구 매립지가 중형인 광주 및 제주 매

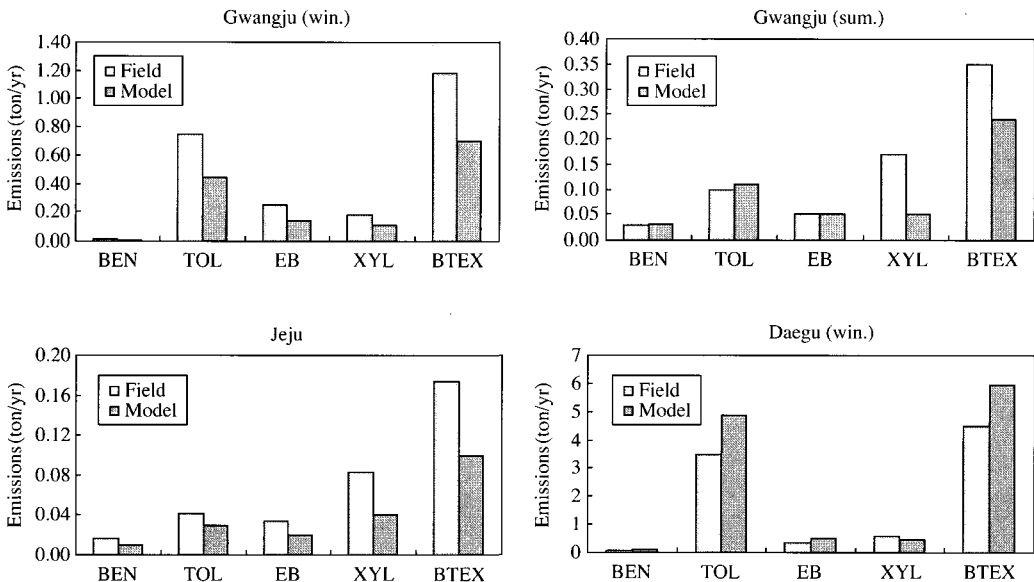


Fig. 2. Comparison of emissions between field data and model data for medium · large landfill sites.



립지에 비해 벤젠은 약 2~7배, 톨루엔은 약 14~131배, 에틸벤젠은 약 6~28배, 자일렌은 약 8~15배, ΣBTEX는 약 11~47배 높게 배출되었으며, 이로 인해 현재 매립중인 매립지에서 매립용량에 따라 BTEX 배출량이 영향을 받는 것으로 사료된다. BTEX 성분 중 톨루엔이 다른 성분들에 비해 높게 나타나는 경향을 보이는데 이는 다른 매립지 연구에서도 보고된 바 있다(백성욱 등, 2003; 김기현 등, 2001).

매립종료된 난지도, 경산, 동해구매립지의 경우, 실측값과 모델값을 비교한 결과, 유사하게 나타났다. 매

립진행중인 중·대형 매립지와 비교하면, 난지도의 경우 매립진행중인 매립지중 배출량이 낮은 제주매립지와 유사한 배출량을 나타낸 반면, 경산 및 동해구매립지에서 BTEX 성분별로 약 10~100배 낮게 나타났다. 일반적으로 매립종료후 5년이 경과되면 LFG는 급속하게 감소되지만, 난지도의 경우 매립종료된지 7년이 경과했지만 매립진행중인 매립지와 유사한 농도로 배출되고 있었다. 매립이 종료된 지역에서의 지표면은 토양 복토 등을 통해 안정화되고 있으나 지하 깊은 곳에 설치된 배관을 통해 가스 배출공으로 방출되는 BTEX 배출 양상은 7년이 경과하더라도 여전히 진행 중 일 수 있다고 추정되어진다(백성욱 등, 2003).

