

LandGEM 모델을 이용한 청주권 생활폐기물 매립장의 매립지가스 발생상수 및 메탄 잠재발생량 산정

홍상표[†]

청주대학교 환경공학과
(2008. 11. 5. 접수/2008. 11. 20. 수정/2008. 12. 12. 채택)

Estimation of Methane Generation Rate and Potential Methane Generation Capacity at Cheongju Megalo Landfill Site Based on LandGEM Model

Sangpyo Hong[†]

Department of Environmental Engineering, Cheongju University
(Received November 5, 2008/Revised November 20, 2008/Accepted December 12, 2008)

ABSTRACT

Methane is a potent greenhouse gas and methane emissions from landfill sites have been linked to global warming. In this study, LandGEM (Landfill Gas Emission Model) was applied to predict landfill gas quantity over time, and then this result was compared with the data surveyed on the site, Cheongju Megalo Landfill. LandGEM allows the input of site-specific values for methane generation rate (k) and potential methane generation capacity L_0 , but in this study, k value of 0.04/yr and L_0 value of 100 m³/ton were considered to be most appropriate for reflecting non-arid temperate region conventional landfilling like Cheongju Megalo Landfill. Relatively high discrepancies between the surveyed data and the predicted data about landfill gas seems to be derived from insufficient compaction of daily soil-cover, inefficient recovery of landfill gas and banning of direct landfilling of food waste in 2005. This study can be used for dissemination of information and increasing awareness about the benefits of recovering and utilizing LFG (landfill gas) and mitigating greenhouse gas emissions.

Keywords: LandGEM (Landfill Gas Emission Model), LFG (Landfill Gas), Cheongju Megalo Landfill

I. 서 론

지난 수 십년 간 국제사회에서는 정치적 및 과학적 측면에서 기후변화를 중요한 사안으로 다루고 있다. 기후변화의 악영향이 보다 더 광범위하게 인식되면서 기후변화의 원인이 되는 지구온난화 가스(greenhouse gas) 감축의 중요성이 더욱 커지고 있다. 2002년에 미국 전체 지구온난화 가스 배출량의 9% 정도가 메탄가스였는데, 이 메탄가스의 32% 정도가 폐기물 매립지로부터 나온 것이었다.¹⁾ 교토의정서(Kyoto Protocol)의 협약사항에 의하면 지구온난화 가스를 감축해야 되는데

매립지 메탄가스의 감축은 교토의정서의 목표를 달성하는데 상당한 기여를 하게 되는 것이다.

전통적 매립지에서는 매립지가스를 단순소각(flaring) 시켜왔다. 단순소각 장치는 악취, 안전 문제 및 메탄 배출을 감소시키기 위하여 매립지가스(landfill gas)를 태우는 것이다. 단순소각에 대한 대안은 매립지가스를 태워버리지 말고 이를 이용해서 전기를 생산하는 것이다.²⁾ 미국 EPA에서는 1994년에 Landfill Methane Outreach Program을 만들어 매립지가스를 이용하여 전기를 생산하도록 지원하고 있다.

매립지가스는 혐기성 매립지에서 일어나는 물리적, 화학적 및 생물학적 작용의 결과로 생성된다. 매립지 가스에는 수십 종류의 미량 화합물이 존재하지만 이 중에서 매립지가스의 주요 성분은 메탄 및 이산화탄소이다.³⁾ 메탄은 에너지 가치가 높을 뿐만 아니라 지구온

[†]Corresponding author : Department of Environmental Engineering, Cheongju University
Tel: 82-43-229-8576, Fax: 82-43-229-8432
E-mail : sphong@cju.ac.kr

난화에 미치는 영향 지표인 GWP(global warming potential)가 이산화탄소의 23배 정도로 크기 때문에 매립지가스를 회수해서 에너지원으로 이용하는데 관심이 높다.³⁾

매립지가스 회수 시스템은 지구온난화 가스인 메탄가스의 대기 방출을 감소시키므로 교토의정서에 근거한 UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change)의 CDM(Clean Development Mechanism) 집행위원회(Executive Board)에 등록이 되면, 공인배출감축(CER : Certified Emission Reductions) 점수를 받을 수 있다. 우리나라는 UNFCCC를 1992년 6월 13일에 조인하고 1993년 12월 14일에 비준하였으며 교토의정서를 1998년 9월 25일에 조인하였다. CDM은 교토의정서 12조에 규정되어 있는데 비용대비 효과적이며, 지구온난화가스를 감축시키면서 선진국의 환경기술을 개발도상국에 국제적 이전도 촉진시키고 있다.⁴⁾ 매립지 운영자, 매립지가스 회수자, 매립지 관리 및 규제 행정당국에서는 매립지로부터 장시간에 걸쳐 생성되어 회수되는 가스량을 예측할 필요가 있다. 매립지가스의 최고(peak) 발생량 및 누적 발생량에 따라 매립지가스의 회수, 에너지화에 필요한 장치 규모, 경제성 및 에너지 이용방안 등이 결정된다. 환경보호 및 인체보건을 위해 매립지가스를 규제하는 관점에서, 매립지가스 발생량 예측은 매립지가스의 관리, 회수 및 처리에 결정적인 요소가 된다.

매립지가스 발생량 예측에 관한 연구로는 화학양론식 산정법,⁵⁾ 유기물이 미생물의 분해에 의해 발생하는 메탄발생량을 평가하는 BMP(Biochemical Methane Potential) 기법에서⁶⁾ 최근에는 확률적 접근법인 Monte Carlo Simulation 기법⁷⁾ 및 First-Order Decay모델을 개선한 IPCC 2000 Reference 모델⁸⁾ 등의 연구로 발전되어 왔다.

