

매립가스 발생량에 따른 자원화 가능성 평가

이해승^{1*}

¹강원도립대학 소방환경방재과

Evaluation on Resource Recovery Potential by Landfill Gas Production

Hae-Seung Lee^{1*}

¹Department of Fire-Environmental & Gangwon Provincial College

요 약 본 연구는 신재생에너지 활용을 위하여 강원도의 B 지자체를 대상으로 폐기물 발생특성에 따른 매립가스 발생량 및 자원화 가능성에 대하여 연구하였다.

B 지자체의 생활폐기물 평균 겉보기 밀도는 144 kg/m³로, 가스 물질 및 연료화 가능성 물질인 가연성 평균 폐기물 조성비는 종이류 36.0 %, 비닐·플라스틱류 21.6 %, 음식물류 19.7 %로 조사되었다. 발열량 분석결과, 고위발열량(습윤) 3,471 kcal/kg, 저위발열량(습윤) 2,941 kcal/kg 로 측정되었으며, 특히 음식물류 폐기물의 매립지 직매립이 금지된 후에는 발열량이 높은 종이류와 비닐·플라스틱의 비율이 증가하여 발열량이 증가한 것으로 나타났다. 매립지에서 발생하는 메탄가스는 2021년(2,505.7 CH₄ ton/year)을 정점으로 점차 감소하는 것으로 예측되었는데, 특히 RDF(Refuse Derived Fuel) 제조시설이 설치되면 2013년(1,956.9 CH₄ ton/year)을 정점으로 감소되는 것으로 예측되었다. B 지자체의 매립지에서 발생하는 매립가스(Land Fill Gas; LFG) 추정량은 9.92 m³/min 로 예측되어 타 지자체에서 발생하는 매립가스 추정량(10.11 m³/min)과 유사하게 조사되었다.

Abstract This study was performed to the municipal waste generation amounts and characteristics for B city in Gangwon province, predicted the methane gas generation rate emitted from landfill, and analyzed the possibility of energy recovery to RDF(Refuse Derived Fuel) using combustible waste.

The study results showed that the average bulk density of municipal waste for B city was 144.0 kg/m³, and the average ratios of combustible waste were 36.0 % of paper, 21.6 % of vinyl, and 19.7 % of food waste, respectively. In the experiment for heating value, high and low heating value(moisture) was measured to 3,471 kcal/kg and 2,941 kcal/kg, respectively. After the prohibition of burying of food waste in landfill, the heating value of municipal waste was dramatically increased due to increase of the ratio of paper, vinyl, and plastic waste. The prediction results of methane gas generation rate emitted from landfill showed that the gas generation rate is increasing to 2,505.7 CH₄ ton/year in 2021. After then, the rate is decreasing gradually. When the RDF facility is installed, the rate is decreasing after peaking at 1,956.9 CH₄ ton/year in 2013. The generation rate of LFG emitted from waste landfill of B city was analyzed to 9.92 m³/min, similar to 10.11 m³/min for other city.

Key Words : Municipal solid wastes(MSWs), Landfill Gas(LFG), Greenhouse Gas

1. 서론

저탄소 녹색성장에 따른 화석연료를 대체할 수 있는 연료의 필요성과 온실가스 감축을 위하여 단순히 매립되

던 폐기물을 에너지로 전환하는 새로운 처리방식이 현재 적극적으로 추진되고 있고 있다. 따라서 정부는 수도권 매립지를 포함한 전국 권역별 에너지 타운을 건설하여 2020년까지 발생 폐기물의 대부분을 에너지화 시설에서

*교신저자 : 이해승(haeseun@gw.ac.kr)

접수일 11년 08월 05일 수정일 (1차 11년 09월 19일, 2차 11년 09월 29일)

재제확정일 11년 10월 06일

처리하고자 한다[1].

