

연구노트

매립지 가스 발생량 평가 - 청주권 광역생활폐기물 매립장 사례연구

홍 상 표

청주대학교 환경공학과

(2008년 8월 5일 접수, 2008년 10월 27일 승인)

Assessment of Landfill Gas Generation - A Case Study of Cheongju Megalo Landfill

Sang-Pyo Hong

Dept. of Environmental Engineering, Cheongju University

(Manuscript received 5 August 2008; accepted 27 October 2008)

Abstract

Methane is a potent greenhouse gas and methane emissions from landfills 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 0.05/yr and L_0 value of 170m³/Mg were considered to be most appropriate for reflecting non-arid temperate region conventional landfilling, Cheongju Megalo Landfill.

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 garbage 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), CDM (Clean Development Mechanism), Cheongju Megalo Landfill

1. 서론

지난 수십년간 국제사회에서는 기후변화를 정치적 및 과학적으로 중요한 사안으로 다루고 있다. 기후변화의 악영향이 보다 더 광범위하게 인식되면서 기후변화의 원인이 되는 지구온난화 가스 감축의 중요성이 더욱 커지고 있다. 2002년에 미국 전체의 지구온난화 가스 배출량의 9% 정도가 메탄가스였는데, 이 메탄가스의 32% 정도가 폐기물 매립지로부터 나온 것이었다(U.S. EPA, 2004). 교토 의정서(Kyoto Protocol)의 협약사항에 의하면 지구온난화 가스를 감축해야 되는데 매립지 메탄가스의 감축은 교토 의정서의 목표를 달성하는데 상당한 기여를 하게 되는 것이다.

매립지들은 전통적으로 매립지 가스를 단순소각(flare)시켜왔다. 단순소각 장치는 악취, 안전 문제 및 메탄 배출을 감소시키기 위하여 매립지 가스(landfill gas)를 태우는 것이다. 단순소각에 대한 대안은 매립지 가스를 태워버리지 말고 이를 이용해서 전기를 생산하는 것이다(Paulina Jaramillo, 2005). 미국 EPA에서는 1994년에 Landfill Methane Outreach Program을 만들어 매립지 가스를 이용하여 전기를 생산하도록 지원하고 있다.

매립지 가스는 혐기성 매립지에서 일어나는 물리적, 화학적 및 생물학적 작용의 결과로 생성된다. 매립지 가스에는 수십 종류의 미량 화합물이 존재하지만 이중에서 매립지 가스의 주요 성분은 메탄 및 이산화탄소이다(Tchobanoglous *et al*, 1993). 메탄이 에너지 가치가 높고 또한 지구온난화에 끼치는 영향 지표인 GWP(global warming potential)가 이산화탄소의 23배 정도로 크기 때문에 매립지 가스를 회수해서 에너지원으로 이용하는데 관심이 높다(IPCC, 2001).

매립지 가스 회수 시스템은 지구온난화 가스(greenhouse gas)인 메탄가스의 대기 방출을 감소시키므로 교토 의정서(Kyoto Protocol)에 근거한 UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change)의 CDM(Clean Development Mechanism) 집행위원회(Executive Board)에 등

록이 되면 공인 배출 감축(CER : Certified Emission Reductions) 점수를 받을 수 있다. 우리나라는 UNFCCC을 1992년 6월 13일에 조인하고 1993년 12월 14일에 비준하였으며 교토 의정서(Kyoto Protocol)를 1998년 9월 25일에 조인하였다. CDM은 교토 의정서 12조에 규정되어 있는데 비용대비 효과적으로 지구온난화가스를 감축시키면서 선진국의 환경기술을 개발도상국에 국제적 이전도 촉진시키고 있다(www.unfccc.int).

매립지 운영자, 매립지 가스 회수자, 매립지 관리 및 규제 행정당국에서는 매립지로부터 장시간에 걸쳐 생성되어 회수되는 가스량을 예측할 필요가 있다. 매립지 가스의 최고(peak) 발생량 및 누적 발생량에 따라 매립지 가스의 회수, 에너지화에 필요한 장치 규모, 경제성 및 에너지 이용방안 등이 결정된다. 환경 및 인체보건을 보호하기 위해 매립지 가스를 규제하는 관점에서, 매립지 가스 발생량 예측은 매립지 가스의 관리, 회수 및 처리에 결정적인 요소가 된다.