본 연구에서는 과도한 비용이 초래되는 시험정 설치 등의 현장조사를 수행하지 않고 매립지가스 발생량 예측에 관련된 연구결과를 토대로 습식매립지가 아닌 온대지방에서의 전통적 매립지에 권장되고 있는 기본값을 미국 EPA의 LandGEM 모델에 적용함으로써 청주권 광역생활폐기물 매립장의 매립가스 발생량에 근접하는 매립지가스 발생상수와 메탄 잠재발생량 같은 입력인자를 도출하고자 하였다. 본 연구는 연구대상 매립지인 청주권 광역생활폐기물 매립장 매립지가스의 실측자료에 근접한 입력인자를 도출함으로써 매립지가스 발생량을 예측하여 연구대상 매립지의 관리에 필요한 기초자료를 확보하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 연구대상 매립지의 특성

청주 지역은 연평균 강수량 1,344 mm, 최저 온도 -8.3°C , 최고온도 31.6°C 이며 여름철에 784 mm의 강우가 집중되는 것으로 나타나고 있다. 청주권 광역생활폐기물 매립장은 충북 청원군 강내면 학천리에 위치해 있으며, 조성면적은 152,847 m², 매립용량은 1,288,000 m³으로 2001년 1월부터 청주권에서 발생하는 생활폐기물을 2008년 10월 현재까지 매립중에 있다. 2007년 12월까지 매립량은 1,103,904 m³으로 총매립용량의 86%에 이르고 있어 2008년말에 사용종료될 것으로 예상된다. 2007년까지 총매립량을 기준으로 생활폐기물 76.3%, 건축폐기물 3.9%, 소각슬러지 1.6%, 복토재 18.2%를 구성하고 있다.⁹⁾

2. 입력인자 산정방법

현장특유의 매립지가스 발생상수(k)와 메탄 잠재발생량(L₀)을 산정하기 위해서는 과도한 비용과 시간이 소요되는 시험정을 설치하는 현장조사를 시행해야 되기 때문에 본 연구에서는 매립지가스 발생량 예측에 관련된 그 동안의 연구결과¹⁰⁻¹³⁾를 종합해서 온대지방의 전통적 매립지라고 할 수 있는 청주권 광역생활폐기물 매립장에 적합한 입력인자를 산정하고자 하였다. LandGEM 모델과 현장의 실측치를 비교해서 도출된 입력인자는 습식매립지(bioreactor landfill)가 아닌 온대지방의 전통적 매립지(conventional landfill)에 일반적으로 권장되는 입력치인 매립지가스 발생상수(k) = 0.04 yr⁻¹와 메탄 잠재발생량(L₀) = 100 m³/ton이었다.

3. 매립지가스 발생량 산정

1) 매립지가스 발생인자

매립지가스는 고형폐기물에 존재하는 유기물이 혐기성 분해되어 발생된다. 매립지가스 발생에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 폐기물의 성분과 수분함량이며, 그 외에도 온도, 침출수 pH 및 알칼리도, 폐기물 입자의 크기 및 압축 정도, 그리고 영양염류 등이 있다. 이들 요소는 매립지 설계 및 운영 조건에 따라 폐기물 분해 과정에 영향을 미치게 된다. 매립지가스는 매립이 진행되면서 발생되기 시작하여 매립지 사용종료 이후에도 30년 정도 지속적으로 발생될 수 있다. 매립지가스의 평균적 조성은 메탄 50%, 이산화탄소 45%, 질소 및 기타 가스 5% 정도이다.¹⁴⁾

매립지의 메탄생성균은 30~41°C에서 최적 활동을 나

타내는데 20°C 이하로 떨어지면 메탄 생산량이 급격히 감소된다.¹⁵⁾ 침출수의 pH가 5.5이하이거나 알칼리도가 1,500 ton// 이하이면 메탄 생성이 방해된다. 메탄 생성의 최적 pH는 7.0~7.2인데 pH가 6.5~8.0 사이에서도 메탄이 발생된다.¹⁶⁾ 또한 폐기물의 압축 정도가 클수록 메탄가스 발생량은 감소되며 질소, 인 및 칼륨 같은 영양염류의 이용가능성도 메탄가스 발생량에 영향을 미친다.¹⁷⁾

전통적 매립지에서는 수분의 침투를 최소화시킬 수 있도록 설계되고 운영된다. 그 결과 폐기물의 분해는 수십년 또는 심지어 수 백년까지 진행될 수 있다. 폐기물의 분해를 촉진시키기 위해 침출수를 재순환시키거나 수분을 보조적으로 첨가시키는 방안은 1970년대에 이미 제안되었다. 침출수 재순환은 폐기물의 수분 함량을 높여서 용해성 영양물질 및 비용해성 물질과 미생물과의 접촉을 좋게 만들어 미생물의 활동을 촉진시킨다.¹⁸⁾

도시고형폐기물 매립지는 폐기물이 매립된 시점이 매립 구역별로 달라서 안정화(stabilization) 단계도 서로 다르다. 폐기물이 매립되면 곧바로 호기성 상태에서 혐기성 상태로 전환되면서 주요한 전자수용체가 산소에서 질산염 및 황산염으로 전환된다. 고형폐기물 중에서 생분해가 가능한 부분은 가수분해되어 휘발성 지방산(volatile organic fatty acids)의 농도를 증가시키고 pH를 저하시키게 된다. 이후 휘발성 지방산은 메탄생성균(methanogen)에 의해 메탄으로 전환되면서 pH는 중성으로 된다.¹⁹⁾

따라서 본 연구에서는 폐기물 성분, 수분함량, 온도, 침출수 pH, 영양염류, 기온 및 강수량 등의 요소를 종합적으로 고려해 결정되는 매립지가스 발생상수(k) 및 메탄 잠재발생량(L₀) 같은 입력인자를 LandGEM에 적용하였다. 그리고 산출된 매립지가스 발생량 예측자료와 청주권 생활폐기물 매립지의 매립가스 발생량 측정 자료를 비교해서 청주권 생활폐기물 매립지의 매립지가스 발생량을 근접하게 모사(simulation)할 수 있는 최적의 k 및 L₀를 도출하고자 하였다.