가스 배출공에서의 BTEX 배출량과 종류는 매립시점이 오래될수록 감소하는 뚜렷한 경향을 나타내는 것을 위에서도 확인했다. 이를 좀 더 정확히 분석하고자 동일한 매립지에서 매립종료 및 매립진행중을 함께 볼 수 있는 동해매립지에서 BTEX의 성분의 상대적 기여도를 분석한 결과를 수록하였다(표 9). 신매립지와 구매립지를 비교해 보면, 전반적으로 톨루엔의 기여도가 상승하면서 역으로 에틸벤젠의 기여도가 떨어지는 것으로 나타났다. 매립종료시점이 오래 될수록 매립지의 안정화에 따른 각 물질의 기여도가 상대적으로 변하고 있는 것으로 추정되어진다. 본 연구가 배출공에서 측정을 하였기에 지표면에

Table 7. Comparison between field data and model data for medium · large landfill sites (unit : ton/yr).

Landfill area	Category	Benzene	Toluene	Etylbenzene	Xylene	ΣBTEX
Gwangju (winter)	Field	0.01	0.74	0.25	0.18	1.18
	Model	0.01	0.44	0.14	0.11	0.70
Gwangju (summer)	Field	0.03	0.10	0.05	0.17	0.35
	Model	0.03	0.11	0.05	0.05	0.24
Jeju	Field	0.02	0.04	0.03	0.08	0.17
	Model	0.01	0.03	0.02	0.04	0.10
Daegu (winter)	Field	0.06	3.49	0.35	0.58	4.48
	Model	0.10	4.87	0.51	0.47	5.95
Daegu (summer)	Field	0.06	1.11	0.22	0.23	1.62
	Model	0.17	2.98	0.60	0.72	4.47

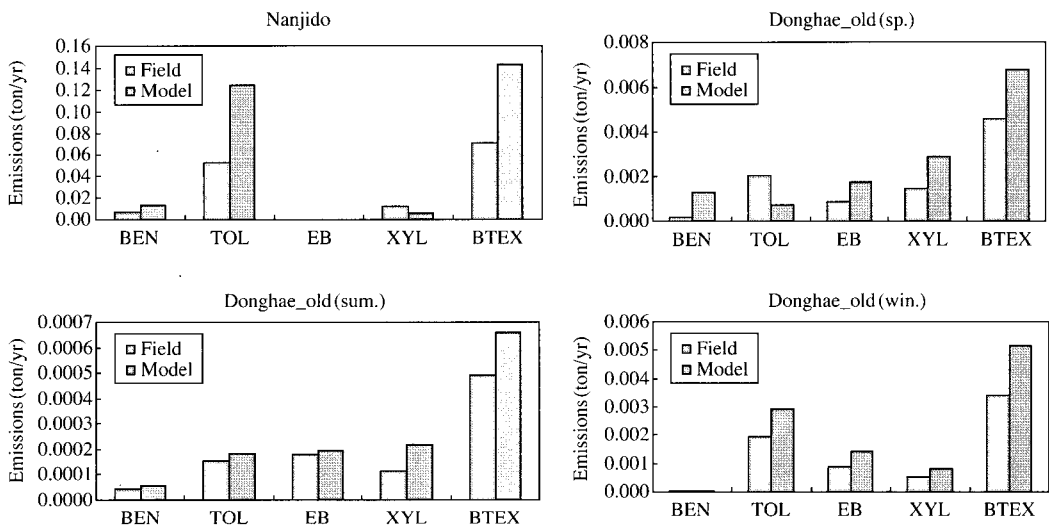


Fig. 3. Comparison of emissions between field data and model data for completed landfill sites.

**Table 8. Comparison of BTEX emissions between field data and model data for completed landfill sites (unit : ton/yr).**

Landfill area	Category	Benzene	Toluene	Etylbenzene	Xylene	ΣBTEX
Nanjido	Field	0.01	0.05	-	0.01	0.07
	Model	0.01	0.13	-	0.01	0.14
Gyungshan	Field	1.1E-04	1.7E-03	6.6E-04	2.0E-03	4.5E-03
	Model	9.8E-03	1.6E-01	5.9E-02	5.4E-02	2.8E-01
Donghae* (spring)	Field	1.8E-04	2.0E-03	9.0E-04	1.5E-03	4.6E-03
	Model	1.3E-03	7.3E-04	1.8E-03	2.9E-03	6.8E-03
Donghae* (summer)	Field	4.6E-05	1.6E-04	1.8E-04	1.2E-04	4.9E-04
	Model	5.8E-05	1.9E-04	2.0E-04	2.2E-04	6.6E-04
Donghae* (fall)	Field	4.0E-06	8.5E-05	5.1E-05	3.5E-05	1.7E-04
	Model	1.1E-05	2.1E-03	3.7E-04	7.1E-04	3.1E-03
Donghae* (winter)	Field	2.1E-05	2.0E-03	8.9E-04	5.3E-04	3.4E-03
	Model	2.9E-05	2.9E-03	1.4E-03	7.9E-04	5.2E-03

\*: Old landfill.

