

# 소규모 매립지에 대한 메탄발생속도상수(k) 산출 및 온실가스 발생량 평가

## Evaluation of Methane Generation Rate Constant(k) by Estimating Greenhouse Gas Emission in Small Scale Landfill

이 원 재<sup>1)</sup> · 강 병 옥<sup>1)</sup> · 조 병 렬<sup>1)</sup> · 이 상 우<sup>2)</sup> · 연 익 준<sup>†</sup>

Wonjae Lee · Byungwook Kang · Byungyeol Cho · Sangwoo Lee · Ikjun Yeon

Received: September 17<sup>th</sup>, 2013; Revised: October 22<sup>nd</sup>, 2013; Accepted: March 13<sup>th</sup>, 2014

**ABSTRACT** : In this study, greenhouse gas emission for small scale landfill (H and Y landfill) was investigated to deduce special the methane generation rate constant(k). To achieve the purpose, the data of physical composition was collected and amount of LFG emission was calculated by using FOD method suggested in 2006 IPCC GL. Also, amount of LFG emission was directly measured in the active landfill sites. By comparing the results, the methane generation rate constant(k), which was used as input variable in FOD method suggested in 2006 IPCC GL, was deduced. From the results on the physical composition, it was shown that the ranges of DOC per year in H (1997~2011) and Y (1994~2011) landfill sites were 13.16 %~23.79 % ( $16.52 \pm 3.84$  %) and 7.24 %~34.67 % ( $14.56 \pm 7.30$  %), respectively. The DOC results showed the differences with the suggested values (= 18 %) in 2006 IPCC GL. The average values of methane generation rate constant(k) from each landfill site were  $0.0413 \text{ yr}^{-1}$  and  $0.0117 \text{ yr}^{-1}$ . The results of methane generation rate constant(k) was shown big difference with 2006 IPCC GL default value ( $k = 0.09$ ). It was confirmed that calculation results of greenhouse gas emission using default value in 2006 IPCC GL show excessive output.

**Keywords** : Landfill Gas, IPCC GL, Methane generation rate constant(k), FOD (First order decay)

**요 지** : 본 연구에서는 현재 사용 중인 2곳(H, Y 매립지)의 소규모 매립지에 대한 매립지 특성 자료수집과 현장측정을 통한 LFG 배출량 산정을 수행하였으며, 이를 이용하여 이들 매립지에 적합한 2006 IPCC FOD 방법 적용 시 입력변수로 사용되는 메탄발생속도상수(k)를 산출하여 보았다. 또한 이 결과를 default 값을 적용한 2006 IPCC GL의 FOD 방법에 의한 메탄 배출량 산정결과와 비교함으로써 특정매립지에 대한 동일한 k값 적용의 타당성을 평가해 보았다. 매립지의 폐기물 조성 data를 이용한 DOC 산정 결과, 매립되어지는 폐기물의 물리적 조성 차이로 인하여 H 매립지(1997~2011)는 13.16 %~23.79 %( $16.52 \pm 3.84$  %)로 나타났으며, Y 매립지(1994~2011)는 7.24 %~34.67 %( $14.56 \pm 7.30$  %)의 값을 보여 IPCC 가이드라인에서 제시한 Bulk waste 타입의 기본값인 18.0 %와 비교할 때 H 매립지보다 Y 매립지가 큰 차이를 보였다. 2006 IPCC GL에 제시된 FOD방법의 메탄 배출량 산정식을 이용한 k값 산정 결과, H 매립지의 산정된 평균 k값은  $0.0413 \text{ yr}^{-1}$ , Y 매립지의 산정된 평균 k값은  $0.0117 \text{ yr}^{-1}$ 로 나타나 IPCC 가이드라인에 제시된 기본값인  $0.09 \text{ yr}^{-1}$ 에 비하여 상대적으로 낮은 값을 보였다. 따라서 2006 IPCC 가이드라인의 default value( $k=0.09$ ) 값에 의한 온실가스 배출량 산정결과와는 현장측정을 통해 산정된 k값에 의한 추정값에 비하여 과대평가될 수 있어 매립지에서 발생하는 정확한 온실가스 배출량 예측을 위해서는 각각의 매립지별 현장측정을 통한 고유의 k값 결정을 통한 산정이 진행되어야 할 것으로 판단된다.

**주요어** : 매립가스, IPCC 가이드라인, 메탄발생속도상수(k), 일차분해반응

## 1. 서 론

매립지의 폐기물은 혐기성 조건 하에서 미생물에 의한 분해에 의해 메탄과 이산화탄소를 발생시키며, 이는 지구온난화를 유발하는 물질로 알려져 있다. 특히 메탄은 이산화탄소에 비해 분자당 온실효과가 약 21배이며, 지구온난화에 대한 기여도가 약 18 %로 메탄 발생량의 상당 부분을 차지하는 폐기물 매립지에 대한 관리가 필요한 것으로 알려져 있

다(IPCC, 1997; Thorneloe, 1996). 따라서 기후 변화와 관련된 전 지구적 위험을 평가하고 국제적 대책을 마련하기 위해 세계기상기구(WMO)와 유엔환경계획(UNEP)이 공동으로 설립한 유엔 산하 국제 협의체인 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 이들 물질을 지구환경차원의 대책이 필요한 온실가스로 규정하고 그 배출량을 감축하려는 국제적인 노력을 기울이고 있다(Chung et al., 2007).