2) 메탄 잠재발생량 산정

매립지가스 발생량을 추정하기 위해서는 메탄 잠재발생량을 결정해야 되는데, 일반적으로 폐기물 단위질량당 발생된 메탄의 체적으로 표현된다. 메탄 잠재발생량은 이론적 예측, 실험실의 실험 또는 매립지 현장의 가스 발생에 관련된 자료에 근거해서 추정될 수 있다. 그러나 지금까지 결합 없이 완벽하게 메탄 잠재발생량을 결정할 수 있는 방법은 아직 없다. 다음의 Table 1은 매립지가스(메탄 및 이산화탄소) 발생 잠재력을 나타낸다.¹⁸⁾

Table 1. Predicted Landfill Gas Potentials

Prediction basis	Total gas generation (m ³ /ton)
Typical U.S. municipal solid waste, theoretical estimate	400~520
Weight of organic components by degradability, theoretical estimate	100~310
Anaerobic digestion of refuse with sludge, lab measurement	210~260
Lysimeters operated 1 year	0.2~400
Full-size landfill, projected from existing short-term data	2~400

Source : Barlaz *et al.*, Methane Production from Municipal Refuse, 1990.

매립지가스 발생량을 이론적으로 예측하는 것은 폐기물의 화학적 성분에 근거하는 것으로 절대적 최대 메탄 잠재 발생량을 보여줄 수 있다. 실제로 일부 폐기물은 압축 등의 이유로 미생물의 접근이 차단되어 모든 유기성 폐기물을 생분해시킬 수 없으며, 이산화탄소 이외의 비메탄 탄소화합물(non-methane carbon compounds)로 생성될 수 있기 때문에 매립지가스 발생량이 절대적 최대 메탄 잠재발생량에 도달할 수 없게 된다. 결론적으로, 이론적 메탄 잠재발생량은 생분해 가능성 인자 및 다른 다양한 인자에 근거해서 조정되어져야만 한다.

수많은 연구자들이 생화학적 메탄 잠재발생량(Biochemical Methane Potential : BMP)이라 불리는 메탄 잠재 발생량을 평가하기 위해서 실험 절차를 개발해 왔다. ASTM Method E1196-92에서 정의된 매체의 미생물 군집에 의한 혐기적 분해과정에서 유기물이 메탄으로 전환된 생성량을 결정하기 위하여 개발된 실험 절차가 BMP 분석법이다. 다양한 폐기물 종류에 따라 BMP값은 다르게 나타난다.⁶⁾ 폐기물 성분을 분석한 후 BMP의 가중평균치를 구하여 잠재적 메탄 발생량(L₀)를 산정할 수 있다.

실질적인 매립지가스 발생량에 관련된 자료는 매립모형조(lysimeter), 파일럿 규모의 매립지, 그리고 일반적 규모의 매립지로부터 얻을 수 있다. 그렇지만, 이러한 자료는 발생된 매립지가스가 아니라 매립지로부터 회수된 가스를 나타내기 때문에 이러한 자료를 활용하는데 있어 결합 사유가 된다. 매립지 덮개의 존재 유무 및 완전성 그리고 매립지가스 회수 시스템의 종류 및 완벽성 등의 이유로 매립지가스를 회수하는 효율은 매우 낮은 것으로 추정된다. 매립지 덮개에 균열이 생기면 매립지가스 회수 효율은 감소하게 된다. 더욱이, 이러한 실험은 매립지가스가 모두 다 발생되는 시점까지

충분하게 지속되기가 어렵다. 또한, 메탄 잠재발생량을 결정하는데 필요한 폐기물의 질량 및 실제적인 반입시점 같은 필요한 자료를 구하지 못할 수도 있다.

본 연구에서는 청주권 생활폐기물 매립장의 매립지가스 발생량을 유사하게 예측할 수 있는 LandGEM의 메탄 잠재발생량(L₀)를 도출하기 위하여 Table 1의 매립지가스 발생 잠재력 범위에 있는 발생률을 적용하여 산출된 LandGEM의 매립지가스 발생량 예측자료와 청주권 생활폐기물 매립장의 매립지가스 발생량 측정자료를 비교해서 현장을 가장 근접하게 모사할 수 있는 L₀를 구하려고 하였다.

4. 매립지가스 발생량 산정 모델

1) 매립지가스 발생량 예측 모델의 필요성

매립지가스 모델링은 매립지가스 회수 시스템의 규모, 매립지가스 추출정의 개수, 매립지가스 회수 파이프의 크기, 매립지가스 압축기 등을 산정하는데 필요하다. 또한, 매립지 운영자가 매립지가스를 에너지로 활용할 수 있는지 가능성을 확인하기 위해서는 매립지가스 발생량에 관한 정보가 필요하다. 매립지가스 발생량 모델링의 대안으로는 시험정(test wells)을 설치하여 성능 시험을 해야 되는데, 소요되는 비용이 \$10만을 초과하고 3개월 이상이 소요된다.²⁰⁾

매립지가스 발생량은 폐기물 발생량, 폐기물 성분, 기후, 영양염류의 이용가능성, 침출수 pH, 폐기물 입자의 크기 및 폐기물의 수분함량 같은 현장 특유의 요인에 의해 결정된다. 이러한 요인을 다루는 수학적 매립지가스 발생량 예측모델 및 컴퓨터를 이용한 매립지가스 발생량 예측 모델이 다양하게 개발되어 있으며 그 예측의 정교함에도 차이가 많다. 매립지가스 발생량을 추정하기 위해서는 폐기물 단위질량당 매립지가스 발생량, 매립지가스 발생에 소요되는 지체시간, 시간 경과에 따른 매립지가스 발생량 변화 추세, 그리고 매립지가스의 발생 지속기간이라는 4가지 요소가 반드시 고려되어야

한다. 매립지 가스발생량 예측 모델의 특성을 간략히 비교해 보면 다음의 Table 2와 같다.