매립지 가스 발생량 예측에 관한 연구로는 화학양론식 산정법(Buswell, 1952), 유기물이 미생물의 분해에 의해 발생하는 메탄발생량을 평가하는 BMP (Biochemical Methane Potential) 기법(Owens, 1992)에서 최근에는 확률적 접근법인 Monte Carlo Simulation 기법(이상구, 2006) 및 First-Order Decay모델을 개선한 IPCC 2000 Reference 모델(조한상 외, 2008)등의 연구로 발전되어 왔다.

본 연구에서는 매립지에서 메탄 같은 매립지 가스가 발생하는 기작을 살펴보고, 미국 EPA에서 개발한 LandGEM의 구성원리를 분석하였다(www.epa.gov). 그리고 청주권 광역생활폐기물 매립장의 매립지 가스 회수 실측자료를 매립지 가스 예측모델인 LandGEM의 예측자료와 비교평가하여 생활폐기물 매립장의 CDM 사업등록 같은 매립지 가스 관리에 필요한 기초정보를 제공하고자 하였다.

II. 매립지의 가스 발생량 산정

1. 매립지 가스 발생

매립지 가스는 고형폐기물에 존재하는 유기물이 혐기성 분해되어 발생하는 것이다. 매립지 가스 발생에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 폐기물의 성분과 수분함량이다. 그 외에도 온도, 침출수 pH 및 알칼리도, 폐기물 입자의 크기 및 압축 정도, 그리고 영양염류가 기타 요소가 된다. 이들 요소가 매립지 설계 및 운영 조건에 따라 폐기물 분해과정에 영향을 미치게 된다. 매립이 된 이후에 곧바로 매립지 가스가 발생되기 시작하여 매립지 사용종료 이후에도 30년 정도 지속될 수 있다. 매립지 가스의 평균적 조성은 메탄 50%, 이산화탄소 45%, 질소 및 기타 가스 5% 정도이다(U.S. EPA, 1998).

매립지의 메탄생성 박테리아는 30 ~ 41°C 에서 최적 활동을 나타내는데 20°C 이하로 떨어지면 메탄 생산량이 급격히 감소된다 (Hartz *et al*, 1982). 침출수의 pH가 5.5이하이거나 알칼리도가 1,500mg/L 이하이면 메탄 생성이 방해된다. 메탄 생성의 최적 pH는 7.0 ~ 7.2인데 pH가 6.5 ~ 8.0 사이에서도 메탄 발생이 된다(EMCON Associates, 1980). 폐기물의 압축 정도가 클수록 메탄가스 발생량은 감소되며 질소, 인 및 칼륨 같은 영양염류의 이용가능성도 메탄가스 발생량에 영향을 끼친다(DeWalle *et al*, 1978).

전통적인 매립지에서는 수분의 침투를 최소화시킬 수 있도록 설계되고 운영되었다. 그 결과로 폐기물의 분해는 수십년 또는 심지어 수백년까지 진행될 수 있다. 폐기물의 분해를 촉진시키기 위해 침출수를 재순환시키거나 수분을 보조적으로 첨가시키는 방안은 1970년대에 이미 제안되었다. 침출수 재순환

은 폐기물의 수분 함량을 높여서 용해성 영양물질 및 비용해성 물질과 미생물과의 접촉을 좋게 만들어 미생물의 활동을 촉진시킨다(Barlaz *et al*, 1990).

도시 고형폐기물 매립지는 폐기물이 매립된 시점이 동일할 수가 없어 매립 구역별로 안정화(stabilization) 단계가 서로 다르다. 폐기물이 매립되면 곧바로 호기성 상태에서 혐기성 상태로 전환되면서 주요한 전자수용체가 산소 대신에 질산염 및 황산염으로 전환된다. 고형폐기물 중에서 생분해가 가능한 부분은 가수분해되어 휘발성 지방산(volatile organic fatty acids)의 농도가 높아져서 pH가 저하되게 된다. 휘발성 지방산은 메탄생성균(methanogen)에 의해 메탄으로 전환되면서 pH는 중성으로 된다(Kim, *et al*, 2003).