현재 매립가스의 정확한 예측을 위한 다양한 방법들이

1) Department of Environmental Engineering, Korea National University of Transportation

2) Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

† Department of Environmental Engineering, Korea National University of Transportation (Corresponding Author : ijyn@ut.ac.kr)

지속적으로 연구되고 있으며, 개별 매립지의 매립가스 발생량을 추정하기 위해 폐기물의 분해를 일차분해반응으로 가정하는 수학적 모델들인 Scholl Canyon model, Palos Verdes model, Sheldon Arleta model과 IPCC에서 제시한 Revised 1996 IPCC GL, GPG 2000, 2006 IPCC GL 그리고 EPA의 LAEEM(Landfill Air Emissions Estimation Mode) 등이 주로 사용되고 있다(Cossu et al., 1996; Jang & Seo, 1998; IPCC, 2006). 일차분해 모델을 이용한 온실가스 발생량의 추정은 매립된 폐기물의 양 및 조성, 매립시기와 경과시간 등의 기초자료, 폐기물의 메탄최대발생량( $L_0$ )과 메탄발생속도상수( $k$ ) 등이 사용되기 때문에 온실가스의 정확한 예측을 위해서는 이들에 대한 보다 적절한 값이 선정되어야 한다.

이 중 메탄발생속도상수( $k$ )는 매립된 폐기물의 물리적, 화학적 특성, 기상조건에 따라 좌우되므로 매립지에 따라 다를 수 있어 온실가스 발생량 산정 시 오차 발생 요인이 될 수 있다. 현재 선진국들은 매립지 특성을 반영한 메탄발생속도상수( $k$ )를 제시하고 있으나 국내에 바로 적용하는 것은 한계가 있는 것으로 보고되고 있어 각각의 매립지에 대하여 현장의 측정결과로부터 구한 추정인자를 도입한다면 현실에 가까운 예측결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다(Song, 2007; Seo et al., 2001). 현재 우리나라에는 지방자치단체에서 관리하는 매립지는 총 231개소로 매립면적이 100천  $m^2$  미만의 군급매립지가 포함된 중소매립지가 204개소, 그리고 광역매립지를 포함한 100천  $m^2$  이상의 대규모 매립지가 27개소가 존재하고 있다.

이에 본 연구에서는 규모가 비교적 작은 2개의 군급매립지에 대하여 발생하는 메탄가스에 대한 현장측정을 실시하고, 이와 반입폐기물의 조성 정보를 이용하여 FOD(First Order Decay) 방법을 이용한 시행착오법을 통하여 매립가스 추정인자 중 하나인 메탄발생속도상수( $k$ )를 도출하고자 하였다.

또한 이를 기존 2006 IPCC GL에서 제시된 입력변수에 의한 예측 메탄 발생량과 비교·평가하여 보았다.

## 2. 연구 방법

IPCC에서는 개도국의 온실가스배출통계 구축을 위해 1996 IPCC GL, GPG 2000, 2006 IPCC GL을 발간·배포하고, 모든 국가가 자국의 온실가스배출통계 구축을 위해 위의 지침

을 활용할 것을 권유하고 있다. 매립시설에서의 온실가스 발생량을 산정하는 방법은 Default Based Method(Tier 1)와 Theoretical First Order Kinetics Methodologies(FOD, Tier 2)가 있다. Default Based Method는 형식이 다른 모든 매립시설에서의 메탄가스 발생량 측정이 가능하며, Theoretical First Order Kinetics Methodologies의 경우 관련 자료가 충분한 매립지에 적용하여 사용할 수 있는 방법이다. 본 연구에서는 2006 IPCC GL에서 제시한 FOD(First-Order Decay) 모델을 이용하였으며, 발생량 산정을 위한 입력변수는 2006 IPCC GL과 한국환경공단에서 개발한 국가 고유의 입력변수를 적용하여 연구를 수행하였다.

### 2.1 연구대상 매립지의 현황

본 연구에서 선정한 H와 Y 매립지는 우리나라 매립지의 대표적인 형태인 계곡형 준호기성 위생매립지로 H 매립지의 경우 음식물류 폐기물을 포함한 생활폐기물과 불연성 폐기물, 군부대 생활폐기물, 대형 폐기물 등이 매립되어 왔으며, Y 매립지의 경우 음식물류 폐기물을 제외한 생활폐기물과 수해로 인한 잔재물, 연탄재만이 매립되어 왔다. 선정된 매립지의 특징은 Table 1과 같다.

### 2.2 매립지 메탄 배출량 측정

#### 2.2.1 측정지점 선정

본 연구의 2개 대상매립지(H, Y)에 대한 2006 IPCC GL의 메탄 배출량 산정식을 이용하여 시행착오법에 의한 메탄 발생속도상수( $k$ )를 산정하기 위해 매립지 내 위치한 가스배출공과 지표면에서 메탄 발산량을 각각 측정하고 합한 것을 전체배출량으로 산정하였으며, 측정은 각각 2회에 걸쳐 이루어졌다.