2) EPA LandGEM 모델

(1) 개요

LandGEM(Landfill Gas Emission Model) 모델은 매립지가스 발생을 정량화시키기 위하여 미국 EPA에서 1996년에 개발한 모델이다.²¹⁾ LandGEM 모델은 다음의 1차반응 분해 공식에 근거하고 있다. 매립지가스의 발생량 예측에는 매립지의 설비용량, 기존 총매립량 및 연간 매립량, 메탄 발생을 매립지가스 발생상수 k, 메탄 잠재발생량 L₀ 및 폐기물 반입년수 같은 인자들이 필요하다. 아래에는 매립지가스 총발생량을 구하는 식을 나타내었다.

$$Q = \sum_{i=1}^n 2kL_0M_i e^{-kt_i}$$

Q = 매립지가스 총발생량(m³/year)

n = 폐기물 매립년수

k = 매립지가스 발생상수(1/year)

L₀ = 메탄 잠재 발생량(m³/ton)

M_i = i 년도의 폐기물 매립량(ton)

t_i = i 년도의 매립된 폐기물의 매립년수

매립지가스 발생량을 구할 때 현장 특유의 자료가 없으면 기본값으로 처리하여 추정한다. 미국에서는 Clean Air Act의 규정에 따라 건조한 지역에서는 k = 0.02 yr⁻¹이 적용되고, 나머지 지역에서는 k = 0.05 yr⁻¹, L₀ = 170 m³/ton이 적용된다.¹⁰⁾ 폐기물 안정화에 관련된 매립지가스 발생상수(k)는 수분 첨가 및 침출수 재순환 같은 방법을 채택하는 생물반응조(bioreactor)로 설계 및 운영되는 매립지에서는 보다 더 큰 값을 적용할 수 있다. 폐기물 안정화를 향상시키면 매립지가스 발생량을 증가시켜 k 및 L₀ 값이 전통적인 매립지 보다 커지게

Table 2. Comparison of Models of Landfill Gas Generation Rate

Classification	Strength	Weakness
Stoichiometric Model	Mass Balance Model based on stoichiometry of waste	Not reflecting the site-specific landfill conditions
BMP Model	Determination of relative biodegradability of substrates by a mixed microbial flora	Degradation of the compound is limited by nutrients, inoculum, substrate toxicity and pH
Monte Carlo Simulation	Probability distribution of emission amounts provides uncertainty and variability	Emission amounts are not assumed to have the point estimates
IPCC Model	First-Order Decomposition Rate Model that simulates time horizon	Average k-value for all waste streams for single-phase
LandGEM Model	First-Order Decomposition Rate Model that uses Microsoft Excel spreadsheet interface	A lag phase is observed

된다. EPA에서는 생물반응조 매립지로 분류하는 기준으로 수분 함량(45% w/w, 수분 기준)에 따라 결정하는데 침출수를 제외한 액체를 이용하는 매립지에 한정시키고 있다.

LandGEM에서 메탄 발생을 상수 k 및 메탄 잠재발생량 L_0 는 기본값이 적용되다가 현장 실험 및 관측 결과에 의한 현장 특유의 값이 적용될 수 있다. 기본값은 매립지가스의 수집 및 처리의 설계에 필요한 최대값을 제공해 주게 된다. 실질적인 메탄가스 배출량을 추정하기 위해서는 미국 EPA 대기오염물질 배출 인자 편람 (Compilation of Air Pollutant Emission Factors)에 근거한 AP-42 기본값이 제공된다.²²⁾

(2) LandGEM 모델의 특성

LandGEM 모델은 매립지로부터 발생하는 매립지가스를 추정하는데 가장 광범위하게 이용되는 모델이면서 사용하기에도 상당히 간편하게 되어 있다. LandGEM 모델은 습식 매립지의 1차반응 동력학적 가스 배출변수(first-order kinetic gas emission parameters)를 적절하게 결정해서 발생하는 매립지가스량을 예측하게 된다. 혐기성 매립지에 매립된 폐기물은 일정한 시점이 되면 분해되어 메탄을 발생하게 된다. 수학적 모델링 기법을 이용하여 매립지 사용기간 중에 발생하는 매립지가스의 발생량과 발생속도를 예측할 수 있다. LandGEM 모델은 1차반응 가스 발생 모델에 근거하고 있으며, 다음과 같은 1차반응 폐기물 분해 공식을 갖는다.

$$dM_r/dt = -kM_r$$

단, M_r = 시점 t 에서 남아있는 폐기물량(ton)

t = 경과시간(yr)

k = 1차반응 상수(1/yr)

이를 시간에 관해서 적분을 하면

$$M_r = M e^{-kt}$$

$$V = M - M_r = M (1 - e^{-kt})$$

단, M = 매립된 최초의 폐기물량(ton)

V = 매립 시작부터 시간 t 까지 발생된 메탄의 누적량(m^3)

매립된 폐기물량과 메탄가스 발생량 사이에는 직접적 관련이 있다. 1년간 발생하는 메탄 발생량은 위의 공식을 시간에 대하여 미분하면 다음과 같이 도출된다.