2. 메탄 잠재 발생량 산정

매립지 가스 발생을 추정하기 위해서는 메탄 잠재 발생량을 결정해야 되는데, 일반적으로 폐기물 질량당 발생된 메탄의 체적으로 표현된다. 메탄 잠재 발생량은 이론적 예측, 실험실의 실험 또는 매립지 현장의 가스 발생에 관련된 자료에 근거해서 추정될 수 있다. 현재로서는, 메탄 잠재 발생량을 결함없이 결정할 수 있는 방법은 없다. 다음의 표1은 매립지 발생 가스(메탄 및 이산화탄소) 잠재력을 나타낸다.

매립지 가스 발생량을 이론적으로 예측하는 것은 폐기물의 화학적 성분에 근거하는 것으로 절대적 최대 메탄 잠재 발생량을 보여줄 수 있다. 실제로는, 일부 폐기물은 압축 등의 이유로 접근이 차단되고, 모든 유기성 폐기물을 생분해시킬 수 없으며, 이산화탄소 이외의 비메탄 탄소화합물(non-methane

표 1. Predicted Landfill Gas Potentials

Prediction Basis	Total Gas Generation (m ³ /Mg)
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

Sources : Barlaz *et al*, 1990.

carbon compounds)로 생성될 수 있기 때문에 매립지 가스 발생량이 절대적 최대 메탄 잠재발생량에 도달할 수 없게 된다. 결론적으로, 이론적 메탄 잠재발생량은 생분해가능성 인자 및 다른 다양한 인자에 근거해서 조정되어야만 한다.

수많은 연구자들이 생화학적 메탄 발생 잠재력(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(Owens, *et al*, 1992). 폐기물 성분을 분석하면 BMP의 가중평균치를 구하여 잠재적 메탄 발생량(L_0)를 산정할 수 있다.

실질적인 매립지 가스 발생량에 관련된 자료는 lysimeter, 파일럿 규모의 매립지, 그리고 일반적 규모의 매립지로부터 취득된다. 그렇지만, 이러한 자료는 발생된 매립지 가스가 아니라 매립지로부터 회수된 가스를 나타내기 때문에 이러한 자료를 활용하는 데 있어 결함 사유가 된다. 매립지 덮개의 존재 유무 및 완전성 그리고 매립지 가스 회수 시스템의 종류 및 완벽성 등의 이유로 매립지 가스를 회수하는 효율은 매우 낮은 것으로 추정된다. 매립지 덮개에 균열이 생기면 매립지 가스 회수 효율은 감소하게 된다. 더욱이, 이러한 실험은 매립지 가스가 모두 다 발생되는 시점까지 충분하게 지속되기가 어렵다. 또한, 메탄 발생 잠재력을 결정하는데 필요한 폐기물의 질량 및 실제적인 반입시점 같은 필요한 자료를 구하지 못할 수도 있다.

III. 매립지의 가스 발생량 예측 모델

1. 매립지의 가스 발생량 예측 모델의 필요성

매립지 가스 모델링은 매립지 가스 회수 시스템의 규모, 매립지 가스 추출정의 개수, 매립지 가스 회수 파이프의 크기, 매립지 가스 압축기 등을 산정

하는데 필요하다. 또한, 매립지 운영자가 매립지 가스를 에너지로 활용할 수 있는지 가능성을 확인하기 위해서는 매립지 가스 발생량에 관한 정보가 필요하다. 매립지 가스 발생량 모델링의 대안으로는 시험정(test wells)을 설치하여 성능 시험을 해야 되는데, 소요되는 비용이 \$10만을 초과하고 3개월 이상이 소요된다(The Solid Waste Association of North America, 1998).

매립지 가스 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 매립지 가스 발생량 예측모델 및 컴퓨터를 이용한 매립지 가스 발생량 예측 모델이 다양하게 개발되어 있으며 그 예측의 정교함에도 차이가 많다. 매립지 가스 발생량을 추정하기 위해서는 폐기물 중량당 매립지 가스 발생량, 매립지 가스 발생에 소요되는 지체시간, 시간 경과에 따른 매립지 가스 발생량 변화 추세, 그리고 매립지 가스의 발생 지속 기간이라는 4가지 요소가 반드시 고려되어야 한다.