먼저 매립지의 지표면 발산량 측정을 위한 측정지점 선정은 U.S. EPA에서 제시하고 있는 매립면적에 따른 표면발산량 측정지점 수에 대한 산정 방법을 이용하였으며, Table 2와 같다. H와 Y 매립장은 모두 20~30 m 간격으로 30개 지점에 대하여 지표면발산량을 측정하였다. 가스배출공의 경우 현장의 여건상 분석기기를 설치하기 힘든 장소에 위치해 있거나 측정이 불가능한 배출공을 제외하고 H 매립지는 1, 2차 측정 시 각각 4개소, 2개소, Y 매립지는 1차 측정 시 4개소, 2차 측정 시 5개소에 대하여 측정을 수행하였다.

Table 1. Construction conditions of landfill site

Landfill	Period of landfill	Amount of landfill ( $m^3$ )	Area of landfill ( $m^2$ )
H	1997~2024	257,000	26,000
Y	1994~2028	650,000	37,500

Table 2. Selection method for number of sampling sites and gap metric

	> 5,000 m <sup>2</sup>	< 5,000 m <sup>2</sup>
Number of sampling site	$6 + 0.15 \sqrt{area}$	$(area/5,000) \times 16$
Gap metric	$\sqrt{area/number\ of\ sampling\ site}$	

## 2.2.2 발생원별 측정 방법

### 1) 지표면발산량

매립지 메탄가스의 지표면발산량을 조사하기 위하여 Static Flux Method(Closed Chamber)를 사용하였다. 지표면발산량 측정을 위하여 챔버는 측정 지점의 표면을 약 3~5 cm 정도 판 후 챔버를 설치하고 하부는 공기가 들어오지 않도록 흙으로 잘 막아 고정하였다. 챔버 상부가 투명 아크릴로 되어 있으므로 직사광선을 차단할 수 있는 그늘막을 설치하고 질소가스(영점교정)와 표준시료(메탄, 이산화탄소 각각 1,000 ppm, 20%)를 이용하여 교정을 실시하였으며, 챔버 내부의 가스는 5 L/min으로 흡입하여 전처리장치를 통과한 후 분석 장비로 유입되도록 하였다. 분석 장비는 비분산적외선(Non-Dispersive Infrared, NDIR)방식의 연속측정기 UTRAMAT 6(France)을 사용하여 시간의 흐름에 따른 농도의 변화를 관찰하였다. 메탄가스의 플럭스를 산정하기 위해 30분 이상의 데이터를 수집한 후 농도 변화의 기울기가 가장 큰 값 중 농도 변화 곡선의 상관계수(R<sup>2</sup>)가 0.9 이상인 값을 채택하였다.

### 2) 가스배제공

가스배제공과 같은 점배출원에서는 가스가 좁은 관을 통하여 배출되므로 관의 단면적과 가스의 유속을 측정하면 배출되는 가스의 유량을 산정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 무지향성 열선유속계인 Air-Velocity Transducer(USA)를 이용하여 유속을 측정하였고 가스의 농도는 UTRAMAT 6을 이용하여 30분 이상 실시간 연속 측정을 실시하였다. 대상 매립지의 가스배제공 대부분은 이중 구조로 되어 있고 외부는 다공관 구조로 이루어져 있었으므로 비닐 등을 이용하여 지표면에서 2 m 이상의 높이까지 덮어 외부 공기의 유입을 막은 후 지표면으로부터 약 50 cm 이하의 지점에서 가스 유속 및 농도를 측정하였다.

## 2.3 메탄 배출량 산정

### 2.3.1 FOD 방법에 의한 메탄 배출량 산정 방법

소규모 매립지에 대한 메탄발생속도상수(k)를 도출하고 이를 기존 2006 IPCC GL에서 제시된 입력변수에 의한 예측 메탄 발생량과 비교·평가하기 위하여 2006 IPCC GL의

FOD(일차분해반응) 방법을 이용하여 메탄 배출량 산정은 아래의 Eq. (1)을 이용하였다.

$$CH_4 \text{ 배출량} = \left[ \sum_X CH_4 \text{ 발생량}_{X,T} - R_T \right] \cdot (1 - OX_T) \quad (1)$$

여기서 메탄 배출량은 T년도에 배출된 메탄, T는 인벤토리 연도, X는 폐기물 카테고리나 성상/물질, R<sub>T</sub>(Recovered CH<sub>4</sub> in landfill gas)는 T년도에 회수된 메탄, OX<sub>T</sub>(Oxidation factor)는 T년도의 산화율(분율)을 의미한다.