일반적으로 폐기물의 최종 처분단계인 매립지에서는 유기성 폐기물로부터 다량의 매립가스(Landfill Gas; LFG)가 발생하는데 주요 발생가스로는 메탄, 이산화탄소, 암모니아, 수소, 황화수소 등을 들 수 있다. 이러한 생분해성 유기물질의 혐기성 분해과정에서 발생하는 가스는 현재 대부분 포집과정을 거쳐 대기 중으로 배출되고 있으나, 발생된 LFG의 주성분인 메탄가스의 온난화지수는 이산화탄소의 21배로 지구온난화의 주요 원인으로 지적되고 있다[2,3]. 따라서 매립지에서 발생하는 메탄가스는 온실가스 감축을 위한 현 정부의 정책과 전략에 위반되고 있는 실정이다. 현재 국내 생활폐기물 매립지 가운데 대규모 매립지는 대부분 매립가스 자원화시설을 설치하여 운영 중에 있다. 매립가스 자원화시설은 발전시설과 가스공급시설로 구분할 수 있는데, 발전시설은 전국에 12개 시설에서 70.8 MW의 시설용량을 갖추고 있으며, 가스 공급시설은 전국 4개의 시설에 632 Nm³/min의 가스공급을 이행하고 있는 것으로 조사되었다. LFG 발생량은 매립폐기물 성상 및 양에 의해 결정되는데 대도시 권역에서는 대량의 매립가스가 발생되어 경제적 측면에서도 상당한 이점이 있을 것으로 판단된다. 국외의 매립가스 자원화 시설의 운영사례를 살펴보면, 미국은 EPA 내에 LMOP (Landfill Methane Outreach Program)을 설립하여 주정부와 에너지 이용자 및 공급자 협약에 의한 사업을 지원하고 있으며, LMOP를 통해 약 450개 자원화시설을 운영하고 있고, EU는 매립가스 자원화설비를 설치하도록 관련지침에서 규정하고 있다. 그러나 우리나라의 경우 매립가스 자원화 관련제도가 미비하고 각 지자체의 재정자립도가 낮아 매립가스의 에너지화에 많은 문제점이 드러나고 있다. 또한 대규모 매립지에서 가스 발생량을 예측하기 위한 기초자료가 부족하기 때문에 자원화시설에 대한 제도정비 및 자료수집이 필요한 실정이다[4].

본 연구에서는 매립지에서 발생하는 폐기물 성상자료를 바탕으로 LFG 발생량을 산정하고 자원화 가능성에 대한 연구를 통해 매립가스 자원화사업의 기초자료를 제공하고자 수행되었다.

2. 조사 방법

2.1 조사지역

매립가스 자원화 가능성 평가를 위해, 본 연구에서는 강원도 B 지자체의 생활폐기물의 배출 특성과 LFG 발생량을 산정하기 위하여 배출원별 폐기물 발생특성과 물리

화학적 특성을 조사하였다. 생활폐기물 발생특성은 주택, 시장상가, 농촌, 공공, 업무 및 상업지역으로 구분하였다. 본 연구대상 지자체의 매립지 현황은 총 부지면적 241,000m², 매립면적과 용량은 각각 108,8340m², 22,060,000m³로 조사되었다. 생활폐기물의 배출특성은 각 지역을 직접 방문하여 종량제 봉투를 수거하여 폐기물 부피, 겉보기 밀도, 발생원단위 등을 조사하였다.

2.2 분석방법

폐기물의 물리적 성상은 가연성과 비가연성 물질로 구분하고, 물리적 조성은 가연성 물질의 경우 음식물류, 종이류, 섬유류, 비닐·플라스틱류, 목재류, 고무·피혁류로 구분하였으며, 불연성물질은 유라·도자기류, 철금속, 비철금속, 기타로 분류하고 가능한 기타 성분으로 분류되는 것이 없도록 세밀한 분류 작업을 실시하였다. 폐기물의 겉보기 밀도는 현장에서 일정한 부피의 플라스틱 용기에 시료를 가득 넣고 30 cm 높이의 위치에서 3회 낙하시키고, 감소된 부피만큼 시료를 추가하여 반복한 후 용기부피에서 더 이상의 감소가 없을 때까지 반복 수행하여 단위 부피당 중량(kg/m³)으로 산정하였다. 발열량은 1261 ISOPERIBOL BOMB CALORIMETER를 이용하여 건조 시료를 분쇄한 후 펠릿(pellet) 형태로 만들어 측정하였다. 그리고 펠릿 형태로 만들기 어렵거나 시험 중 산소의 분사로 인해 펠릿 상태가 깨질 우려가 있는 시료에 대해서는 열량계용 tissue paper에 싸서 건조고위발열량을 측정하였다. 또한, 저위발열량은 건조고위발열량으로부터 수증기의 응축잠열을 뺀 값과 폐기물 내 수분을 증발시키는데 필요한 열량을 뺀 값으로 계산하였다.

2.3 LFG 산정 방법

매립가스 발생량 예측은 화학양론 산정법, 유기물이 미생물의 분해에 의해 발생하는 메탄발생량을 평가하는 BMP(Biochemical Methane Potential) 기법에서 확률적 접근법인 Monte Carlo Simulation 기법 및 First-Order Decay 모델을 개선한 IPCC 2000 Reference 모델 등의 연구로 발전되어져 왔다[5]. 본 연구에서는 IPCC 가이드라인의 방법을 준용하면서 IPCC Default Method와 IPCC Reference Method를 통합한 IPCC Good Practice Method와 매립지가스를 정량화시키기 위하여 EPA에서 1996년 개발한 LandGEM Model(Landfill Air Emissions Estimation Model)을 이용하였다[5,6].