$$Q = kL_0 M e^{-kt}$$

단, Q = 시점 t 에서 메탄 발생율(m^3)

L_0 = 메탄 잠재발생량(m^3/ton)

매립지가스에서 메탄의 함량은 대략적으로 총부피의 50% 수준이다. 따라서 매립지가스 총발생량은 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$Q_T = 2kL_0 M e^{-kt}$$

단, Q_T = 매립지가스 총발생량($m^3/ton \cdot yr$)

매립지는 사용연한이 몇 년간 지속되기 때문에 1년단위로 산정하여 n 년도까지의 매립지가스 총발생량은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$Q_T = \sum_{i=1}^n 2kL_0 M_i e^{-kt_i}$$

단, M_i = i 년도에 반입된 폐기물량(ton)

(3) 1차반응 상수(k) 및 메탄 잠재 발생량(L_0)의 기본값
1차반응 상수 k 는 1차반응 모델의 메탄 발생율의 감소를 조절하여 결과적으로 모델에 의하여 예측되어지는 매립지가스 발생기간을 조절하게 된다. k 값이 올라가면 매립지가스 발생기간은 감소하게 된다. 예를 들어, k 값은 $0.02 \sim 0.285 \text{ yr}^{-1}$ 이면 발생 가능한 매립지가스의 99%가 생성되는 데는 거의 14배의 차이가 생기게 된다. 폐기물 분해에 관련된 매립지내의 조건인 수분 함량, 온도, 폐기물의 생분해도 등이 최적 조건을 이루면 L_0 값이 변동되지 않는다는 가정 하에서 k 값은 높아지게 된다.¹⁰⁾

k 및 L_0 의 기본값(default)으로는 두 종류가 있는데, Clean Air Act 기본값과 U.S. EPA의 AP-42 목록(inventory) 기본값이 있다. Clean Air Act 기본값은 New Source Performance Standards 및 Emission Guidelines의 규정에 부합되어야 하는 경우에 적용할 의도로 만들어진 것으로서 매립지가스 발생량 추정을 보수적으로 매우 높게 추정하고 있는데 매립지가스 발생상수(k) = 0.050 yr^{-1} , 메탄 잠재발생량(L_0) = $170 \text{ m}^3/\text{ton}$ 이다. AP-42 목록 기본값은 배출인자에 근거한 것으로 미국에 있는 매립지의 실질적 조사 자료에 근거하고 있는데 매립지가스 발생상수(k) = 0.04 yr^{-1} , 메탄 잠재발생량(L_0) = $100 \text{ m}^3/\text{ton}$ 이다. 매립지 유기물의 안정화를 위한 목적이라면 매립지 운영자는 현장 특유의 모델을 위한 투입변수를 확보하지 못한다면 목록 기본값을 사용할 수 밖에 없다.¹⁰⁾

목록 기본값에서 k 값이 0.04 yr^{-1} 이면 비건조 지역의 전통적인 매립지를 반영한 것으로 매립된 폐기물에 특별히 다른 추가적인 액체를 주입하지 않는 매립지에 가장 적합하다. 만일 매립지에 다른 액체를 주입하면 k 값을 더 크게 하는 것이 적합하다. 현장 특유의 L_0 값이 확보되지 않으면 비건조 지역의 전통적인 매립지의 목

록 기본값으로 L_0 는 $100 \text{ m}^3/\text{ton}$ 으로 적용하고 있다¹¹⁾.

(4) 현장 특유의 k 및 L_0 값

LandGEM에서는 현장 특유의 k 및 L_0 값을 적용할 수 있다. 침출수를 재순환시키거나 외부의 액상 폐기물을 받아들이는 매립지에는 현장 특유의 k값이 적용될 수 있다. 일반적인 매립지 보다 비정상적으로 유기성 폐기물을 많이 받아들이거나 적게 받아들이는 매립지에는 현장 특유의 L_0 값을 적용할 수 있다.

실험실에서 반응조(bioreactor)의 최적 조건을 유지하는 경우에는 k값이 0.7 yr^{-1} 까지 높아질 수 있다. 온대 지방의 일부 매립지에서 실험한 결과에 의하면 k값이 $0.11\sim 0.21 \text{ yr}^{-1}$ 범위이다.¹²⁾ 전형적인 사막지역 매립지는 k값이 $= 0.01 \text{ yr}^{-1}$ 수준이다.¹³⁾

III. 결과 및 고찰

1. 청주권 광역생활폐기물 매립장 특성

Table 3를 살펴보면 청주권 광역생활폐기물 매립장에 매립되는 폐기물량은 총 358.4톤/일인데 가연성 생활폐기물이 237.3톤/일로 전체의 66%, 불연성 생활폐기물이 121.1톤/일로 34%를 차지한다. 가연성 생활폐기물 중에서 매립지가스 생성에 활발하게 영향을 미치는 성분은 음식물 채소류, 종이류 및 나무류로서 가연성 매립폐기물의 55% 정도 조성비를 보이고 있다.

청주권 광역생활폐기물 매립장은 전형적인 계곡형 매립지로서 매립방식은 cell 방식에 의한 준호기성 매립이며, 발생된 침출수는 하수처리장 이송 연계처리를 하고 있다. 폐기물을 2m 매립 후에 15cm 두께로 일일 복토를 하고 있다. 발생된 매립지가스(LFG)는 2004년 1월부터 10kPa 정도의 흡입력으로 포집하여 LFG 발전소에 연료로 공급하여 처리하고 있다.