FOD에서 가장 중요한 입력 변수는 고형폐기물매립지(SWDS; Solid Waste Disposal Site)에 매립된 폐기물에 있는 혐기적으로 분해 가능한 유기 탄소량(DDOC<sub>m</sub>)으로서 Eq. (2)에 의해 산정될 수 있으며, 매년 발생된 DDOC<sub>m</sub>의 양으로부터 SWDS에 축적된 DDOC<sub>m</sub>(DDOC<sub>ma</sub>)의 양을 계산할 수 있고, T년도까지 SWDS에 축적된 DDOC<sub>m</sub>의 양은 Eq. (3)에 의해 계산될 수 있다. 또한 T년도에 SWDS에서 혐기적으로 분해된 DDOC<sub>m</sub>의 양은 Eq. (4)를 이용하여 산정될 수 있다.

$$DDOC_m = W \times DOC \times DOC_f \times MCF \quad (2)$$

여기서 DDOC<sub>m</sub>은 혐기적으로 분해 가능한 매립된 DOC 총량(Gg), W는 매립된 폐기물의 총량(Gg), DOC는 매립된 해의 분해 가능한 유기탄소(Gg-C/Gg-폐기물), DOC<sub>f</sub>는 분해 가능한 DOC의 비율(비율), MCF(Methane Conversion Factor)는 매립년도의 호기성 분해에 대한 메탄 보정계수를 의미한다.

$$DDOC_{maT} = DDOC_{mdT} + (DDOC_{maT-1} \times e^{-k}) \quad (3)$$

$$DDOC_{m,decompT} = DDOC_{maT-1} \times (1 - e^{-k}) \quad (4)$$

여기서 DDOC<sub>maT</sub> = T년도까지 SWDS에 축적된 DDOC<sub>m</sub>, DDOC<sub>maT-1</sub>는 (T-1)년도까지 SWDS에 축적된 DDOC<sub>m</sub>, DDOC<sub>mdT</sub>는 T년도에 SWDS로 매립된 DDOC<sub>m</sub>, DDOC<sub>m,decompT</sub>는 T년도에 SWDS에서 혐기적으로 분해된 DDOC<sub>m</sub>, k는 반응상수( $k = \ln(2) / t_{1/2}(y^{-1})$ ,  $t_{1/2} = \text{반감기}(y)$ )이다.

Eq. (3)과 Eq. (4)를 이용하여 혐기적으로 분해 가능한 물질로부터 발생하는 메탄의 양은 Eq. (5)에 의해 산정될 수 있다.

$$CH_4 \text{ generated}_T = DDOC_{m,decompT} \times F \times 16/12 \quad (5)$$

여기서 DDOC<sub>m,decompT</sub>는 T년도에 분해된 DDOC<sub>m</sub>, F(Fraction by volume of CH<sub>4</sub> in landfill gas)는 발생된 매립지 가스 내

메탄의 부피비(비율), 16/12는 CH<sub>4</sub>/C의 분자량비(비율)이다.

SWDS로부터 CH<sub>4</sub> 배출량 산정은 FOD 방법을 이용하였으며, 위에서 살펴본 바와 같이 DOC, DOC<sub>f</sub>, MCF, F, R, OX, t<sub>1/2</sub>, k, 지연시간과 같은 배출계수와 변수값은 현재 국가 고유의 배출계수 값이 존재하는 경우 국가 고유값을 사용하였고, 존재하지 않는 경우에는 IPCC 기본값을 적용함을 원칙으로 하였다.

### 2.3.2 메탄 발생량 산정을 위한 입력변수

연구대상 매립지의 메탄 배출량은 2006 IPCC GL에서 발생량 산정방법인 FOD 방법을 이용하여 산정하였다. FOD 방법을 적용하기 위한 배출계수는 일부 우리나라 고유값을 이용하였고, 나머지는 기본값을 적용하였다. 연구대상 매립지에서 배출되는 메탄 배출량을 산정하기 위해 적용된 변수값은 Table 3에 나타내었다. 이때 이용된 국가 고유값 자료는 한국환경공단에서 연구한 ‘매립지 온실가스 현장측정을 통한 입력변수 개발’ 자료를 이용하였다(한국환경공단, 2010).

## 3. 연구결과 및 고찰

### 3.1 연구 대상 매립지의 폐기물 자료를 이용한 DOC 산정

2006 IPCC GL을 이용해 메탄 배출량을 산정하기 위한

Table 3. Values of DOC, DOC<sub>f</sub>, MCF, F, R and OX

DOC	Vegetable and food	0.12
	Papers	0.33
	Woods	0.37
	Rubber and leather	0.46
	Plastics	0.0
	Etc.	0.23
DOC <sub>f</sub>		0.5
MCF		1.0
F		0.5
R		0
OX		0.1

Table 4. Annual DOC values at H and Y landfill

Year	H landfill	Y landfill	Year	H landfill	Y landfill	Year	H landfill	Y landfill
1994	-	7.24	2000	14.69	11.38	2006	12.10	10.62
1995	-	12.15	2001	15.34	9.68	2007	23.79	34.67
1996	-	11.96	2002	13.34	14.01	2008	13.86	17.18
1997	18.70	26.74	2003	14.96	7.85	2009	17.86	11.26
1998	15.55	25.63	2004	14.54	9.10	2010	22.89	14.88
1999	13.16	12.38	2005	14.07	10.42	2011	22.89	14.88