**Table 9. Average contributions (as% in weight basis) of BTEX to ΣBTEX emissions from landfill sites.**

Compound	Donghae**					Donghae*				
	Spring	Summer	Fall	Winter	Mean	Spring	Summer	Fall	Winter	Mean
Benzene	19.5	8.7	0.3	0.6	7.3	10.1	20.3	3.1	4.3	9.4
Toluene	10.7	28.1	65.3	56.7	40.2	10.1	31.5	30.2	18.8	22.7
Etylbenzene	26.4	29.7	11.8	27.5	23.8	44.0	21.2	44.8	53.0	40.7
Xylene	43.5	33.5	22.5	15.3	28.7	35.8	27.0	21.9	23.9	27.2
ΣBTEX	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

\*: New, \*\*: Old.

비해 상대적으로 온도 및 습도 등 계절적인 영향이 적었으며, 이로 인해 계절적 경향을 나타내지 않은 것으로 사료된다.

### 3.3 시도별 및 전국 매립지에서의 VOCs 배출량 산정

표 10은 전국 매립지에서 Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene 등을 포함한 42개의 VOCs 성분별 배출량을 산정한 결과이다. Ethane이 468.1 (ton/yr)로 가장 높게 배출되었고, 두 번째로 Toluene은 93.1 (ton/yr)로 높게 배출되었다. 이는 전체 VOCs 배출량 중 각각 55.9(%), 11.1(%)로서 상당부분을 차지하고 있다. 환경·보건학적으로 중요한 B, T, E, X는 각각 4.5 (ton/yr), 93.1 (ton/yr), 8.8 (ton/yr), 23.0 (ton/yr)이며 ΣBTEX는 129.3 (ton/yr)이다.

본 연구에서의 배출량 산정방법을 사용하여 전국의 지역별 매립지에서의 VOCs 배출량을 산정하였다. LandGEM 모델은 42개의 VOCs에 대하여 성분

별 배출량을 산정할 수 있으며, 본 연구에서는 42개 각각의 VOCs에 대한 배출량을 모두 구해 그 합을 매립지에서 배출하는 VOCs로 사용하였으며, 매립지 VOCs 배출량은 2000년을 기준으로 산정하였다. 시·도별 매립지 VOCs 배출량, 매립용량 및 총인구수에 대한 VOCs 배출량의 비를 표 11에 나타내었다.

전국 지역별로 산정된 매립지 VOCs 배출량에 대하여 중요한 인자인 매립용량 및 총인구수를 이용하여 분석을 수행하였다. 매립용량과 총인구수가 VOCs 배출량에 미치는 영향을 파악하기 위해 인자들(매립용량, 총인구수)에 대한 VOCs 배출량의 비를 구하여 각 지역별로 비교하였다(표 11).

우선 VOCs/vol. ratio를 살펴보면, 서울이 1.0으로 가장 낮은 반면, 충남이 9.3로 가장 높게 나타났다. 서울의 난지도는 매립용량이 인천보다 크지만 매립이 종료된 2000년을 기준으로 하여 7년이 지났으며, 이로 인해 매립가스 배출량이 현저하게 감소했다. 기

존 연구사례에서도 일반적으로 매립이 종료되고 5년 이 경과하면 LFG 배출량은 급격히 감소된다고 보고 되었다(백성욱 등, 2003). 반면 충남은 34개의 중·소매립지로 구성되어 있으며 매립용량은 6,050 (m<sup>3</sup>)