2. EPA LandGEM 모델

1) 개요

LandGEM(Landfill Gas Emission Model) 모델은 매립지 가스 발생을 정량화시키기 위하여 미국 EPA에서 1996년에 개발한 모델이다. LandGEM 모델은 다음의 1차반응 분해 공식에 근거하고 있다. 매립지 가스의 발생량 예측에는 매립지의 설계용량, 기존 총매립량 및 연간 매립량, 메탄 발생을 매립지 가스 발생상수 k 및 메탄 잠재발생량 L_0 및 폐기물 반입년수 같은 인자들이 필요하다.

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

Q = 매립지 가스 총발생량 ($m^3/year$)

n = 폐기물 매립년수

k = 매립지 가스 발생상수 ($1/year$)

L_0 = 메탄 잠재 발생량 (m^3/Mg)

M_i = i 년도의 폐기물 매립량 (Mg)

t_i = i 년도의 매립된 폐기물의 매립년수

현장 특유의 자료가 없으면 기본값로 처리하여 매립지 가스 발생량을 추정한다. 미국에서는 Clean Air Act의 규정에 따라 건조한 지역에서는 $k = 0.02 \text{ yr}^{-1}$ 이 적용되고, 나머지 지역에서는 $k = 0.05 \text{ yr}^{-1}$, $L_0 = 170 \text{ m}^3/\text{Mg}$ 이 적용된다(Debra *et al.*, 2005). 폐기물 안정화는 수분 첨가 및 침출수 재순환 같은 방법을 채택하는 생물반응조(bioreactor)로 설계되고 운영되는 매립지에서 보다 더 신속하게 향상되고 축진될 수 있다. 폐기물 안정화의 향상은 매립지 가스 발생량을 증가시켜 k 및 L_0 값이 전통적인 매립지와 달라지게 된다. EPA에서는 생물반응조 매립지로 분류하는 기준으로 수분 함량(45% w/w, 수분 기준)에 따라서 결정하는데 침출수를 제외한 액체를 이용하는 매립지에 한정시키고 있다.

LandGEM에서 메탄 발생율 상수 k 및 메탄 발생 잠재력 L_0 는 기본값이 적용되든가 현장 실험 및 관측 결과에 의한 현장 특유의 값이 적용될 수 있다. 기본값은 매립지 가스의 수집 및 처리의 설계에 필요한 최대값을 제공해 주게 된다. 실질적인 메탄 가스 배출량을 추정하기 위해서는 미국 EPA 대기 오염물질 배출 인자 편람(Compilation of Air Pollutant Emission Factors)에 근거한 AP-42 기본값이 제공된다(U.S. EPA, 1997).

2) LandGEM 모델의 특성

LandGEM 모델은 매립지로부터 발생하는 매립지 가스를 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 매립지 가스량을 예측하게 된다. 혐기성 매립지에 매립된 폐기물은 일정한 시점이 되면 분해되어 메탄을 발생하게 된다. 수학적 모델링 기법을 이용하여 매립지 사용기간 중에 발생하는 매립지 가스의 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 (Mg)

t = 경과시간 (yr)

k = 1차반응 상수 (1/yr)

시간에 관해서 적분을 하면

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

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

단, M = 매립된 최초의 폐기물량 (Mg)

V = 매립 시작부터 시간 t 까지 발생된 메탄의 누적량 (m^3)

매립된 폐기물량과 메탄가스 발생량 사이에는 직접적 관련이 있다. 1년간 발생하는 메탄 발생량의 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 발생 잠재력 (m^3/Mg)

매립지 가스에서 메탄의 함량은 대략적으로 총부피의 50% 수준이다. 따라서 매립가스 총발생량은 다음과 같이 추정될 수 있다.