중요 인자 중 하나는 DOC(Degradable Organic Carbon)로 매립장에 매립된 폐기물의 조성으로부터 산정된다. 연구대상인 H와 Y 매립지의 매립기간 동안 처리된 폐기물의 양을 지자체 자료를 수집·분석한 결과 큰 차이를 보여 본 연구에서는 국가통계인 ‘전국 폐기물발생 및 처리현황(1994~2010)’의 연도별 자료의 매립 폐기물의 양과 생활폐기물이 반입되어지는 지역에 대한 물리적 조성 비율을 산정하여 메탄 배출량 계산에 이용하였다. DOC(분해가능한 탄소)는 생화학적 분해가 가능한 폐기물 내 유기 탄소를 뜻하며, 전체 폐기물 내 DOC양은 폐기물 조성에 근거하여 산정된다. 본 연구에서는 Eq. (6)에 제시된 바와 같이 2개 매립지의 연도별 DOC 값을 계산하였다.

$$DOC = \sum_i (DOC_i \cdot W_i) \quad (6)$$

여기서 DOC는 전체 폐기물 내 분해 가능한 유기탄소의 비율, Gg탄소/Gg폐기물, DOC<sub>i</sub>는 폐기물 성상 i에 대한 분해 가능한 유기 탄소의 비율, 그리고 W<sub>i</sub>는 폐기물 카테고리 에 의한 폐기물 성상 i의 비율을 뜻한다.

Table 4의 H와 Y 매립지에 대한 연도별 DOC를 보면, H 매립지의 경우 매립개시 연도인 1997년에 18.7 %에서 점차 감소하다가 2007년 23.7 %로 증가하였고 현재 22.9 % 수준으로 연도별 DOC는 16.5 ± 3.8 % 범위를 보였으며, Y 매립지의 경우 매립개시 연도인 1994년에 7.2 %에서 점차 감소하다가 2003년 7.9 %로 비슷한 경향을 보였고 현재 14.9 % 수준으로 14.6 ± 7.3 % 범위를 보였다. 2006 IPCC GL에서 제시한 bulk waste 타입의 DOC 기본값이 18.0 %로 H 매립지의 경우 DOC 값이 유사한 범위에 있는 것으로 나타났으나, Y 매립지는 음식물류 폐기물을 제외한 생활폐기물과 수해로 인한 잔재물, 연탄재의 매립으로 인하여 bulk waste 타입의 DOC 값과 다소 큰 차이를 보이는 것으로 판단된다.

### 3.2 현장측정을 통한 메탄 배출량

연구대상 매립지인 H와 Y 매립지에 대한 메탄 배출량은

배제공과 지표면발산량 측정치를 이용하여 산정하였다. 먼저 배제공의 메탄 배출량은 배출구의 높이가 높아 접근이 어려운 곳을 배제하고 측정이 가능한 곳에서 이루어졌으며, 측정이 불가능한 곳의 경우에는 측정된 값의 평균값을 적용하여 배제공의 메탄 배출량을 산정에 이용하였다(Table 5).

H 매립지의 가스배제공에 대한 메탄 측정은 매립지에 존재하는 7개소의 가스배제공 중 1차 측정에서는 4개소, 2차 측정에서는 2개소가 측정되었고, 그 외 가스배제공은 현장사정으로 인해 측정을 수행하지 못하였다. 가스배제공 7개소에 대한 메탄의 배출량은 1차 측정결과 25.76 ton/yr, 2차 측정 결과 1차 측정결과의 2.4배 증가한 61.61 ton/yr의 메탄이 배출되는 것으로 나타났다. Y 매립지의 가스배제공은 12개소가 존재하였으며, 1차 측정에서는 4개소, 2차 측정에서는 5개소가 측정되었고 그 외 가스배제공은 현장사정으로 인해 측정이 이루어지지 못했다. 가스배제공 배출량은 1차 측정결과 174.61 ton/yr의 메탄이 배출되었고 2차 측정 결과는 1차 측정결과의 55.6 % 감소한 77.54 ton/yr의 메탄이 배출되었다.

H와 Y 매립지에 대한 지표면발산량 측정은 30개 지점에서 수행되었으며, 측정된 결과값의 평균값에 매립지면적을 곱하여 매립지 전체의 지표면발산량을 산정하였으며, 그 결과를 Table 6에 나타내었다.

H 매립지의 30개 지점의 지표면발산량 1차 측정결과 203.99 ton/yr, 2차 측정 결과 1차 측정결과의 64.3 % 감소한 72.77 ton/yr의 메탄이 배출되었으며, Y 매립지의 표면발산량 1차 측정결과 33.70 ton/yr, 그리고 2차 측정 결과는 1차 측정결과와 유사한 36.90 ton/yr의 메탄이 배출되었다. 매립지에 대한 지표면발산량 측정결과, H와 Y 매립지 모두 동일 위치에

Table 5. Amount of CH<sub>4</sub> emission from gas venting well (unit: ton/yr)

