

폐기물매립지에서의 온실가스 발생량 예측 모델 및 변수 산정방법 개발

Developments of Greenhouse Gas Generation Models and Estimation Method of Their Parameters for Solid Waste Landfills

박진규* · 강정희** · 반종기*** · 이남훈****

Park, Jin-Kyu · Kang, Jeong-Hee · Ban, Jong-ki · Lee, Nam-Hoon

Abstract

The objective of this research is to develop greenhouse gas generation models and estimation method of their parameters for solid waste landfills. Two models obtained by differentiating the Modified Gompertz and Logistic models were employed to evaluate two parameters of a first-order decay model, methane generation potential (L_0) and methane generation rate constant (k). The parameters were determined by the statistical comparison of predicted gas generation rate data using the two models and actual landfill gas collection data. The values of r-square obtained from regression analysis between two data showed that one model by differentiating the Modified Gompertz was 0.92 and the other model by differentiating the Logistic was 0.94. From this result, the estimation methods showed that L_0 and k values can be determined by regression analysis if landfill gas collection data are available. Also, new models based on two models obtained by differentiating the Modified Gompertz and Logistic models were developed to predict greenhouse gas generation from solid waste landfills that actual landfill generation data could not be available. They showed better prediction than LandGEM model. Frequency distribution of the ratio of Q_{cs} (LFG collection system) to Q (prediction value) was used to evaluate the accuracy of the models. The new models showed higher accuracy than LandGEM model. Thus, it is concluded that the models developed in this research are suitable for the prediction of greenhouse gas generation from solid waste landfills.

Keywords : Solid waste landfill, Greenhouse gas generation model, Methane generation potential, Methane generation rate constant

요 지

본 연구의 목적은 폐기물매립지에서의 온실가스 발생량 예측모델 및 모델에 적용된 변수들의 산정방법을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 온실가스 발생예측 모델 중 1차 반응모델의 변수인 메탄잠재발생량과 메탄발생속도상수를 평가하기 위하여 수정 Gompertz 식과 Logistic 식을 미분한 2개의 식을 적용하였다. 변수들은 실제 폐기물매립지에서의 매립가스 발생량에 대한 실측값과 예측값과의 통계학적 비교를 통해 산정하였다. 매립가스 발생량에 대한 실측값과 수정 Gompertz 식 및 Logistic 식을 미분하여 나타낸 2개의 식을 이용한 매립가스 발생량 예측값에 대한 회귀분석결과 결정계수는 각각 0.92와 0.94로 나타나, 폐기물매립지에서의 매립가스 발생량에 대한 측정값이 있을 경우 회귀분석을 통해 변수를 산정할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 실측값이 없는 폐기물매립지에서의 온실가스 발생량을 예측할 수 있도록 하기 위하여 수정 Gompertz 식과 Logistic 식을 미분한 2개의 식을 기초로 하여 예측모델을 개발하였으며, 이 모델들의 정확성을 평가하기 위하여 Q_{cs} (실측값): Q (예측값)의 비에 대한 빈도분포를 평가한 결과 LandGEM 모델보다 높은 정확성을 나타내었다. 따라서 본 연구에서 개발한 모델들은 폐기물매립지에서의 온실가스 발생량 예측에 적합한 것으로 사료된다.

핵심용어 : 폐기물매립지, 온실가스 발생량 예측모델, 메탄잠재발생량, 메탄발생속도상수

1. 서 론

폐기물매립지에서 발생하는 온실가스로 인한 주변 환경오염 저감과 및 온실가스 관리 등을 위해서는 먼저 정확한 온

실가스 배출량에 산정이 필요하다(배원재 등, 2009). 그러나 폐기물매립지에 매립되는 폐기물의 불균질성과 매립된 폐기물의 분해에 관여하는 인자가 많기 때문에 장기간에 걸쳐 물리화학적 및 생물학적 반응을 통해 발생하는 온실가스의

*정회원 · (주)에코윌플러스 대표이사 (E-mail : pcdd@paran.com)

**안양대학교 환경공학과 박사과정 (E-mail : jhmil2@naver.com)

***안양대학교 환경공학과 박사과정 (E-mail : meyu2004@hanmail.net))

****정회원 · 교신저자 · 안양대학교 환경공학과 교수 (E-mail : nhlee@anyang.ac.kr)

배출량을 정확히 측정한다는 것은 매우 어렵다.

지금까지 폐기물매립지에서의 온실가스 발생량 예측을 위하여 다양한 방법들이 제안되었는데, 주로 폐기물의 화학적 조성을 이용하는 양론적 방법과 폐기물의 분해를 1차 반응으로 가정한 1차 반응모델이 사용되고 있다. 그러나 폐기물의 화학적 조성을 이용한 양론적 방법의 경우 매립지 현장 조건 등을 고려하지 않아 실제적인 매립가스 발생량 평가에는 부적합하다는 평가를 받고 있다. 반면 1차 반응모델의 경우 Scholl Canyon 모델, Palos Verdes 모델, Sheldon Arleta 모델, IPCC(Intergovernmental panel on climate change)에서 제안한 FOD(First order decay) 모델 및 EPA(Environmental protection agency)에서 개발한 LandGEM(Landfill gas emissions estimation model) 등이 잘 알려져 있는 모델이다(Cossu 등, 1996; IPCC, 2006; Alexander 등, 2005). 이들 모델 중 매립가스 CDM(Clean development mechanism) 사업에 가장 많이 사용되고 있는 모델은 IPCC에서 제시한 FOD 모델과 EPA의 LandGEM 모델인데 매립폐기물의 성상별 물리화학적 특성자료가 존재할 경우 IPCC의 FOD 모델을 사용할 수 있으나, 매립폐기물의 성상별 매립량 및 물리화학적 특성자료가 존재하지 않을 경우에는 매립량만으로도 온실가스 발생량을 산정할 수 있는 LandGEM 모델을 사용하고 있다(이남훈 등, 2009).