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

단, Q_T = 매립가스 총발생량 ($\text{m}^3/\text{Mg}\cdot\text{yr}$)

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

$$QT = \sum_{i=1}^n 2kL_0 M_i e^{-kti}$$

단, M_i = i 년도에 반입된 폐기물량 (Mg)

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 매립지 가스 발생기간을 조절하게 된다. k 값이 올라가면 매립지 가스 발생기간은 감소하게 된다. 예를 들어, k 값은 $0.02 \sim 0.285/\text{yr}$ 이면 발생 가능한 매립지 가스의 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(Debra *et al.*, 2005).

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 매립지 가스 발생량 추정을 보수적으로 매우 높게 추정하고 있는데 매립지 가스 발생상수 (k) = 0.050/yr, 메탄 잠재발생량 (L_0) = 170m³/Mg이다. AP-42 목록 기본값은 배출인자에 근거한 것으로 미국에 있는 매립지의 실질적 조사 자료에 근거하고 있는데 매립지 가스 발생상수 (k) = 0.04/yr, 메탄 잠재발생량 (L_0) = 100m³/Mg이다. 매립지 유기물의 안정화를 위한 목적이란 매립지 운영자는 현장 특유의 모델을 위한 투입변수를 확보하지 못한다면 목록 기본값을 사용해야 된다(Debra R., *et al.*, 2005).

목록 기본값에서 k 값이 0.04/yr이면 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 목록 기본값으로 L_0 는 100m³/Mg으로 적용하고 있다(Wisconsin, 2007).

4) 현장 특유의 k 및 L_0 값

LandGEM에서는 현장 특유의 k 및 L_0 값을 적용

할 수 있다. 침출수를 재순환시키거나 외부의 액상 폐기물을 받아들이는 매립지에는 현장 특유의 k 값이 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 k 값이 0.7까지 높아질 수 있다. 온대지방의 일부 매립지에서 실험한 결과에 의하면 k 값이 0.11 ~ 0.21/yr 범위이다(Reinhart *et al.*, 2005). 전형적인 사막지역 매립지는 k 값이 = 0.01/yr 수준이다(Alex Stege, 2006).

IV. LandGEM을 이용한 청주권 광역 생활폐기물 매립장 평가

1. 청주권 광역생활폐기물 매립장 개요

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

표 2. 2006년 청주시 및 청원군 매립 대상 생활폐기물 발생량

(단위 : 톤/일)

구 분	가 연 성							불 연 성				
	소계	음식물 채소류	종이류	나무류	고무 피혁류	플라 스틱류	기타	소계	연탄재	금속 초자류	토사류	기타
청주시	211.8	0.0	46.6	76.8	6.0	12.0	70.4	102.3	0.3	0.0	52.1	49.9
청원군	25.5	4.6	2.0	2.4	2.5	3.5	10.5	18.8	0.1	2.5	9.4	6.8
총 계	237.3	4.6	48.6	79.2	8.5	15.5	80.9	121.1	0.4	2.5	61.5	56.7

자료 : 환경부, 2007, 전국 폐기물 발생 및 처리 현황

표 2를 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 생활폐기물중에서 매립지 가스 생성에 활발하게 영향을 미치는 성분은 음식물 채소류, 종이류 및 나무류로서 매립폐기물의 40% 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 일일복토를 하고 있다. 발생된 매립지가스(LFG)는 2004년 1월부터 10kPa 정도의 흡입력으로 포집하여 LFG 발전소에 연료로 공급하여 처리하고 있다.

2. LandGEM을 이용한 청주권 광역생활폐기물 매립장 매립지 가스 발생량 평가

청주권 광역생활폐기물 매립장의 연도별 폐기물 반입량, 매립가스 포집량, LandGEM 예측량 및 전기 생산량은 다음의 표 2와 같다. 본 연구에서 LandGEM 모델에서 적용한 기본값은 온대지방에

서 습식매립지(bioreactor landfill)가 아닌 전통적 매립지(conventional landfill)에 일반적으로 적용되는 기본값인 매립지가스 발생상수(k) = 0.04/yr, 메탄 잠재발생량(L₀) = 100m³/Mg이다.

본 연구는 과도한 비용이 초래되는 현장조사를 하지 않고 매립지가스 발생량 예측에 관련된 그 동안의 연구결과를 종합해서 일반적으로 권장되고 있는 기본값을 채택하고 있다. 본 연구는 연구대상 매립지의 매립지가스 발생량을 개략적으로 예측하여 연구대상 매립지가 CDM 사업으로 인정받아 CER (Certified Emission Reduction) 대상으로 추진될 만한 가능성이 있는가를 알아보는 예비타당성 (preliminary assessment) 조사라고 볼 수 있다.