**Table 10. Estimation of VOCs emissions from landfill sites in Korea (2000).**

Rank	Compound	Emissions (ton/yr)	Rate (%)	Rank
1	1, 1, 2, 2-Tetrachloroethane (HAP/VOC)	3.3	0.4	25
2	1, 1, 2-Trichloroethane (HAP/VOC)	0.2	0.0	39
3	1, 1-Dichloroethane (HAP/VOC)	4.1	0.5	23
4	1, 1-Dichloroethene (HAP/VOC)	0.3	0.0	38
5	1, 2-Dichloroethane (HAP/VOC)	0.7	0.1	33
6	1, 2-Dichloropropane (HAP/VOC)	0.4	0.1	37
7	2-Propanol (VOC)	53.6	6.4	3
8	Acetone (VOC)	7.2	0.9	15
9	Acrylonitrile (HAP/VOC)	6.0	0.7	17
10	Benzene (HAP/VOC)	4.5	0.5	21
11	Bromodichloromethane (VOC)	9.1	1.1	9
12	Butane (VOC)	5.2	0.6	18
13	Carbon Disulfide (HAP/VOC)	0.8	0.1	32
14	Carbon Tetrachloride (HAP/VOC)	0.0	0.0	41
15	Carbonyl Sulfide (HAP/VOC)	0.5	0.1	35
16	Chlorobenzene (HAP/VOC)	0.5	0.1	36
17	Chlorodifluoromethane (VOC)	2.0	0.2	27
18	Chloroethane (HAP/VOC)	1.4	0.2	29
19	Chloroform (HAP/VOC)	0.2	0.0	40
20	Chloromethane (HAP/VOC)	1.1	0.1	31
21	Dichlorobenzene (VOC/HAP for 1, 4 isomer)	0.6	0.1	34
22	Dichlorodifluoromethane (VOC)	33.7	4.0	4
23	Dichlorofluoromethane (VOC)	5.1	0.6	20
24	Dimethyl Sulfide (VOC)	8.7	1.0	13
25	Ethane (VOC)	468.1	55.9	1
26	Ethanol (VOC)	22.8	2.7	6
27	Ethylbenzene (HAP/VOC)	8.8	1.1	11
28	Ethylene Dibromide (HAP/VOC)	0.0	0.0	42
29	Ethyl Mercaptan (VOC)	1.4	0.2	30
30	Fluorotrichloromethane (VOC)	1.9	0.2	28
31	Hexane (HAP/VOC)	10.1	1.2	8
32	Methyl Ethyl Ketone (HAP/VOC)	9.0	1.1	10
33	Methyl Isobutyl Ketone (HAP/VOC)	3.5	0.4	24
34	Methyl Mercaptan (VOC)	2.1	0.3	26
35	Pentane (VOC)	4.2	0.5	22
36	Perchloroethylene (HAP/VOC)	10.9	1.3	7
37	Propane (VOC)	8.7	1.0	12
38	Toluene (HAP/VOC)	93.1	11.1	2
39	Trichloroethene (HAP/VOC)	7.0	0.8	16
40	t-1, 2-Dichloroethene	5.2	0.6	19
41	Vinyl Chloride (HAP/VOC)	8.1	1.0	14
42	Xylene (HAP/VOC)	23.0	2.8	5
	VOCs	837.1	100	

로 작지만 현재 매립중인 매립지의 비율이 90% 이상으로 타지역 매립지보다 높기에 배출량이 높은 것으로 추정되어진다.

다음으로 VOCs/pop. ratio의 경우, 인천이 114.9로 타지역에 비해 두드러지게 높게 나타났으며 이는 수도권 매립지의 영향 때문이다. 수도권 매립지의 폐기물 반입현황을 조사한 결과, 현재 수도권 매립지에서는 서울시, 인천시(웅진군 제외)의 폐기물 전량이 수용되고 있으며, 경기도 4개시 5개군을 제외한 경기도 전 지역의 폐기물을 수용하고 있다. 이로 인해 인천의 배출량이 매우 높게 나타났으며, 전체 배출량의 34%를 차지하고 있다. 반면 경기도가 3.9로 가장 낮게 나타났는데 수도권지역에 포함되는 경기도는 인구수 약 9천만명으로 서울과 비슷하지만, 매립 쓰레기의 대부분이 인천의 수도권 매립지에서 처리되고 있기에 배출되는 VOCs 배출량은 인구수에 비해 낮게 나타났다.