1차 반응모델에 적용되는 변수 중 매립폐기물의 메탄잠재 발생량 및 메탄발생속도상수는 온실가스 배출량 예측모델의 정확성에 결정적 영향을 미치는 중요한 변수이다. 천승규(2010)는 1차 반응모델에서 메탄잠재발생량이 총 메탄발생량에 미치는 영향이 가장 크며, 매립시간 경과에 따라 메탄발생속도상수의 불확실성이 커지는 것으로 보고한 바 있다.

메탄발생속도상수와 메탄잠재발생량은 폐기물의 원소조성을 기초로 화학양론식을 이용한 이론적 산정방법과 회분식 혐기성 실험 및 현장 실측 데이터를 이용하여 산정하게 된다(Amini 등, 2012; Garg 등, 2006; Machado 등, 2009). 그러나 화학양론식과 회분식 실험데이터의 경우 메탄발생속도상수의 평가는 어려우며, 메탄잠재발생량은 최적 조건에서의 실험이 이루어져 현장 조건과의 분해율 차이로 인하여 과대평가될 우려가 있는 것으로 알려져 있다(천승규 등, 2011; 조한상 등, 2007). 한편 현장 실측 데이터를 이용하는 경우 메탄발생속도상수는 회분식 실험을 통해 도출된 메탄잠재발생량을 고정시킨 후 1차 반응모델을 대상으로 시행착오법을 이용하여 산정하나 불확실성이 커지는 문제점이 있다(김현욱 등, 2008; 전은정, 2007). Scharff and Jacobs(2006)는 현재 개발되어 있는 1차 반응모델들의 예측값과 실측값의 차이가 매우 커 측정방법과 1차 반응모델 변수값들의 정확성에 대하여 문제점을 제기한 바 있다.

현장 실측값이 있음에도 불구하고 실내실험에서 많이 사용되는 1차 반응모델 및 수정 Gompertz 모델을 이용한 비선형회귀분석을 통해 메탄발생속도상수 및 메탄잠재발생량을 산정하기 어려운 것은 반응모델의 특징에 기인한다. 1차 반응모델은 시간에 따른 기질의 분해속도와 메탄발생물이 상관성이 있다는 가정을 전제로 메탄발생물의 곡선커브가 지수함수 형태로 감소하게 되기 때문에 분해시작 시점에 가장 높은 메탄발생률을 나타내게 된다(Cossu 등, 1996). 즉, 매

립이 이루어진 첫해에 가장 높은 메탄발생률을 나타내고 매립연령이 진행됨에 따라 메탄발생률은 점차 감소하게 되어진다. 그러나 실제 매립된 폐기물의 분해는 지체기를 제외하더라도 최대메탄발생률에 도달하기 까지 상당한 시간이 경과하여야 하며, 최대메탄발생률에 도달한 후 점차 감소하는 경향을 나타낸다(김혜진 등, 2008). S형태(Sigmoidal)의 수정 Gompertz 모델의 경우에는 메탄발생률이 정체에 도달하는 S형태를 나타낸 누적메탄수율에 대해서만 비선형회귀분석이 가능하며, 메탄발생률에 대해서는 비선형회귀분석이 어려운 문제점이 있다(Lay 등, 1998). 따라서 메탄발생량에 대한 현장 실측값이 있어도 폐기물의 매립이 이루어지고 있는 시기에는 메탄발생률이 계속 증가하고 있어 1차 반응모델의 적용이 어려우며, 수정 Gompertz 모델의 경우 메탄발생률이 정체를 나타낼 때까지 상당히 오랜 시간의 누적 메탄발생량 데이터가 있어야 하기 때문에 비선형 회귀분석을 시행할 수가 없다. 이러한 문제점으로 인하여 기존 연구에서는 시행착오법을 통한 변수값을 산정하거나, 기존 연구결과 및 모델의 기본값을 적용하고 있으나 대상 매립지의 특성을 반영하지 못해 예측된 메탄발생량에 대한 불확실성이 높아지게 된다(김현욱 등, 2008; 송상훈 등, 2011).

따라서 본 연구에서는 폐기물매립지의 메탄발생량을 측정할 실측값에 메탄발생률을 나타내는 수학적 모델을 기초로 비선형 회귀분석방법을 적용하여 메탄발생량 예측의 현장 검증 및 메탄잠재발생량 및 메탄발생속도상수의 산정 방법론을 제시하고자 한다. 그리고 산정 방법론을 이용하여 산정된 변수값들은 1차 반응모델 중 대표적인 LandGEM 모델에 이용하여 방법론의 적용가능성을 평가하고자 하였다. 또한, 비선형 회귀분석에 사용한 수학적 모델을 기초로 한 메탄발생량 모델을 제안하여 실측값이 존재할 경우의 회귀분석을 통한 메탄발생량 예측뿐만 아니라 현장 실측값이 없는 폐기물매립지에서 메탄발생량 예측값에 대한 정확성을 향상시키고자 하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 대상 매립지

Table 1은 본 연구 대상매립지인 S매립지의 제1매립장 현황을 나타낸 것이다. 매립기간은 1992년 2월부터 2000년 10월까지로, 주로 수도권지역의 생활폐기물과 사업장 폐기물 총 64,252,860 m³를 매립하였으며, 현재는 사후관리가 진행중으로 발생한 매립가스는 포집하여 주로 발전연료로 사용되고 있다.

Table 2는 S매립지 제1매립장의 매립가스 및 메탄가스 포집량과 매립가스 실측값을 나타낸 것(천승규 등, 2011)으로, 메탄가스 배출량은 매립가스 중 메탄의 비율을 50%로 가정하여 산정하였다. 매립가스 포집량과 현장 실측값을 살펴보면 매립가스 발생량에 큰 차이를 보이지 않아 매립가스의 표면발산량이 실제 매우 미미한 것으로 평가된다. 따라서 매립가스의 포집효율이 일정하다고 가정하였을 때 본 연구에서는 현장 계측기로 지속적 측정이 가능하여 데이터의 신뢰성이 높고 데이터 수가 많은 연도별 매립가스 포집량을 매립가스 발생량 실측값으로 사용하였다. 다만, 2003년의 경우

Table 1. Status of S landfill site (1st site)