Sampling site	H landfill		Y landfill	
	1st	2nd	1st	2nd
1	4.76	4.38	0.00	5.36
2	3.68	13.23	25.55	0.50
3	3.68	8.80	23.07	14.06
4	9.84	8.80	9.58	0.06
5	0.04	8.80	14.55	6.46
6	0.09	8.80	14.55	6.46
7	3.68	8.80	14.55	6.46
8			14.55	12.33
9			14.55	6.46
10			14.55	6.46
11			14.55	6.46
12			14.55	6.46
Sum of CH <sub>4</sub> emission	25.76	61.61	174.61	77.54

대한 측정 시 많은 지점이 메탄 배출량 결과에 대해 큰 차이를 보였는데, 이는 Chung et al.(2007)의 연구에 따르면 매립지의 지표면발산량은 일반적으로 온도와 큰 상관성을 보여 아침과 저녁 시간대에 비하여 기온이 높은 정오에 높은 메탄 배출량을 보이며, 계절적으로는 기온이 낮은 겨울, 봄, 가을에 비하여 상대적으로 기온이 높은 여름에 배출량이 높은 경향을 보이는 등 기온에 의한 영향뿐만 아니라 매립지 위치의 강우 빈도와 그리고 매립 진행에 따른 매립지의 특이성 등에 의한 영향인 것으로 보고되고 있다.

### 3.3 연구대상 매립지의 메탄발생속도상수(k) 산정

매립지의 메탄발생속도상수(k) 산정은 H, Y 매립지의 가

Table 6. Amount of CH<sub>4</sub> emission from surface of landfill (unit: ton/yr)

Site	H landfill		H landfill	
	1st	2nd	1st	2nd
1	1.96	n.d	n.d	n.d
2	2.50	n.d	n.d	n.d
3	1,004.76	n.d	n.d	n.d
4	n.d	18.54	n.d	n.d
5	772.10	n.d	n.d	n.d
6	56.96	n.d	n.d	n.d
7	31.71	90.60	n.d	n.d
8	6.34	n.d	17.88	4.42
9	29.27	n.d	0.00	n.d
10	103.74	n.d	73.16	273.78
11	n.d	72.91	n.d	10.28
12	413.52	n.d	n.d	110.98
13	n.d	n.d	181.70	600.44
14	n.d	143.63	n.d	n.d
15	616.91	n.d	n.d	n.d
16	378.21	23.16	78.21	n.d
17	108.85	n.d	50.12	58.53
18	265.78	272.40	n.d	n.d
19	145.39	n.d	n.d	n.d
20	372.88	37.39	404.22	29.33
21	356.02	407.90	64.66	n.d
22	135.03	n.d	59.89	n.d
23	538.58	n.d	32.22	5.58
24	151.23	1,058.44	n.d	n.d
25	47.39	13.16	n.d	n.d
26	435.19	n.d	19.04	n.d
27	121.28	n.d	n.d	n.d
28	n.d	45.02	n.d	7.72
29	13.70	n.d	n.d	n.d
30	10.33	n.d	n.d	5.99
Average of CH <sub>4</sub> emission	203.99	72.77	32.70	36.90

스배제공과 지표면발산량에 대한 메탄 배출량 현장측정값과 폐기물 매립정보를 이용해 산출된 DOC를 IPCC FOD model에 입력하여 시행착오법(trial and error)으로 산출하였으며, 그 결과를 Table 7에 나타내었다. 대상매립지의 MCF는 현장 조사 결과 혐기성 상태로 운영되는 것으로 파악되어 모두 1로 적용하였으며  $DOC_f$ , F, OX는 2006 IPCC GL의 기본값을 적용하였다(IPCC, 2006).

매립지의 가스배제공과 표면발산량에 대한 측정 결과, H 매립지의 1, 2차 총 발산량인 229.75 ton/yr과 134.38 ton/yr을 IPCC FOD model에 입력하여 시행착오법에 의해 산출된 k값은 각각  $0.0569 \text{ yr}^{-1}$ 과  $0.0282 \text{ yr}^{-1}$ 이었으며 1, 2차 현장측정의 총 배출량의 평균값인 182.07 ton/yr을 이용하여 산정된 평균 k값은  $0.0413 \text{ yr}^{-1}$ 이었다. 또한 Y 매립지의 경우에는 1, 2차 측정값인 207.31 ton/yr과 114.44 ton/yr에 의해 산정된 1, 2차의 k값은  $0.0157 \text{ yr}^{-1}$ 과  $0.0080 \text{ yr}^{-1}$ 로 산정되었으며 1, 2차 현장측정의 총 배출량의 평균값인 160.88 ton/yr을 이용하여 산정된 Y 매립지의 평균 k값은  $0.0117 \text{ yr}^{-1}$ 이었다. 산정된 메탄발생속도상수(k)는 Nah(2011)에 의해 현장측정에 의해 연구된 값이  $0.134 \text{ yr}^{-1}$ 이나 Yoo et al.(2008)의 연구에서 보여준  $0.071 \text{ yr}^{-1}$ 과  $0.085 \text{ yr}^{-1}$  그리고 IPCC GL의 기본값인  $0.09 \text{ yr}^{-1}$ 에 비하여 상대적으로 낮은 값을 보여 소규모 매립지에서 발생하는 기본값에 의한 온실가스 산정은 온실가스 발생량이 과대평가될 수 있는 것으로 나타났다.