2. LandGEM을 이용한 청주권 광역생활폐기물 매립장 매립지가스 발생량 평가

청주권 광역생활폐기물 매립장의 연도별 폐기물 반입

량, 매립가스 포집량, LandGEM 예측량 및 전기생산량은 다음의 Table 4와 같다. 미국의 Clean Air Act 규정에 따라 New Source Performance Standards 및 Emission Guidelines를 적용하기 위하여 매립지가스 최대 배출량을 반영하고 있는 매립지가스 발생상수 (k) = 0.05 yr^{-1} 와 메탄 잠재발생량(L_0) = $170 \text{ m}^3/\text{ton}$ 을 청주권 광역생활폐기물 매립장에 적용하였다. 그 결과 실측자료보다 2배 정도 높게 예측됨에 따라 본 연구에서는 실제 매립지 조건을 보다 근접하게 반영하고 수많은 연구결과에 근거해서 결정된 U.S. EPA의 AP-42의 규정에 따른 매립지가스 발생상수(k) = 0.04 yr^{-1} 와 메탄 잠재발생량(L_0) = $100 \text{ m}^3/\text{ton}$ 으로 산정하였다.¹⁰⁾

청주권 광역 생활폐기물 매립장에 2005년부터 폐기물 반입량이 감소하는 것은 음식물류 폐기물 직매립이 2005년부터 금지되었기 때문이다. 청주권 광역 생활폐기물 매립장에는 매립가스 포집시설 및 발전시설은 2004년부터 가동되었기 때문에 매립가스 포집량 자료는 2004년 이후 것만 존재한다. LandGEM 예측량이 실제로 포집된 매립가스량에 비해 다소 차이가 나는 것은 폐기물의 조성 및 포집 효율 등 매립지의 특성 및 해당 년도의 기후 특성 등에 기인하는 것으로 분석되며, 특히 2005년부터 음식물쓰레기 직매립이 금지되어 메탄 잠재발생량(L_0) 및 매립지가스 발생상수(k)가 감소하는데 기인하는 것으로 보인다.

Table 5에서는 메탄가스 및 이산화탄소의 시간별 함량 변화를 나타내고 있다. 메탄가스는 2004년에 48-53%를 나타내고 2008년에 46-49%로 소폭 감소하고 있지만 같은 연도에서는 월별 변화가 거의 없다. 이산화탄소는 2004년에 20-24%를 나타내다가 서서히 증가하여 2008년에는 매립지의 메탄발효기 수준인 45-50%를 나타내고 있다.

Table 6에서는 2004년부터 2008년까지의 월별 메탄가스 포집량을 보여주고 있다. 전월에 비해서 포집량이 갑자기 감소하는 2005년 11월, 2006년 9월, 2007년 2월 및 2008년 7월은 매립지 보수공사에 따른 일시적인 현상이다.

Table 3. Generation of Municipal Solid Waste Landfilled to Cheongju Megalo Landfill from Cheongju City and Cheonwon-Kun²³⁾

	Combustibles							Incombustibles				
	Sum	Garbage	Paper	Timber	Leather	Plastic	etc.	Sum	Briquettes	Metals, Ceramics	Soil	etc.
Cheongju	211.8	0.0	46.6	76.8	6.0	12.0	70.4	102.3	0.3	0.0	52.1	49.9
Cheongwon	25.5	4.6	2.0	2.4	2.5	3.5	10.5	18.8	0.1	2.5	9.4	6.8
Total	237.3	4.6	48.6	79.2	8.5	15.5	80.9	121.1	0.4	2.5	61.5	56.7
	(100%)	(2%)	(20%)	(33%)	(4%)	(7%)	(34%)	(100%)	(0%)	(2%)	(51%)	(47%)

*unit : ton/day

Table 4. Captured LFG and LandGEM Prediction of Cheongju Megalo Landfill Gas²²⁾

Classification	Landfilled waste (ton)*	Captured LFG (m ³ /yr)*	LandGEM prediction of LFG (m ³ /yr)	Electricity generation (kWh/yr) *
2001 year	145,071	-	-	-
2002 year	152,897	-	1,140,000	-
2003 year	144,056	-	2,297,000	-
2004 year	141,631	4,381,811	3,339,000	5,471,620
2005 year	103,366	4,900,574	4,321,000	6,167,625
2006 year	110,377	5,343,735	4,963,000	6,906,229
2007 year	118,246	4,684,812	5,636,000	5,808,023
2008 year	188,000 estimation	Now Capturing	6,344,000	Now Generating
2009 year	Closed	Capture Expected	7,025,000	Generation Expected
2010 year	Closed	Capture Expected	6,749,000	Generation Expected
2011 year	Closed	Capture Expected	6,485,000	Generation Expected
2012 year	Closed	Capture Expected	6,230,000	Generation Expected
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:

Table 5. CH₄ and CO₂ Composition at Cheongju Megalo Landfill Site

Classification	2004		2005		2006		2007		2008	
	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂
Jan.	49	20	47	23	49	23	49	30	49	45
Feb.	50	21	46	22	49	24	48	30	48	46
Mar.	50	20	46	25	50	25	48	31	46	48
Apr.	50	23	47	23	50	26	48	30	47	49
May	51	20	50	21	50	27	49	34	48	50
Jun.	51	24	50	23	50	25	48	37	47	49
Jul.	53	24	51	22	50	28	49	36	48	50
Aug.	52	20	51	20	50	27	47	35	47	49
Sep.	51	20	51	23	49	28	48	31	48	50
Oct.	50	21	52	21	50	29	49	30	-	-
Nov.	49	20	50	23	50	28	48	32	-	-
Dec.	48	20	50	24	49	29	47	34	-	-

*Source : Seohee Construction (Cheongju Megalo Landfill Gas Electricity Ltd.)