Index		S Landfill	
Period of landfilling (year)		1992.2~2000.10	
Landfill capacity (m ³)		64,252,860	
MSW (%)	Combustible	Food	31.2
		Paper	16.6
		Wood	3.9
		Rubber/Leather	4.2
		Vinyl/Plastic	5.7
		Others(etc)	8.0
	Non-combustible	Briquet Ash/Glass	5.1
		Metals	5.2
		Soil etc	8.6
Industrial waste (%)	Ash	0.4	
	Organic/inorganic sludge (Drinkingwater treatment plant)	5.1	
	Organic/inorganic sludge (Wastewater treatment plant)	6.0	

Table 2. Landfill gas and methane generation rate in S landfill site (1st site)

Year	LFG collection system		Measurement (m ³ LFG/min)
	(m ³ LFG/min)	(m ³ CH ₄ /min)	
1997	168	84	-
1998	298	149	-
1999	311	156	-
2000	406	203	-
2001	304	152	-
2002	204	102	-
2003	59	30	-
2004	237	119	-
2005	208	104	212
2006	190	95	182
2007	137	69	152
2008	132	66	122
2009	128	64	98
2010	107	54	96

매립이 종료된 후 매립가스 포집방식을 수평가스 포집방식에서 수직가스 포집방식으로 교체하면서 매립가스의 포집량이 급속히 감소하였기 때문에 본 연구에서는 2003년 매립가스 포집량 자료를 제외하였다.

Table 3은 S매립지 제1매립장에 매립된 생활폐기물 및 사업장 일반폐기물의 매립량을 나타낸 것으로 1994년도에 가장 많은 매립량을 나타낸 이후 점차 감소하는 경향을 나타내었다(천승규 등, 2011).

2.2 메탄잠재발생량 및 메탄발생속도상수 산정방법

폐기물의 혐기성 분해에서 시간경과에 따른 메탄발생률은 메탄발생량을 나타내는 수정 Gompertz 식과 Logistic 식을 미분하여 각각 아래의 식들과 같이 나타낼 수 있다(Lay 등, 1998; 박진규, 2012).

Table 3. Annual amount of wastes landfilled in S landfill site (1st site)

Year	Amount of wastes landfilled (ton)
1992	1,462,254
1993	8,088,911
1994	11,664,891
1995	9,177,982
1996	8,613,533
1997	7,702,975
1998	6,603,425
1999	6,027,635
2000	4,911,254

$$R(t)_{GOM} = \frac{dM}{dt} = R_m \times \exp\left\{2 - \exp\left[1 + \frac{R_m \times e}{P}(\lambda - t)\right] + \frac{R_m \times e}{P}(\lambda - t)\right\} \quad (1)$$

$$R(t)_{LOG} = \frac{dM}{dt} = \frac{4R_m \times \exp\left[\frac{4R_m}{P}(\lambda - t) + 2\right]}{\left\{1 + \exp\left[\frac{4R_m}{P}(\lambda - t) + 2\right]\right\}^2} \quad (2)$$

여기서,

- P = 최종메탄수율 (mL/g VS)
- R_m = 최대메탄발생률 (mL/g VS · yr)
- λ = 지체기 (yr)
- t = 시간 (yr)
- M = 시간 t에서의 메탄발생률 (mL/g VS · yr)

본 연구에서는 고품 폐기물의 분해 시 중간지체기가 나타난다는 연구결과를 기초로 메탄발생률을 이분해성과 중분해성 2구간으로 구분하였다(김혜진 등, 2008). 이에, 상기의 식을 아래와 같이 두 구간으로 구분하면 수정 Gompertz 식은 식 (3)과 Logistic 식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며, 이 식들을 이용하여 현장 매립지에서의 메탄잠재발생량과 메탄발생속도상수를 평가하였다. 비선형 회귀분석은 SigmaPlot 10.0을 이용하였으며, 이때 비선형 최소제곱법을 수행하기 위한 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 이용하였다. 이는 잔차제곱합을 최소화할 수 있는 특징이 있다.

$$R(t)_{GOM2} = R_{1m} \times \exp\left\{2 - \exp\left[1 + \frac{R_{1m} \times e}{P_1}(\lambda_1 - t)\right] + \frac{R_{1m} \times e}{P_1}(\lambda_1 - t)\right\} + R_{2m} \times \exp\left\{2 - \left(\exp\left[1 + \frac{R_{2m} \times e}{P_2}(\lambda_2 - t)\right] + \frac{R_{2m} \times e}{P_2}(\lambda_2 - t)\right)\right\} \quad (3)$$

$$R(t)_{LOG2} = \frac{4R_{1m} \times \exp\left[\frac{4R_{1m}}{P_1}(\lambda_1 - t) + 2\right]}{\left\{1 + \exp\left[\frac{4R_{1m}}{P_1}(\lambda_1 - t) + 2\right]\right\}^2} + \frac{4R_{2m} \times \exp\left[\frac{4R_{2m}}{P_2}(\lambda_2 - t) + 2\right]}{\left\{1 + \exp\left[\frac{4R_{2m}}{P_2}(\lambda_2 - t) + 2\right]\right\}^2} \quad (4)$$

여기서,

- R(t) = 시간 t에서의 메탄발생률 (mL/g VS · yr)
- P₁ = 이분해성 물질 최종메탄수율 (mL/g VS)
- P₂ = 중분해성 물질 최종메탄수율 (mL/g VS)
- R_{1m} = 이분해성 물질 최대메탄발생률 (mL/g VS · yr)
- R_{2m} = 중분해성 물질 최대메탄발생률 (mL/g VS · yr)

- λ_1 = 이분해성 물질 지체기 (yr)
- λ_2 = 중분해성 물질 지체기 (yr)
- t = 시간 (yr)

3. 결과 및 고찰

3.1 메탄잠재발생량 및 메탄발생속도상수 산정

Fig. 1과 Table 4는 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 나타난 비선형 회귀분석 결과이다. 산정된 메탄가스 총 발생량을 S 매립지 제1매립장에 1992년부터 2000년까지 매립된 생활폐기물과 사업장 일반폐기물의 매립량 64,252,860 ton으로 나누어 메탄잠재발생량을 계산하였다.