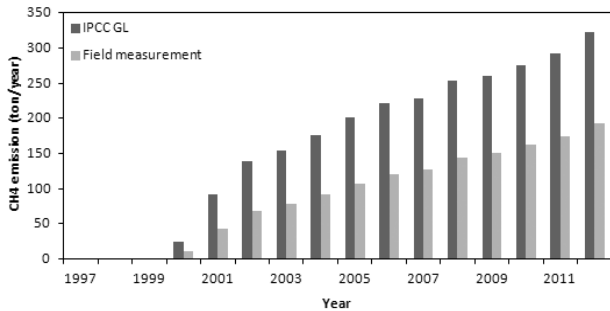


Fig. 1. Variation on the prediction of methane gas generation rate by default and field measurement in H landfill

### 3.4 메탄 발생량 예측 결과 비교

현장측정을 통해 산정된 메탄발생속도상수( $k_{Hlandfill}=0.413$ ,  $k_{Ylandfill}=0.0117$ )와 IPCC GL에서 제시된 기본값( $k=0.09 \text{ yr}^{-1}$ )을 적용하여 연구대상 매립지에 대하여 연도별 온실가스 발생량을 산정하였다.

H 매립지의 경우 Fig. 1에 보여진 바와 같이 현장측정에 의해 산출된 메탄발생속도상수(k)를 이용한 메탄가스 배출량 예측에서는 1997년 매립이 시작된 후 2000년 11.24 ton/yr의 메탄가스 배출되었으며, 이 후 지속적인 폐기물의 반입과 매립지 내의 반응 진행에 따라 메탄가스 발생량은 크게 증가하여 2012년에는 193.78 ton/yr의 메탄가스가 배출된 것으로 산정되었으며, 매립 시작년도 이후 2012년까지 배출되는 메탄가스의 총량은 1,470.35 ton으로 산정되었다. 그러나 IPCC GL에 의해 산출된 경우 2000년 23.92 ton/yr, 2012년에는 322.55 ton/yr으로 현장측정에 의한 산정값에 비하여 각각 212.7 %와 166.5 % 높은 배출량을 보였으며, 매립 시작인 1997년부터 2012년까지 총 메탄가스 배출량은 현장측정에 의한 산정의 경우 193.78 ton, IPCC의 경우는 2641.1 ton으로 166.5 %나 과다산정된 것으로 나타났다.

또한 Y 매립지의 경우에도 Fig. 2에 보여진 바와 같이 현장측정에 의한 메탄발생속도상수(k)를 이용한 배출량과 IPCC GL의 예측에서 발생초기인 1995년에는 6.71 ton/yr로 예측되었으나 IPCC에 의한 산정값은 49.68 ton/yr로 740 %,

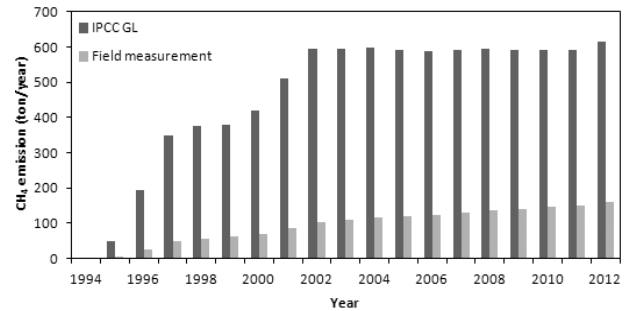


Fig. 2. Variation on the prediction of methane gas generation rate by default and field measurement in Y landfill

Table 7. Methane generation rate constant(k) for H and Y landfill

(unit: ton/yr)

H landfill		1st		2nd		Average	
		Field survey	IPCC FOD	Field survey	IPCC FOD	Field survey	IPCC FOD
	CH <sub>4</sub> emission (ton/yr)	229.75	229.66	134.38	134.49	182.07	182.23
	k (yr <sup>-1</sup> )	0.0569		0.0282		0.0413	
Y landfill		1st		2nd		2nd	
		Field survey	IPCC FOD	Field survey	IPCC FOD	Field survey	IPCC FOD
	CH <sub>4</sub> emission (ton/yr)	207.31	207.67	114.44	114.55	160.88	161.23
	k (yr <sup>-1</sup> )	0.0157		0.0080		0.0117	

2012년에는 159.60 ton/yr이었으나 IPCC GL의 경우 614.69 ton/yr로 385.1 %나 많은 메탄가스가 발생되는 것으로 예측되었다. 또한 매립 후 발생된 메탄가스의 총량의 비교 시 현장측정에 의한 경우 1994년부터 2012년까지 총 1,791.4 ton으로 예측되었으나 IPCC GL의 경우 8,825.6 ton으로 492.7 %나 과다하게 메탄가스 발생량이 예측된 것으로 나타났다. 따라서 우리나라 고유의 메탄발생속도상수(k) 확보를 위하여 혼합폐기물에 대한 반감기 실험과 검증을 위한 매립지 현장측정 및 온실가스 시료분석 등이 추가적으로 필요할 것이라 판단된다.