*unit : %

Table 7에서 보면 청주권 광역 생활폐기물 매립장에서 회수되는 매립지가스는 매립 초기인 2004년에서 2007년에 걸쳐서는 전형적 매립지의 매립가스 조성 중에서 특히 질소 성분이 현격한 차이를 나타내고 있다. 그것은 전형적 매립지에서는 매립지가스 발생단계인 1단계 : 초기 조정기(initial adjustment), 2단계 : 전이기(transition phase), 3단계 : 산 생성기(acid phase), 4단계 : 메탄 발효기(methane fermentation phase), 5단계 : 성숙기(maturation phase)에서 4단계인 메탄발효기를 대상으로 하고 있기 때문이다.²⁾ 청주권 광역 생활폐기물 매립장의 매립가스 중에서 질소의 함량은 매립초기에는 2004년 22-31%, 2005년 25-31%, 2006년 21-27%를 나타냈다가 감소하기 시작하여 2007년 14-21%

로 감소하더니 2008년에는 1-5%로 분석되고 있어 전형적 매립지에서의 질소 함량 2-5% 및 국내 매립지의 실측자료 2.7-7.9% 범위²⁴⁾에 유사해지고 있으며 매립후 5년이 경과한 2008년부터 메탄발효기의 전형적인 매립가스 조성을 나타내는 것으로 분석된다.

2004년에서 2007년 사이에 질소 함량이 높은 이유는 매립초기 단계의 복토과정에서 완전밀폐가 되지 못하여 매립지 상부로부터 공기가 일부 유입되기 때문으로 보인다.²⁾ 또한 매립이 진행되면서 매립가스 수평포집관이 폐기물 하층 등에 의한 부등침하로 훼손이 되어 매년 새로 설치하고 있으며, 10여개의 수직 포집정도 굴삭기로 굴착하여 매년 새로 설치함에 따라 외부 공기의 유입과 매립가스의 누출이 발생함에 따른 것으로 보

Table 6. Temporal Variation of CH₄ Generation Rate at Cheongju Megalo Landfill

Classification	2004 year	2005 year	2006 year	2007 year	2008 year
Jan.	10,345	134,321	196,450	197,722	176,943
Feb.	76,567	114,809	188,239	119,136	160,285
Mar.	165,687	141,261	204,254	185,311	158,571
Apr.	155,322	149,528	205,508	179,423	155,154
May	176,304	185,236	204,164	186,440	173,744
Jun.	169,671	181,864	196,650	155,845	165,062
Jul.	190,204	203,099	202,639	147,219	106,559
Aug.	189,943	206,692	199,479	152,899	161,327
Sep.	182,328	192,172	134,573	147,746	161,544
Oct.	177,912	211,713	177,604	168,770	-
Nov.	164,854	143,979	192,226	162,214	-
Dec.	164,432	191,106	200,286	133,278	-

*Source : Seohee Construction (Cheongju Megalo Landfill Gas Electricity Ltd.)
 *unit : m³/month

Table 7. Comparison of Cheongju Megalo Landfill Gas Composition

Classification	Typical Landfill ²⁾	2004 year	2005 year	2006 year	2007 year	2008 year
CH ₄	45-60	48-53	46-52	49-50	47-49	46-49
CO ₂	40-60	20-24	20-24	20-25	30-37	45-50
N ₂	2-5	22-31	25-31	21-27	14-21	1-5
O ₂	0.1-1	0.1-1	0.1-1	0.1-1	0.1-1	0.1-1
NH ₃	0.1-1	-	-	-	-	-
Sulfides, Mercaptans	0-1	-	-	-	-	-
Trace Constituents	0.01-0.6	-	-	-	-	-

*Source : Seohee Construction (Cheongju Megalo Landfill Gas Electricity Ltd.)
 - : No Data for Trace Constituents
 * unit : % dry weight

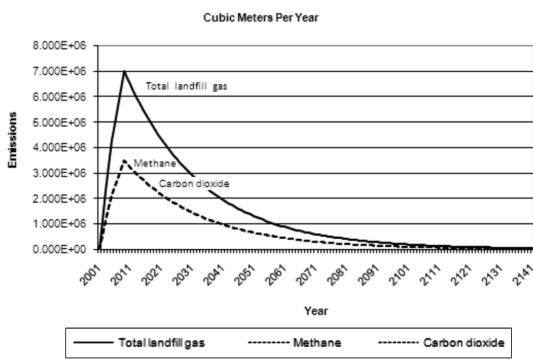


Fig. 1. Prediction of Generation of Landfill Gas at Cheongju Megalo Landfill by LandGEM.

인다. 또한 매립가스 발전시설이 정기적 점검이나 정비를 위해 가동중지하는 경우에도 매립가스가 적절히 포집되지 못하고 있는 것으로 분석된다.⁹⁾

LandGEM에서 도출된 Fig. 1을 살펴보면 메탄 및 이산화탄소의 발생량은 매립지가스 발생량의 50%로 산정되어 있으며, 메탄가스의 발생량은 2009년을 최고 정

점으로 급격히 하락하여 매립지가스의 발생은 미약하지만 거의 100년 가까이 지속되는 것으로 예측된다. LandGEM에서 청주권 광역생활폐기물 매립지의 사용이 2008년말에 종료될 것으로 예상할 때에 메탄 가스를 회수하여 전력을 생산할 수 있는 매립지가스 발생은 LandGEM 예측에 의하면 매립지 사용종료 이후에도 몇 년 정도 더 유지될 것으로 예측된다. 메탄가스 발생이 감소하여 더 이상의 전력 생산이 경제성이 없게 될 때에는 메탄가스를 단순소각(flaring)시켜 지구온난화 기여도를 낮추어야 한다.