메탄잠재발생량은 식(3)이 16.21 m³ CH₄/ton, 식 (4)가 14.44 m³ CH₄/ton으로 예측되었다. 메탄발생속도상수는 총 메탄발생량에 대한 최대 메탄발생률의 비로 나타낼 수 있으며, 메탄발생속도상수는 식 (3)이 0.10 yr⁻¹, 식(4)가 0.14 yr⁻¹로 산정되었다. 실측값과 수정 Gompertz 식과 Logistic

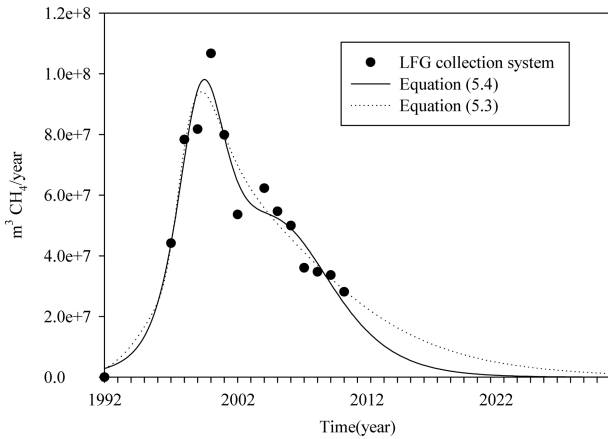


Fig. 1 Regression analysis for determination methane generation potential and methane generation constant using equations (3) and (4)

식을 이용한 예측값에 대한 결정계수(R²)는 0.92와 0.94로 높은 상관성이 있는 것으로 나타났으며, 식들에 대한 분산분석 결과 p-value는 0.05보다 낮은 것으로 나타나 본 연구에서 제안한 식들이 비선형 회귀분석을 통해 메탄잠재발생량과 메탄발생속도상수를 산정하기에 적합하며, 폐기물매립지에서의 메탄발생특성을 잘 묘사하는 것으로 판단된다.

폐기물매립지에서 매립가스의 포집량이란 실제 매립지에서 발생하는 총 매립가스의 양을 의미하지 않는다. 따라서 Table 5에 매립가스의 포집효율에 따른 메탄잠재발생량과 메탄발생속도상수의 변화를 나타내었다. 포집효율을 80%로 가정하였을 때 메탄잠재발생량은 수정 Gompertz 식이 20.26 m³ CH₄/ton, Logistic 식이 18.05 m³ CH₄/ton으로 포집효율 100%로 가정하였을 때와 비교하여 증가하였으나, 메탄발생속도상수의 경우 값의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 메탄가스의 발생경향은 변하지 않고 전체적인 메탄가스발생량만 변하였기 때문에 메탄발생속도상수의 변화는 없는 것으로 판단된다.

메탄잠재발생량과 메탄발생속도상수에 대한 기존의 연구결과를 살펴보면, 전은정(2007)은 수도권매립지 제1매립장을 대상으로 한 연구에서 연도별 매립폐기물에 대한 메탄잠재발생량을 BMP(Biochemical methane potential) 실험 결과를 통해 폐기물 조성별로 메탄잠재발생량을 산정하여 56~88 m³ CH₄/MG wet waste를 제시하였는데, 이는 본 연구 결과와 비교하여 매우 높은 메탄잠재발생량을 나타내었다. 한편 조한상 등(2007)은 BMP 실험을 통한 메탄발생량의 산정이 폐기물매립지에서의 메탄발생량보다 과대평가될 수 있음을 지적하였으며, 천승규 등(2011)의 연구보고에서도 BMP 실험을 통해 산정된 메탄잠재발생량이 현장 실측값보다 과대평가되는 것으로 보고하고 있다. 따라서 BMP 실험 등의 회분식 실험을 통한 메탄잠재발생량의 산정은 현장에서의 폐기물 분해율 차이로 인하여 과대평가될 우려가 있는 것으로 사료된다.

Table 4. Methane generation potential and methane generation rate constant in S landfill site (1st site)

Parameter		Eq. (3)	Eq. (4)
Total CH ₄ amount(m ³)	P1	839,998,612	351,281,855
	P2	201,778,988	576,307,430
	Total	1,041,777,600	927,589,285
Amount of wastes landfilled (ton)		64,252,860	
Methane generation potential (m ³ CH ₄ /ton)	L ₀ 1	13.07	5.47
	L ₀ 2	3.14	8.97
	Total	16.21	14.44
Maximum methane generation rate (m ³ /yr)	R1	53,400,537	75,131,253
	R2	48,119,863	50,147,961
Methane generation rate constant (yr ⁻¹)	k1	0.06	0.21
	k2	0.24	0.09
	Total	0.10	0.14
Lag-phase (yr)	1 st	4.3	5.0
	2 nd	5.5	7.1
Correlation coefficient, R ² (-)		0.92	0.94
p-value		0.0003	0.0001

Table 5. Results of methane generation potential and methane generation constant with various recovery efficiencies

Recovery efficiency	Parameters	Eq. (3)	Eq. (4)
100%	Methane generation potential (m ³ CH ₄ /ton)	16.21	14.44
	Methane generation rate constant(yr ⁻¹)	0.10	0.14
90%	Methane generation potential (m ³ CH ₄ /ton)	18.01	16.04
	Methane generation rate constant (yr ⁻¹)	0.10	0.14
80%	Methane generation potential (m ³ CH ₄ /ton)	20.26	18.05
	Methane generation rate constant (yr ⁻¹)	0.10	0.14

메탄발생속도상수의 경우 서동천 등(2001)은 W 매립지를 대상으로 0.14 yr⁻¹로 나타내었다. 송종석과 김승도(2006)는 S 매립지에 대하여 1997년~2005년까지의 연도별 메탄발생속도상수를 0.01~0.03 yr⁻¹로 산정하였다. 전은정(2007)은 BMP 실험 결과를 통한 메탄잠재발생량을 기초로 수도권매립지 제1매립장에 대한 메탄발생속도상수를 0.01 yr⁻¹으로 산정하였으나 실제 배출량보다 과소평가되는 것으로 나타났으며, 0.120 yr⁻¹로 하였을 때 메탄 발생 패턴은 비슷하나 실측값보다 과대평가되는 것으로 나타나고 있다. 나제현 등(2010)과 신성호 등(2010)은 국내의 다른 매립지에 대한 속도상수를 각각 0.13±0.04 yr⁻¹, 0.08~0.22 yr⁻¹로 나타내었다. 배원재 등(2009)은 수도권매립지에 대한 메탄발생속도상수를 평균 0.01 yr⁻¹로 산정하였다. 기존 연구결과들과 본 연구결과를 비교하면, 기존 연구에서 나타난 메탄발생속도상수의 범위 내에 본 연구에서 산정한 값이 포함되었지만 편차가 매우 큰 것으로 조사되었다.