#### 4. 결 론

현재 매립이 진행 중인 소규모 매립지에 대한 현장측정을 통한 메탄발생속도상수(k)의 도출을 통한 온실가스 배출량 산정결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 연구대상인 H와 Y매립지에 대한 온실가스 발생량 산정을 위한 기초자료인 DOC의 산정 결과, H 매립지(1997~2011)는 13.16 %~23.79 %(16.52 ± 3.84 %), Y 매립지(1994~2011)는 7.24 %~34.67 %(14.56 ± 7.30 %)의 값을 보였으며, Y 매립지의 경우 IPCC 가이드라인에서 제시한 Bulk waste 타입의 기본값인 18.0 %와 다소 큰 차이를 보여 폐기물의 조성에 있어 일반적 매립지의 조성과는 다른 특성을 보이는 것으로 판단된다.
- (2) 현장에서 진행된 가스배출공과 표면발산량 측정값을 이용하여 시행착오법에 의해 산정된 k값은 H 매립지의 경우 평균 k값은 0.0413 yr<sup>-1</sup>, Y 매립지의 평균 k값은 0.0117 yr<sup>-1</sup>로 나타나 IPCC 가이드라인에 제시된 기본값인 0.09 yr<sup>-1</sup>에 비하여 상대적으로 낮은 값을 보였다.
- (3) 현장측정을 통해 산정된 메탄발생속도상수(k<sub>landfill</sub>=0.413 yr<sup>-1</sup>, k<sub>Ylandfill</sub>=0.0117 yr<sup>-1</sup>)와 IPCC GL에서 제시된 기본값(k=0.09 yr<sup>-1</sup>)을 적용하여 연구대상 매립지에 대한 온실가스 발생량을 계산한 결과, H와 Y 매립지에 대하여 현장측정에 의한 경우 매립 시작년도부터 2012년까지의 메탄가스 총 배출량은 각각 1,470.35 ton과 1,791.43 ton이었으며, IPCC GL에서 제시된 기본값을 사용한 경우 각각 2,641.13 ton과 8,825.59 ton으로 과다하게 메탄가스 배출량이 예측되는 것으로 나타났다.

이상의 결과로 부터 우리나라에 존재하는 소규모 매립지에 대하여 보다 정확한 온실가스 산정이 진행되기 위해서는

우리나라 고유의 메탄발생속도상수(k) 확보를 위하여 소규모 매립지의 혼합폐기물에 대한 반감기 실험과 검증을 위한 매립지 현장측정 및 온실가스 시료분석 등이 추가적으로 필요할 것이라 판단되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2012년도 한국환경공단 “군급매립지 온실가스 현장측정 및 특성조사”의 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

#### References

1. 한국환경공단 (2010), 매립지 온실가스 현장측정을 통한 입력 변수 개발, 77 p.
2. Chung, J. D., Kim, J. W., Kim, J. T. and Han, J. M. (2007), A study on the measurement and prediction of green house gas generated from middle and small scale landfill, Journal of Korean Solid Wastes Engineering Society, Vol. 24, No. 6, pp. 569~579 (in Korean).
3. Cossu, R., Andreottola, G. and Muntoni, A. (1996), Modelling landfill gas production - landfilling of waste : Biogas, Edited by Christensen, T. H. et. al., E&FN SPON, pp. 237~268.
4. IPCC (1997), Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Vol. 5, pp. 3.1~3.31.
5. IPCC (2006), 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Vol. 5, pp. 3.1~3.31.
6. Jang, Y. K. and Seo, J. B. (1998), A study on the estimation of landfill gas emission by LAEEM in Korea, Journal of Korea Air Pollution Research Association, Vol. 14, No. 5, pp. 499~505 (in Korea).
7. Nah, J. H. (2011), Uncertainty assesment of reaction constant(k) estimated by field methane emission measurement method in a landfill site for IPCC FOD model, Master's thesis, Seoul University, pp. 39~41 (in Korean).
8. Seo, D. C., Lee, D. H., Han, H. S., Yoo, M. S., Suh, C. I., Kim, N. J., Lee, N. H. and Kim, S. D. (2001), Estimating of methane generation rate constant(k) by measurement of LFG generation rate in a landfill field, Journal of Korean Solid Wastes Engineering Society, Vol. 18, No. 7, pp. 580~589 (in Korean).
9. Song, J. S. (2007), Clean development mechanism : CDM of landfill status and risk factors, Journal of Korea Landfill Association, Vol. 1(first issue), No. 1, pp. 40~51 (in Korean).
10. Thorneloe, S. A. (1996), Influence of landfill gas on global climate -landfilling of waste : Biogas, Edited by Christensen, T. H. et. al., E&FN SPON, pp. 187~197.
11. Yoo, B. O., Jin, B. B., Yun, Y. W. Kwon, Y. S., Oh, T. S. and Ko, J. Y. (2008), Measurement of methane generation and K value development through the field study in the landfill, Korean Society for Atmospheric Environment Conference, Korean Society for Atmospheric Environment, pp. 268~270 (in Korean).