청주권 광역 생활폐기물 매립장에서 메탄가스를 회수하여 생산된 전기는 한국전력에 판매하고 있는데 2006년에는 553백만원의 매출액을 기록하였다. 매립지가스를 회수하여 연료로 이용하면 UNFCCC의 CDM 사업으로 인정받을 수 있는 조건이 된다. 청주권 광역생활폐기물 매립장에서는 메탄 가스를 발전용 연료로 이용하여 지구온난화 지수가 이산화탄소보다도 23배가 높은 메탄가스의 처리에도 기여하면서 전력도 생산하기 때문에 CDM(Clean Development Mechanism) 등록

조건이 되고 있다. 그러나 청주권 광역 생활폐기물 매립장은 매립 초기에 UNFCCC에 등록을 못하여 공인 배출감축(Certified Emission Reduction)으로 활용을 못하고 있다.

IV. 결 론

지구 온난화로 인한 기후변화를 방지하기 위하여 저탄소 사회로의 전환을 모색하고 있다. 매립지가스의 주 성분인 메탄은 지구온난화 기여도가 높은 물질이기 때문에 매립지가스의 발생량을 예측하여 이를 적절히 포집하여 처리하여야 한다. 본 연구에서는 청주권 광역 생활폐기물 매립장의 사례로 하여 실측자료와 미국 EPA에서 개발한 LandGEM 모델의 예측자료를 비교평가하여 청주권 광역 생활폐기물매립장의 매립지 가스 발생량에 근접하는 매립지 발생가스(k) 및 메탄 잠재 발생량(L_0)를 도출하였다.

LandGEM 모델을 통해서 도출된 값은 온대지방에 일반적으로 적용되는 값인 매립지가스 발생상수(k) = 0.04 yr^{-1} 와 잠재적 메탄 발생량(L_0) = $100 \text{ m}^3/\text{ton}$ 으로 나왔다. 실측 자료보다 LandGEM의 예측량이 2004년에서 2006년까지는 다소 적게 산정되고 2007년에는 다소 많게 산정되는 것은 모델에 적용한 인자와 기상 조건 같은 현장 특유의 상황과 차이가 나고, 매립지의 설계와 운영방식에 따른 포집효율 그리고 폐기물 조성의 변동에 기인하는 것으로 보인다. 특히 2005년부터 음식물류 폐기물 직매립이 금지되어 메탄 잠재발생량(L_0) 및 매립지가스 발생상수(k)가 감소하는데 기인하는 것으로 보인다.

본 연구결과에서는 LandGEM의 예측치가 실측치와 차이가 다소 발생하지만 전반적으로 현장 실측치와 근접하기 때문에 예비평가(feasibility assessment) 단계에서 선별적인 예측 모델로 비교적 간편하게 활용할 수 있는 LandGEM 모델의 적용이 적합하다고 보인다.

참고문헌

- Paulina Jaramillo, Landfill-Gas-to-Energy Projects : Analysis of Net Private and Social Benefits. *Environmental Science and Technology*, **39**(19), 7365-7373, 2005.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H. and Vigil, S. A. : Integrated solid waste management. McGraw-Hill, 1993.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Third Assessment Report, 2001.
- <http://www.unfccc.int>
- Buswell, A. M. *et al.*, Mechanism of Methane Fermentation, *Industrial and Engineering Chemistry*, **44**, 550-552, 1952.
- Owens, J. M. and Chynoweth, D. P. : Biochemical Methane Potential of MSW Components, International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste, 1992.
- Lee, S. K. : A Study on Uncertainty of Greenhouse Gas Emissions in Landfill by Monte Carlo Simulation. Ph.D. Thesis in Pukyong National University, 2006.
- Cho, H. S. and Kim, J. Y. : Comparison of Greenhouse Gas Emissions from A Fictional Landfill by Applying Biochemical Methane Potential Method Based on IPCC 2000 Reference Model, 2008 Spring Symposium of Korea Society of Waste Management, 2008.
- Cheongju City, Survey on Environmental Impact from Cheongju Megalo Landfill, 2007.
- Debra R. Reinhart, Ayman A. Faour, First-Order Kinetic Gas Generation Model Parameters for Wet Landfills, U.S. EPA, 2005.
- Wisconsin Administration Code NR 514.07(9), Guidance for Landfill Organic Stability Plans, 2007.
- Reinhart, D. and Townsend, T. : Landfill Bioreactor Design and Operation, Lewis Publishing, 1998.
- Alex Stege, Modelling Landfill Biogas Generation for Different Countries, Landfill Methane to Markets Workshop, 2006.
- U.S. EPA, AP 42 Emission Factors : Municipal Solid Waste Landfills, 1998.
- Hartz, K. E., Klink, R. E. and Ham, R. K. : Temperature effects : Methane generation from landfill samples. *Journal of Environmental Engineering*, **108**, 629-638, 1982.
- EMCON Associates, Methane Generation and Recovery from Landfills, Ann Arbour Science Publishers, 1980.
- DeWalle, F. B., Chain, E. S. K. and Hammerberg, E. : Gas production from solid waste in landfills. *Journal of Environmental Engineering*, **104**, 415-432, 1978.
- Barlaz, M. A., Ham, R. K. and Schaefer, D. M. : methane production from municipal refuse. *Critical Reviews in Environmental Control*, **19**(6), 557-584, 1990.
- Kim, J. and Pohland, F. : Process enhancement in anaerobic bioreactor landfills. *Waster Science and Technology*, **48**(4), 29-36, 2003.
- The Solid Waste Association of North America, 1998.
- <http://www.epa.gov/catc/dir1/landgem-v302.xls>
- U.S. EPA, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Report Number AP-42, 1997.
- Korea Ministry of Environment, Korea Nationwide Waste Generation and Treatment, 2007.
- Kim, E. H. and Kim, S. H. : A fundamental study on stabilization in municipal waste landfill site. *Korean Journal of Environmental Health Society*, **27**(1), 56-62, 2001.