결국 기존문헌에서 메탄잠재발생량 및 메탄발생속도상수에 대한 연구결과들 간의 큰 편차로 인하여 본 연구에서 산정한 메탄잠재발생량과 메탄발생속도상수의 적합성을 평가하기가 어려웠다. 이에, 본 연구에서 산정한 메탄잠재발생량과 메탄발생속도상수를 1차 반응모델 중 가장 많이 사용되고 있는 LandGEM 모델에 적용하여 적합성을 평가하고자 하였으며, LandGEM 모델은 1차 반응식으로 식 (5)와 같다 (Alexander 등, 2005).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-kt_{ij}} \quad (5)$$

여기서,

- Q_{CH_4} = 메탄발생량 (m³/yr)
- n = 매립년한
- i = 매립년한의 1년 단위
- j = 매립년한의 0.1년 단위
- k = 메탄발생속도상수 (yr⁻¹)
- L_0 = 메탄잠재발생량 (m³/ton)
- M_i = i년도의 폐기물 매립량 (ton)
- t_{ij} = ij년도에 매립된 폐기물의 매립년수

Fig. 2는 식 (3)과 식 (4)에서 산정된 메탄잠재발생량과 메탄발생속도상수를 LandGEM 모델에 적용하였을 때의 연도별 메탄발생량을 나타낸 것이다. 실측값과 LandGEM 모델의 예측값에 대한 결정계수는 식 (3)에서 산정된 변수값을 적용하였을 경우 0.777, 식 (4)에서 산정된 변수값을 적용하

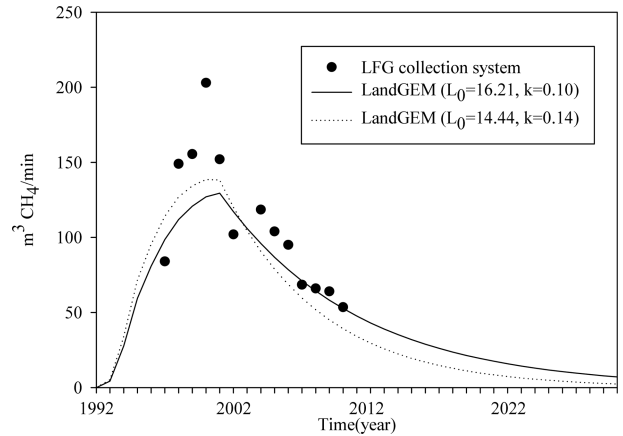


Fig. 2 Estimation of methane generation by LandGEM model

였을 때는 0.746으로 비교적 높은 상관성을 나타내어 본 연구에서 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 산정한 메탄잠재발생량과 메탄발생속도상수가 1차 반응모델에 적용 가능한 것으로 판단되었다. 그러나 식 (3)과 식 (4)의 비선형회귀분석에서는 메탄발생량의 피크와 유사한 경향을 나타내었으나 LandGEM 모델에서 예측한 연도별 메탄발생량에서는 실측값에서 나타난 피크를 정확히 표현하지 못하였는데, 그 이유는 크게 두 가지로 유추할 수 있다. 첫 번째는 본 연구에서 산정한 메탄잠재발생량 및 메탄발생속도상수가 과소평가되어 LandGEM 모델에서 예측한 연도별 메탄발생량이 실측값과의 차이가 발생하였다고 볼 수 있다. 두 번째는 첫 번째와는 다르게 식 (3)과 식 (4)에 산정한 메탄잠재발생량과 메탄발생속도상수는 식 (3)과 식 (4)에는 적합한 값이지만, LandGEM 모델과 같은 1차 반응식에는 적합하지 않아 예측값과 실측값의 차이가 발생한 것으로 볼 수 있다.

결국 본 연구에서 제시한 식들을 통해 산정한 메탄잠재발생량과 메탄발생속도상수를 LandGEM 모델에 적용하였을 때 시간에 따른 메탄발생 예측값이 비선형회귀분석에서 나타난 예측값보다 정확성이 많이 낮아지는 것으로 나타났다. 이에, 본 연구에서는 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 LandGEM 모델과 동일하게 매립폐기물량 및 산정된 메탄잠재발생량과 메탄발생속도상수를 적용하여 시간에 따른 메탄발생량을 예측할 수 있는 모델을 제안하고자 한다.

3.2 온실가스 발생량 예측모델 제안

최종메탄수율에 대한 최대메탄발생률의 비는 메탄발생속도상수와 동일하다고 하였을 때 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 최대메탄발생률은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 식

(6)과 식 (7)을 식 (3)과 식 (4)에 대입하고 연도별 폐기물 매립량에 따른 메탄발생률을 합산하여 총 메탄발생률로 계산하면 식 (8)과 식 (9)로 나타낼 수 있다. 실제 매립지에서 폐기물은 여러 단으로 나뉘어 적층 매립이 이루어진다. 이때 적층 매립구간에서 발생한 침출수는 메탄균의 활성이 높은 기존 매립층에서 빠르게 메탄화가 이루어져 매립가스 내의 메탄조성이 적층 매립 시 감소하였다가 빠르게 회복되는 것으로 알려져 있다(범봉수 등, 2003). 이에, 본 연구에서는 메탄발생률에 대한 지체기의 경우 첫 해에 매립된 매립폐기물의 지체기가 가장 길고, 연도가 지날수록 지체기는 점차 감소하는 것으로 가정하였다.