본 연구에서는 청주권 광역생활폐기물매립장의 현장특유의 매립지가스 발생상수(k), 메탄 잠재발생량(L₀)을 산정하지 않고 미국의 수많은 연구결과에 근거해서 결정한 U.S. EPA의 AP-42의 규정에 따른 매립지 가스 발생상수 (k) = 0.04/yr, 메탄 잠재발생량 (L₀) = 100m³/Mg으로 산정하였다. U.S. EPA의 AP-42의 기본값은 Clean Air Act 규정에 따라 New Source Performance Standards 및 Emission Guidelines를 적용하기 위하여 매립지 가스 최대 배출량을 반영하고 있는 매립지가스 발

표 3. 청주권 광역 생활폐기물 매립장의 매립가스 포집량 및 LandGEM 예측량

구 분	반입량 (ton) *자료	매립가스 포집량(m ³ /년) *자료	LandGEM의 매립가스 예측량 (m ³ /년)	전기 생산량(kWh/년) *자료
2001년	145,071	-	-	-
2002년	152,897	-	1,140,000	-
2003년	144,056	-	2,297,000	-
2004년	141,631	4,381,811	3,339,000	5,471,620
2005년	103,366	4,900,574	4,321,000	6,167,625
2006년	110,377	5,343,735	4,963,000	6,906,229
2007년	118,246	4,684,812	5,636,000	5,808,023
2008년	188,000 추정	현재 포집중	6,344,000	현재 생산중
2009년	사용종료 예정	향후 포집 예정	7,025,000	향후 생산 예상
2010년	사용종료	향후 포집 예정	6,749,000	향후 생산 예상
2011년	사용종료	향후 포집 예정	6,485,000	향후 생산 예상
2012년	사용종료	향후 포집 예정	6,230,000	향후 생산 예상
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

*자료 : 「청주시, 2007, 청주권 광역 생활폐기물 매립장 환경영향조사 보고서」 재정리

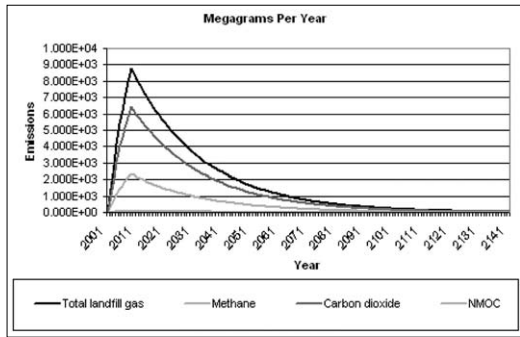


Fig. 1. Prediction of Generation of Landfill Gas at Cheongju Megalo Landfill by LandGEM

생상수(k) = 0.05/yr, 메탄 잠재발생량(L₀) = 170m³/ Mg 보다 실제 매립지 조건을 보다 근접하게 반영하고 있다(Debra R., et al., 2005).

청주권 광역 생활폐기물 매립장에 2005년부터 폐기물 반입량이 감소하는 것은 음식물쓰레기 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, 매립지의 복토 상태 및 포집 효율 등 매립지의 특성에 기인하는 것으로 분석된다. 특히 2005년부터 음식물쓰레기 직매립이 금지되어 메탄 잠재발생량(L₀) 및 매립지 가스 발생상수(k)가 감소하는데 기인하는 것으로 보인다.

표 4에서 보면 청주권 광역 생활폐기물 매립장에

서 회수되는 매립가스가 전형적 매립지의 매립가스 조성과 현격한 차이를 나타내고 있다. 전형적 매립지에서는 질소의 함량이 2-5% 정도인데 청주권 광역 생활폐기물 매립장의 매립가스는 질소의 함량이 2004년 19%, 2005년 22%에서 2006년에는 26%로 최고치를 나타냈다가 2007년에 10%로 감소하더니 2008년에는 0%로 분석되고 있다.