전국 시·도별 매립지 VOCs 배출량을 비교한 결과, 인천의 배출량이 284.4 (ton/yr)로 다른 지역과 비교하였을 때 두드러지게 높았고, 다음으로 서울 115.6 (ton/yr), 충남 57.8 (ton/yr), 경남 50.5 (ton/yr), 경북 49.2 (ton/yr), 강원 46.3 (ton/yr)의 순으로 나타났다 (그림 4, 5).

### 3. 4 기존의 국내·외 연구와 비교

기준에 국내에서 수행되었던 CAPSS 연구에서는 매립지 배출량을 산정하기 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다.

$$Q_p = 1.82 Q_{CH_4} \times C_p / (1 \times 10^6)$$

$Q_p$  : NMVOCs emission rate, m<sup>3</sup>/yr

$Q_{CH_4}$  : Methane emission rate, m<sup>3</sup>/yr

$C_p$  : NMVOCs concentrations

여기서 매립지 배출가스 중 NMVOCs 농도는 미국 EPA의 AP-42에 제시된 595 ppmv (as hexane)를 이용했다(유해폐기물을 포함하지 않는 매립지). 이러한 부피 배출량을 다음 중량 배출식을 이용하여 중량 단위배출량을 최종적으로 산정했다(EPA, 1998).

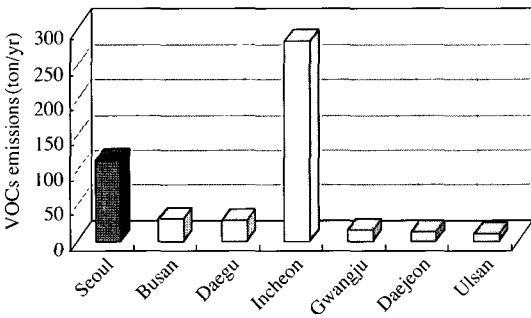
$$U_{mp} = Q_p \times [(MW_p \times 1atm) / (8.205 \times 10^{-5} m^3 atm / gmolK) (1000 g/kg) (273 + TK)]$$

$U_{mp}$  : NMVOCs weight emissions, kg/yr

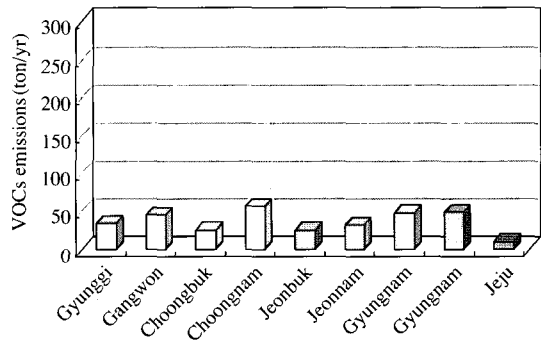
**Table 11. VOCs emissions from landfill sites for cities & provinces in Korea (2000).**

Area	VOCs (ton/yr)	Proportion (%)	Landfill number	Landfill vol. (m <sup>3</sup> )	Population (thousand)	VOCs /vol.*	VOCs /pop.**
Seoul	115.6	13.8	1	113,750	9,895	1.0	11.7
Busan	31.5	3.8	1	9,243	3,663	3.4	8.6
Daegu	30.0	3.6	1	7,595	2,481	4.0	12.1
Incheon	284.4	34.0	3	75,717	2,475	3.8	114.9
Gwangju	15.3	1.8	2	4,745	1,353	3.2	11.3
Daejeon	13.5	1.6	1	3,745	1,368	3.6	9.9
Ulsan	10.9	1.3	2	3,032	1,014	3.6	10.7
Gyeonggi	35.0	4.2	13	6,050	8,984	5.8	3.9
Gangwon	46.3	5.5	36	12,868	1,487	3.6	31.1
Choongbuk	26.1	3.1	13	5,281	1,467	4.9	17.8
Choongnam	57.8	6.9	34	6,228	1,845	9.3	31.3
Jeonbuk	26.6	3.2	19	5,890	1,891	4.5	14.1
Jeonnam	33.0	3.9	70	15,266	1,996	2.2	16.5
Gyungbuk	49.2	5.9	57	11,714	2,724	4.2	18.1
Gyungnam	50.5	6.0	37	21,477	2,979	2.4	17.0
Jeju	11.2	1.3	17	3,077	513	3.6	21.8
Total	837.0	100	307	305,676	46,136	-	-

VOCs/vol.\*=VOCs (ton/yr)/Landfill vol. (m<sup>3</sup>) × 10<sup>6</sup>, VOCs/pop.\*\*=VOCs (ton/yr)/Population × 10<sup>6</sup>.