$$\frac{R_m}{P} = k \quad (6)$$

$$R_m = k \times P \quad (7)$$

$$Q_{CH_4(GOM_2)} = \sum_{i=0}^n M_i \times \{k_1 \times L_1 \times \exp\{2 - \exp[1 + k_1 \times e \times ((\lambda_1 - i) - t)] + k_1 \times e \times (\lambda_1 - i) - t\}\} + \{k_2 \times L_2 \times \exp\{2 - \exp[1 + k_2 \times e \times (\lambda_2 - i) - t] + k_1 \times e \times ((\lambda_2 - i) - t)\}\} \quad (8)$$

$$Q_{CH_4(LOG_2)} = \sum_{i=0}^n M_i \times \left\{ \frac{4k_1 \times L_1 \times \exp[4k_1((\lambda_1 - i) - t) + 2]}{(1 + \exp[4k_1((\lambda_1 - i) - t) + 2])^2} + \frac{4k_2 \times L_2 \times \exp[4k_2((\lambda_2 - i) - t) + 2]}{(1 + \exp[4k_2((\lambda_2 - i) - t) + 2])^2} \right\} \quad (9)$$

Fig. 3은 LandGEM 모델에 메탄발생률의 침투를 근사적으로 나타내기 위하여 메탄잠재발생량을 점차 증가시켰을 때의 메탄발생률 변화를 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 4는 Table 4의 산정 값과 Table 3의 매립량을 식 (8)과 식 (9)에 적용하였을 때의 연도별 메탄발생률을 예측한 결과이다. Fig. 3과 4에 나타낸 각 모델의 정확도를 평가하기 위하여 Table 6에 실측값과 예측값에 대한 회귀분석 결과를 나타내었다.

식 (8)과 식 (9)의 경우 실측값과 예측값에 대한 결정계수가 각각 0.885와 0.889로 LandGEM 모델의 0.746과 0.777보다 높게 나타나 본 연구에서 제안한 식이 더욱 정확함을 나타내었다. LandGEM 모델의 경우 메탄잠재발생량은 변화하여도 결정계수는 변하지 않는 것으로 나타났다. 결정계수는 회귀제곱합과 잔차제곱합의 합에 대한 회귀제곱합의

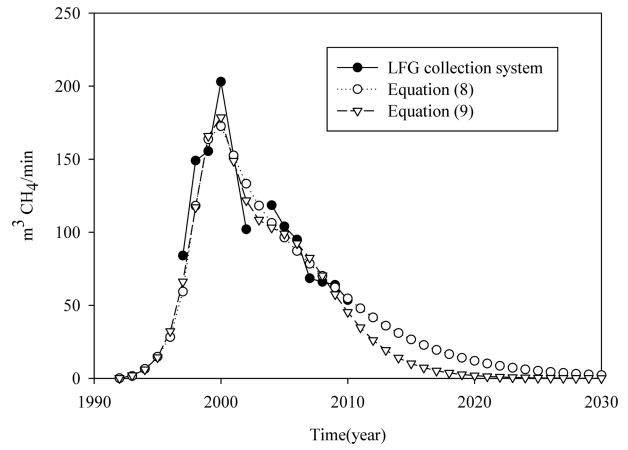


Fig. 4 Estimation of methane generation rate by equations (8) and (9)

Table 6. Summary of regression parameters for each model

Model	R-square	Adj. R-square
Eq. (8)	0.885	0.875
Eq. (9)	0.889	0.879
LandGEM model (L ₀ =14.4, k=0.14)	0.746	0.723
LandGEM model (L ₀ =16.0, k=0.14)		
LandGEM model (L ₀ =18.0, k=0.14)		
LandGEM model (L ₀ =16.2, k=0.10)	0.777	0.756
LandGEM model (L ₀ =18.0, k=0.10)		
LandGEM model (L ₀ =20.0, k=0.10)		

비로 나타낼 수 있는데, 본 연구에서는 모델의 잔차 변동에 따라 잔차제곱합이 변할 때 회귀제곱합도 변하여 결정계수가 변하지 않은 것으로 나타났다.

모델의 정확도 및 회귀분석을 통해 산정된 변수값의 적합성을 평가하기 위해 Fig. 5에 실측값(Q_{cs})과 모델 예측값(Q)의 비(ratio)에 대한 빈도분포를 나타내었다. 예측값과 실측값의 비가 1.0일 때 예측값이 정확한 것으로 식 (9)에 대한 1.0의 빈도분포가 약 60%로 가장 높게 나타났다. 이는 기존 연구(Amini 등, 2012)에서 변수값 산정을 통해 모델의 예측이 적합한 것으로 판단한 50%보다 높은 빈도분포를 나타내어 본 연구에서 산정한 메탄잠재발생량과 메탄발생속도상수가 적절하며, 제안한 모델이 메탄발생량 예측에 적합한 것

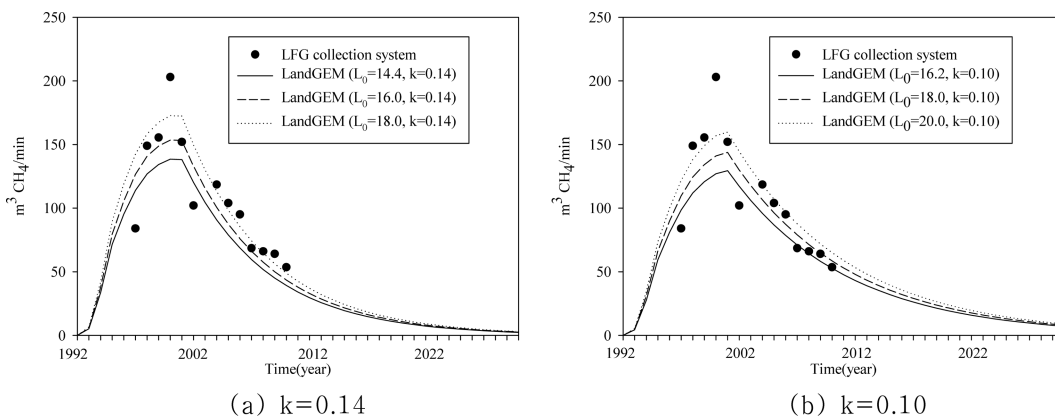


Fig. 3 Estimation of methane generation rate with various methane generation potentials