2004년에서 2007년 사이에 질소 함량이 비정상적으로 높은 이유는 복토과정에서 완전밀폐가 되지 못하여 매립지 상부로부터 공기가 일부 유입되고, 매립고가 높아짐에 따라 매립지 사면으로의 매립가스 누출도 상당할 것으로 분석된다. 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 보인다. 또한 매립가스 발전시설이 정기적 점검이나 정비를 위해 가동중지하는 경우에도 매립가스가 적절히 포집되지 못하고 있는 것으로 분석된다(청주시, 2007).

LandGEM에서 도출된 그림 1을 살펴보면 메탄의 발생량은 매립지 가스 발생량의 50%로 산정되어 있으며, 메탄가스의 발생량은 2009년을 최고 정점으로 급격히 하락하여 매립지 가스의 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 경

표 4. 청주권 광역 생활폐기물 매립장 가스의 조성 비교 (단위 : % 건조질량 기준)

구 분	* 전형적 매립지	2004년	2005년	2006년	2007년	2008년
CH ₄	45-60	50	52	53	50	50
CO ₂	40-60	30	25	20	39	49
N ₂	2-5	19	22	26	10	0
O ₂	0.1-1.0	1	1	1	1	1
NH ₃	0.1-1.0	-	-	-	-	-
Sulfides, Mercaptans	0-1.0	-	-	-	-	-
Trace Constituents	0.01-0.6	-	-	-	-	-

자료 : 사회건설 (청주권 광역 생활폐기물 매립장 매립지가스 발전 운영업체) 분석자료

주) * : George Tchobanoglous, et al., 1993, Integrated Solid Waste Management.

- : 미량성분은 분석자료 부재

제성은 LandGEM 예측에 의하면 매립지 사용종료 이후에도 10년 정도 유지될 것으로 예측된다. 메탄 가스 발생이 감소하여 더 이상의 전력 생산이 경제성이 없게 될 때에는 메탄가스를 단순소각(flare)시켜 지구 온난화 기여도를 낮추어야 한다.

청주권 광역 생활폐기물 매립장에서 메탄가스를 회수하여 생산된 전기는 한국전력에 판매하고 있는데 2006년에는 553백만원의 매출액을 기록하였다. 메탄 가스를 발전용 연료로 이용하여 지구온난화 지수가 이산화탄소보다도 23배가 높은 메탄가스의 처리에도 기여하면서 전력도 생산하는 CDM(Clean Development Mechanism) 등록 조건이 되고 있다. 그러나 청주권 광역 생활폐기물 매립장은 UNFCCC에 등록을 못하여 CER(Certified Emission Reduction)로 활용을 못하고 있다.

V. 결론

지구 온난화로 인한 기후변화를 방지하기 위하여 저탄소 사회로의 전환을 모색하고 있다. 매립지 가스의 주성분인 메탄은 지구온난화 기여도가 높은 물질이기 때문에 매립지 가스의 발생량을 예측하여 이를 적절히 포집하여 처리하여야 한다. 본 연구에서는 청주권 광역생활폐기물 매립장의 사례로 하여 실측자료와 미국 EPA에서 개발한 LandGEM 모델의 예측자료를 비교평가하였다.

LandGEM 모델에서 적용한 값은 온대지방에 일반적으로 적용되는 값인 매립지 가스 발생상수(k) = 0.04/yr, 잠재적 메탄 발생량(L_0) = 100m³/Mg 이다. 실측 자료보다 LandGEM의 예측량이 2004년에서 2006년까지는 다소 적게 산정되고 2007년에는 다소 많이 산정되는 것은 모델에 적용한 인자와 현장 특유의 조건과 차이가 나고, 매립지의 설계와 운영방식 그리고 폐기물 조성의 변동에 기인하는 것으로 보인다. 특히 매립지의 복토 상태 및 포집 효율에 큰 영향을 받는 것으로 분석된다. 특히 2005년부터 음식물쓰레기 직매립이 금지되어 메탄 잠재발생량(L_0) 및 매립지 가스 발생상수(k)가 감소

하는데 기인하는 것으로 보인다.