**Fig. 4. VOCs emissions from landfill sites for 7 cities in Korea (unit: ton/yr).**



**Fig. 5. VOCs emissions from landfill sites for provinces in Korea (unit: ton/yr).**

MW<sub>p</sub> : NMVOCs M.W. (86.18 for NMVOCs as hexane)

T : Landfill emission gas Temperature °C.

이와 같이 산정한 CAPSS의 폐기물 처리에 대한 NMVOCs 배출량은 3.9 (ton/yr)이다.

LandGEM을 이용하여 국내 전국 쓰레기 매립지의 매립가스를 추정하였으며, 입력자료는 1996년 국내 전체 매립지를 대상으로 연도별 매립처리 현황을 이용하였다. 또한 모델 수행에 있어 필요한 L<sub>0</sub> 및 k값은 모델 내 내장되어 있는 미 대기보전법 규정값

**Table 12. L<sub>0</sub> and k value by CAA and AP-42 defaults in LandGEM.**

Category	L <sub>0</sub>	k
CAA defaults	170 m <sup>3</sup> /Mg of refuse	0.05 L/yr
AP-42 defaults	100 m <sup>3</sup> /Mg of refuse	0.04 L/yr

(Clean Air Act default values)을 적용하였다 (장영기와 서정배, 1998).

이와 같이 산정한 1996년 전국 매립지에서의 NVOCs 배출량은 48,161 (ton/yr)이다.

**Table 13. VOCs (ton/yr) of Comparison between this and other study.**

Category	Year	VOCs	This./other.
This study	2000	837	1.0
Other study*	2000	3.9	0.005
Other study2**	1996	48,161	57.5

Other study\*: Ministry of Environment (2002), Other study2\*\*: Jang & Seo (1998).

표 13에서 CAPSS의 결과는 전국 매립에 의해 발생하는 VOCs 배출량을 3.9 (ton/yr)로 장영기와 서정배, 1996은 48,161 (ton/yr)로 산정하였다. 이는 본 연구에서 산정한 837 (ton/yr)에 비해 기존연구1은 매우 작은 양으로 VOCs 배출량이 약 200배 정도 과소평가된 반면, 기존연구2는 매우 큰 양으로 VOCs 배출량이 약 60배 정도 과대평가되었다.

기존연구1의 경우 국내 매립지에 특성 및 환경조건을 고려하지 않고 외국에서 사용하는 산출식을 적용하여 VOCs 배출량을 산정함으로써 과소평가되었으며, 기존연구2의 경우는 LandGEM 모델의 주요 입력파라미터인  $L_0$ 와  $k$ 값을 미국 EPA에서 사용하는 값을 적용하여 VOCs 배출량을 산정함으로써 과대평가되었음을 알 수 있다. 이로 인해 매립에 의한 VOCs 배출이 인체 및 생태계에 미치는 영향이 그 동안 상대적으로 과소·과대평가되었다고 추정되어진다.

#### 4. 결 론

본 연구는 7개의 국내매립지 실측자료와 LandGEM 모델의 특성을 고려하여 매립지를 3가지로 분류하였으며, 각 분류에 적합하게 LandGEM 모델의 주요 입력파라미터인  $L_0$ 와  $k$ 를 보정하여 전국 모든 매립지에 적용한 후, 시·도별 및 전국 VOCs 배출량을 산정하였다.

1. LandGEM 모델의 주요 입력파라미터인  $L_0$ 와  $k$ 를 보정한 결과, 매립중인 중·대형 매립지는 50, 0.04, 매립중인 소형 매립지는 80, 0.03, 매립종료된 매립지는 60, 0.5였으며, EPA default 값 (AP-42, CAA)인  $L_0=100, 170$ 과  $k=0.04, 0.05$ 를 적용할 때 과대평가되어 국내 현실에 적합한 배출량 산정에는 문제가 있는 것으로 사료된다.