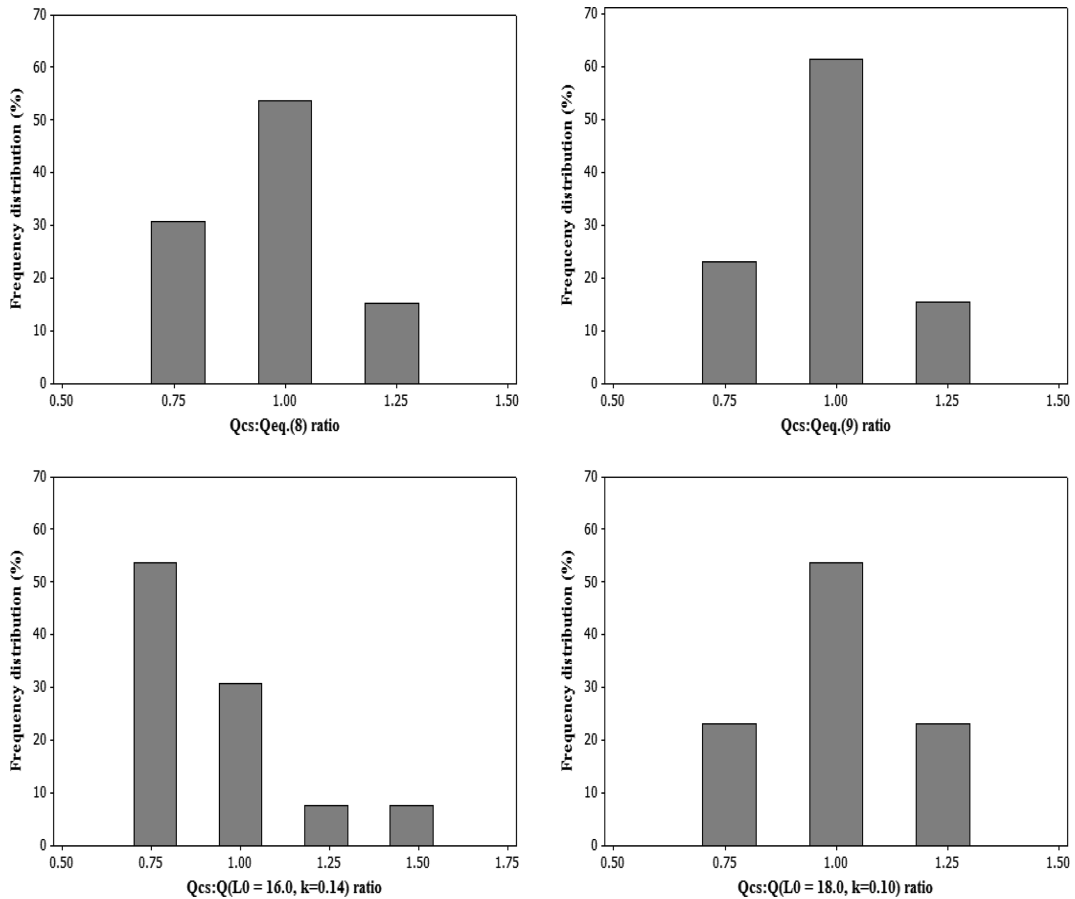


Fig. 5 Frequency distribution for each model (mid value : ± 0.125)

으로 판단된다. 다음으로는 식 (8)과 LandGEM($L_0=18.0$, $k=0.10$)의 1.0의 빈도분포가 약 50% 이상으로 나타나 LandGEM에서의 최적 변수값은 메탄잠재발생량은 $18.0 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton}$, 메탄발생속도상수는 0.10 yr^{-1} 인 것으로 판단되었다. LandGEM 모델에 메탄잠재발생량 $16.0 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton}$, 메탄발생속도상수 0.14 yr^{-1} 로 하였을 때는 예측값과 실측값의 비 0.75에 빈도분포가 가장 높게 나타나 예측값이 저평가된 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서 제안한 메탄잠재발생량 및 메탄발생속도상수의 산정방법이 타당한 것으로 판단되며, 제안된 모델은 1차 반응모델보다 더욱 정확한 메탄발생량을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 폐기물매립지의 메탄발생량을 측정된 실측값에 메탄발생률을 나타내는 수학적 모델을 기초로 비선형 회귀분석방법을 적용하여 메탄발생량 예측의 현장 검증 및 메탄잠재발생량 및 메탄발생속도상수의 산정 방법론을 제시하였다. 또한, 산정된 메탄잠재발생량과 메탄발생속도상수를 이용할 수 있는 메탄발생량 모델을 개발하여 현장 측정값이 없는 폐기물매립지에서의 메탄발생량 예측이 가능하도록 하였는데, 본 연구에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 메탄잠재발생량과 메탄발생속도상수를 산정하기 위해 기존의 수정 Gompertz 식과 Logistic 식을 미분 후 메탄발생특성을 이분해성과 중분해성으로 구분하여 제시한 식을

기초로 S매립지 제1매립장의 연도별 매립가스 포집량 실측값에 비선형회귀분석을 실시한 결과 실측값과 예측값 대한 결정계수(R^2)는 0.92와 0.94로 높은 상관성이 있어 본 연구에서 제안한 식들이 메탄발생량 예측 및 메탄잠재발생량과 메탄발생속도상수의 산정에 적합한 것으로 판단되었다.

2. 회귀분석을 통해 산정된 메탄잠재발생량과 메탄발생속도상수를 1차 반응모델인 LandGEM 모델에 적용하였을 때의 결정계수는 0.777 및 0.746로 비교적 높은 상관성을 나타내어 본 연구에서 제시한 식들을 이용하여 산정한 메탄잠재발생량과 메탄발생속도상수가 1차 반응모델에 적용 가능한 것으로 판단되었다. 그러나 LandGEM 모델에서의 예측값에서는 실측값에서 나타난 메탄발생량 피크를 정확히 표현하지 못하였다.