매립지 가스를 회수하여 연료로 이용하면 UNFCCC의 CDM 사업으로 인정받을 수 있는 조건이 된다. 본 연구결과에서는 LandGEM의 예측치가 실측치와 차이가 다소 발생하지만 CDM사업에 등록하기 위한 예비평가(feasibility assessment) 단계에서 선별적인 예측 모델로 비교적 간편하게 활용할 수 있기 때문에 LandGEM 모델의 이용은 의미가 있다.

참고문헌

- 이상구, 2006, Monte carlo Simulation 기법을 이용한 폐기물매립지 온실가스 배출량 불확도 분석에 관한 연구, 부경대학교 박사학위 논문.
- 조한상 · 김재영, 2008, IPCC 2000 Reference 모델을 이용한 메탄잠재발생량 평가방법에 따른 가상 매립지로부터의 온실가스 배출량 비교, 2008년 한국폐기물학회 춘계학술연구회발표 논문집.
- 청주시, 2007, 청주권 광역 생활폐기물 매립장 환경영향조사 보고서.
- 환경부, 2007, 전국 폐기물 발생 및 처리현황.
- Alex Stege, 2006, Modelling Landfill Biogas Generation for Different Countries, Landfill Methane to Markets Workshop.
- Barlaz, M. A., Ham, R. K., and Schaefer, D. M., 1990, Methane Production from Municipal Refuse, Critical Reviews in Environmental Control, 19(6).
- Buswell, A. M. *et al.*, 1952, Mechanism of Methane Production, Industrial and Engineering Chemistry, 44.
- Debra R. Reinhart and Ayman A. Faour, 2005, First-Order Kinetic Gas Generation Model Parameters for Wet Landfills, U.S. EPA.
- DeWalle, F. B., Chain E. S. K., and Hammerberg,

- E., 1978, Gas Production from Solid Waste in Landfills, *Journal of Environmental Engineering*, 104.
- El-Fadel, M, Shazabak, S., and Saliby, E., 1999, Comparative Assessment of Settlement Models for Municipal Solid Waste Landfill Applications, *Waste Management Research*, 17.
- EMCON Associates, 1980, Methane Generation and Recovery from Landfills, Ann Arbor Science Publishers.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2001, Third Assessment Report.
- Hartz, K. E., Klink, R. E., and Ham, R. K., 1982, Temperature Effects : Methane Generation from Landfill Samples, *Journal of Environmental Engineering*, 108.
- George Tchobanoglous, *et al.*, 1993, Integrated Solid Waste Management, McGRAW-Hill.
- Kim, J. and Pohland, F., 2003, Process Enhancement in Anaerobic Bioreactor Landfills, *Waster Science and Technology*, 48(4).
- Mehanta, R. and Barlaz, M., 2002, Refuse Decomposition in the Presence and Absence of Leachate Recirculation, *Journal of Environmental Engineering*, 128(3).
- Owens J. M. and Chynoweth D. P., 1992, Biochemical Methane Potential of MSW Components, International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste.
- Paulina Jaramillo, 2005, Landfill-Gas-to-Energy Projects : Analysis of Net Private and Social Benefits, *Environmental Science and Technology*, 39(19).
- Reinhart , D. and Townsend, T., 1998, Landfill Bioreactor Design and Operation, Lewis Publishing.
- Rinav Metha, Morton A. Barlaz, and Ramin Yazdani, 2002, Refuse Decomposition in the Presence and Absence of Leachate Recirculation, *Journal of Environmental Engineering*, 128(3).
- Tchobanoglous, G., Theisen, H. and Vigil, S. A., 1993, Integrated Solid Waste Management, McGraw-Hill.
- The Solid Waste Association of North America, 1998.
- Townsend, T. G., Miller, W. T., and Lee, H. J., 1996, Acceleration of Landfill Stabilization Using Leachate Recycle, *Journal of Environmental Engineering*, 122(4).
- U.S. EPA, 1997, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Report Number AP-42.
- U.S. EPA, 1998, AP 42 Emission Factors : Municipal Solid Waste Landfills.
- U.S. EPA, 2004, Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks.
- Wisconsin Administration Code NR 514.07(9), 2007, Guidance for Landfill Organic Stability Plans.
- <http://www.epa.gov/catc/dir1/landgem-v302.xls>