2. 전국 시·도별 매립지의 VOCs 배출량을 산정한

결과, 인천 284.4 (ton/yr), 서울 115.6 (ton/yr), 충남 57.8 (ton/yr), 경남 50.5 (ton/yr)의 순으로 나타났다. 서울 및 경기도의 대부분의 폐기물을 수용하고 있는 수도권 매립지의 영향으로 인천이 가장 높게 산정된 반면, 서울의 난지도는 매립용량이 인천보다 크지만 매립 종료된 지 7년이 지났으며, 이로 인해 매립가스 배출량이 현저하게 감소한 것으로 사료된다.

3. VOCs 성분별 배출량을 산정한 결과, Ethane : 468.1 (ton/yr), Toluene : 93.1 (ton/yr)로 높게 배출되었으며 이는 전체 VOCs 배출량 중 각각 55.9 (%), 11.1 (%)로 상당부분을 차지하고 있다. 환경·보건학적으로 중요한 B, T, E, X는 각각 4.5 (ton/yr), 93.1 (ton/yr), 8.8 (ton/yr), 23.0 (ton/yr)이며  $\Sigma$ BTEX는 129.3 (ton/yr)으로 산정되었다.

4. VOCs 배출이 집중되는 배출공을 위주로 측정을 하였으나 매립지 표면 등 기타 배출형태에 대한 조사가 진행되지 못하였다. 배출공에서의 배출이 매립지에서의 VOCs 배출의 주요형태이나 배출공 사이의 편차가 크게 나타난 것은 대표성의 신뢰도를 저하하는 요인이 될 수 있다.

5. 기존 연구에 비해 많은 실측자료가 기초가 되어 국내 매립지 VOCs 배출량에 대하여 신뢰도가 향상되었으며, 시·도별 매립지에서의 배출량을 산정하여 수도권 대기질 개선 대책에 및 지역 대기질 개선의 기초자료로서도 활용할 수 있을 것으로 기대되어진다.

#### 감사의 글

본 연구는 환경부의 차세대 핵심환경기술개발 연구사업의 지원으로 수행되었으며, 도움을 주신 분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

김기현, 오상인, 선우영, 최여진, 전의찬, 사재환, 임지영 (2005) 매립지 배출가스 중 휘발성유기화합물의 계절간 조성차에 대한 연구, 한국대기환경학회지, 21(2), 259-268.  
 김기현, 김민영, 오상인, 윤중섭, 이강웅 (2001) 난지도를 중심으로 한 대기 중 BTEX 성분의 농도분포 특성에 대한 연구, 한국대기환경학회지, 17(6), 463-474.  
 국회환경포럼 (1999) 토양환경문제 워크샵 (토양오염 무엇이

- 문제인가?) (1999. 5. 4).
- 백성욱, 송정환, 김미현, 김수현, 원양수, 공인철, 김승현 (2003) 도시 쓰레기 매립장 지표면에서의 VOC 배출 특성, 대한환경공학회지, 25(10), 1258-1270.
- 장영기, 서정배 (1998) LAEEM에 의한 전국 매립가스 발생량 추정에 대한 연구, 한국대기보전학회지, 14(5), 499-505.
- 환경부(2002) 대기보전 정책수립 지원시스템 구축(CAPSS), 305-307, 150-154.
- 환경부(2003) 2002 전국폐기물 발생 및 처리현황.
- Barbara, Z., C. John, H. Gregory, W. Alan and R. William (1996) Volatile Organic Compounds up C<sub>20</sub> Emitted from Motor Vehicles; Measurement Methods, *Atmospheric Environment*, 30(12), 2269-2286.
- EPA (1998) Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Fifth Edition, Volume I, Chapter 2 : Solid Waste Disposal, 2.4-3, 2.4-5.
- Kim, K.-H. and M.-Y. Kim (2002) The distributions of BTEX compounds in the ambient atmosphere of the Nan-Ji-Do landfill site in Seoul, *Atmospheric Environment*, 36(14), 2433-2446.
- Schweigkofier, M. and N. Reinhard (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.