3. 1차 반응모델의 한계를 개선하기 위하여 본 연구에서 제안한 비선형회귀분석에 사용한 식들을 수정하여 LandGEM 모델과 동일하게 매립량 데이터만을 이용하여 매립가스 발생량을 예측할 수 있는 모델들을 개발하였다. 제안한 모델들에 동일한 메탄잠재발생량과 메탄발생속도상수를 적용하여 S매립지 제1매립장의 실측값과 비교한 결과 결정계수가 LandGEM 모델보다 높게 나타내어 예측값이 더욱 정확함을 나타내었다.

4. 따라서 본 연구에서 제안한 메탄잠재발생량 및 메탄발생속도상수의 산정방법이 타당한 것으로 판단되며, 제안된 모델은 1차 반응모델보다 더욱 정확한 메탄발생량을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

다만, 본 연구에서는 매립지 개소를 대상으로 메탄발생량에 대한 예측을 실시한 것으로 향후 지속적인 현장 예측을 통해 매립폐기물 종류, 매립지 내부 함수율 등 매립지 특성에 따른 변수값 산정과 모델의 검증 및 보완이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부 차세대에코이노베이션기술개발사업인 “이동식 매립지 정비 및 선별 가연물 연료화 기술 실증”과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

김현욱 등(2008) 매립지 온실가스 현장 측정 및 연구, 연구보고서, 환경관리공단.

김혜진, 정새롬, 박진규, 이남훈(2008) Diauxic Growth를 고려한 유기성 폐기물의 혐기성 생분해도 평가., 한국폐기물자원순환학회지, 한국폐기물자원순환학회, 제25권 제7호, pp. 652-658.

나제현, 배성진, 우진춘, 이동훈(2010) 폐기물 매립지의 메탄발생 속도상수(k) 산정 및 불확도 분석(사례 연구: 국내 A매립지를 중심으로). 한국폐기물자원순환학회 춘계학술연구회발표논문집, 한국폐기물자원순환학회, pp. 351-353.

박진규(2012) 폐기물매립지에서의 온실가스 예측 모델 및 변수 산정방법 개발, 박사학위논문, 안양대학교.

범봉수, 배제호, 조광명(2003) 적층매립시 전체매립층과 활성매립층간의 적정 높이 비 결정, 대한환경공학회지, 대한환경공학회, 제25권 제1호, pp. 39-48.

배원재, 김승도, 정주영(2009) 수도권매립지 매립가스 발생량 산정 및 예측에 대한 연구. 한국폐기물자원순환학회지, 한국폐기물자원순환학회, 제26권 제6호, pp. 572-579.

서동진, 이동훈, 한현수, 유만식, 서창일, 김낙주, 이남훈, 김승도(2001) 매립가스 발생량의 현장측정을 통한 메탄발생속도상수(k)의 평가. 한국폐기물학회지, 한국폐기물학회, 제18권 제7호, pp. 580-589.

송상훈, 김홍규, 박진규, 이남훈(2011) 폐기물매립지 온실가스 배출량 산정 모델의 보정 및 검증에 관한 연구. 한국폐기물자원순환학회지, 한국폐기물자원순환학회, 제28권 제4호, pp. 370-377.

송종석, 김승도(2006) 매립지에서의 메탄발생속도상수 결정 방법론에 관한 연구. 한국폐기물자원순환학회 춘계학술연구회발표논문집, 한국폐기물자원순환학회, pp. 380-383.

수도권매립지관리공사 녹색기술연구센터(2011) 수도권매립지통계

연감, 통계보고서, 2011-11-017-10, 수도권매립지관리공사

신성호, 유병욱, 이준홍, 진병복, 윤완우, 백원석(2010) 현장측정을 통한 매립지 메탄배출량 산정 및 배출계수 개발. 한국폐기물자원순환학회 춘계학술연구회발표논문집, 한국폐기물자원순환학회, pp. 377-379.

이남훈 등(2009) 매립가스 발생량 산정 및 CDM 사업연계방향 연구, 연구보고서, (주)건화 부설기술연구소.

전은정(2007) 폐기물매립지에서의 메탄 발생특성조사 및 발생량 예측모델에 관한 연구, 박사학위논문, 서울시립대학교.

조한상, 김재영, 천승규, 배영신(2007) 폐기물 종류별 매립가스 발생 특성에 관한 연구. 한국폐기물자원순환학회지, 한국폐기물자원순환학회, 제24권 제3호, pp. 226-233.

천승규(2010) 매립가스 일차분해 모델의 불확실성도 분석 연구, 한국폐기물자원순환학회지, 한국폐기물자원순환학회. 제27권 제8호, pp. 726-732.

천승규 등(2011) 2010 수도권매립지 매립가스 발생량 현장 모니터링 및 발생특성 분석, 연구보고서, 2011-11-010-01, 수도권매립지관리공사.

Alexander, A. Burklin, C., and Singleton, A. (2005) *Landfill Gas Emission Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide*, Report, EPA-600/R-05/047, U.S.EPA, Washington, DC.

Amini, H.R., Reinhart, D.R., and Mackie, K.R. (2012) Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties, *Waste Management*, Vol. 32, No. 2, pp. 305-316.

Cossu, R., Andreottola, G., and Muntoni, A. (1996) Modelling landfill gas production, *Landfilling of Waste: Biogas*, Christensen, T.H., Cossu, R. and Stegmann, R., E&FN SPON, London, pp. 237-268.

Garg, A., Achari, G., and Joshi, R.C. (2006) A model to estimate the methane generation rate constant in sanitary landfills using fuzzy synthetic evaluation, *Waste Management & Research*, Vol. 24, No. 4, pp. 363-375.

IPCC (2006) *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Report. Institute for Global Environmental Strategies, Japan.

Lay, J.J., Li, Y.Y. and Noike, T. (1998) Developments of bacterial population and methanogenic activity in a laboratory-scale landfill bioreactor, *Water Research*, Vol. 32, No. 12, pp. 3673-3679.

Machado, S.L., Carvalho, M.F., Gourc, J.P., Vilar, O.M. and Nascimento, J.C.F. (2009) Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results, *Waste Management*, Vol. 29, No. 1, pp. 153-161.

Scharff, H. and Jacobs, J. (2006) Applying guidance for methane emission estimation for landfills, *Waste Management*, Vol. 26, No. 4, pp. 417-429.

(접수일: 2012.8.26./심사일: 2012.10.8./심사완료일: 2012.10.15)