2.3.1 IPCC Good Practice Method

IPCC Good Practice Method는 Good practice guidance

and uncertainty management in national greenhouse gas Inventories에서 제시하고 있는 방법으로 시간에 따라 폐기물이 동화되는 실제 패턴을 반영한 메탄 배출량 프로파일을 생성하여 현실에 맞는 배출량을 제시하며, 산정식은 식 (1)과 같다. 식 (1)에서와 같이, 기본적으로 대상기간에 대한 평균적인 추정인자를 사용하는 IPCC Reference Method와는 달리 DOC_F(Fraction of Degradable Organic Carbon which Decomposes)를 제외한 모든 인자에 대하여 각 해당년도의 값을 적용함으로써 메탄발생량을 구하고 이를 합산하여 평가 대상년도의 값을 산출하도록 되어 있다. IPCC Tier 2 model은 매립가스 배출량 산정시 연구결과가 부족한 경우에 메탄발생량의 시간적 변동을 나타내기 위하여 사용될 수 있으나 추정 결과에 있어서는 실제 배출량에 비해 과대평가를 할 수 있다[6].

$$t\text{년도 } CH_4 \text{ 발생량(Gg/yr)} = \sum_x \{ (A \times k \times MSW_T(x) \times MSW_F(x) \times Lo(x)) \times e^{-k(t-x)} \} = [t\text{년도 } CH_4 \text{ 발생량} - R(t)] \times (1-OX) \quad (1)$$

where,

t : 대상년도(year)

x : 자료입력 해당년도(year)

A = (1-e^{-k})/k, 합계보정을 위한 표준화 인자

k = 메탄 발생속도상수(year⁻¹)

MSW_T(x) = x년도 도시고형폐기물 총발생량(Gg/year)

MSW_F(x) = x년도 도시고형폐기물 매립처분 비율(%)

Lo(x) = 최대메탄발생량(Gg CH₄/Gg 폐기물)

(MCF(x)×DOC(x)×DOC_F×F×16/12)

MCF(x) = x년도 메탄보정계수(%)

DOC(x) = x년도 폐기물중 분해가능한 유기탄소함량 (Gg C/Gg 폐기물)

DOC_F =분해되는 DOC 비율(%)

F = 매립가스 중 메탄의 부피비(%)

16/12 : 탄소를 메탄으로 전환하기 위한 계수

R(t) : t년도 CH₄ 회수량(Gg/year)

OX = 메탄산화인자(%)

2.3.2 LandGEM Model

LandGEM Model은 미국 EPA Control Technology Center(CTC)에서 Scholl Canyon model을 기초로 개발한 모델로서, 개별 매립지의 보유 데이터 및 default value를 이용하여 매립지로부터 배출되는 메탄, 이산화탄소, 비메탄계 유기화합물류(NMOC; non-methane organic carbon) 및 47개의 선정된 개별 대기오염 물질의 양을 평가한다.

기본값은 신규 또는 기존 매립지(250 만톤 또는 250 만m³ 폐기물 매립 규모 이상)에 대한 배출량의 법적 기준에 따른 CAA default와 미국 EPA AP-42(Compilation of Air Pollutant Emission Factors)의 배출계수에 기초한 inventory default를 사용한다. 주요 추정 인자는 메탄발생속도상수(k)와 잠재메탄발생량(Lo)이며 식 (2)와 같이 0.1년 단위로 계산한다[4]. k값은 폐기물의 수분, 폐기물을 분해하여 메탄과 이산화탄소를 생성하는 미생물에 대한 영양물질의 이용도, 폐기물의 pH, 폐기물층 온도에 의해 결정되며 k 값이 클수록 메탄발생속도가 증가하여 분해가 빠르게 종결된다. Lo는 폐기물이 분해되는 정도에 따라 차이가 있으므로 매립되는 폐기물의 종류와 그 구성에 따라 결정되며, 폐기물의 셀룰로스 함량이 높을수록 Lo 값이 커지는 것으로 알려져 있다. LandGEM에서는 매립가스가 메탄 50 %, 이산화탄소 50 %, 미량의 비메탄계 유기화합물과 기타 대기오염 물질로 구성되어 있는 것으로 가정하고, 메탄 농도를 50 %의 고정된 상태로 유지한다[5,6].

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_j} \quad (2)$$

where,

QCH₄ = 해당년도의 연간 메탄발생량(m³/year)

n = (해당년도 - 폐기물 매립 초기년도)

j = 0.1년의 시간간격

i = 1년의 시간간격

k = 메탄발생속도상수(year⁻¹)

Lo = 메탄잠재발생량(m³/Mg)

Mi = i년도에 반입된 폐기물 양(Mg)

t_{ij} = i번째 년도에 매립된 폐기물량 Mi의 j번째 시간 (year)

3. 결과

3.1 생활 폐기물 특성

연구대상 지역에서 수거한 폐기물의 겉보기 밀도는 전체적으로 129~157 kg/m³의 범위를 보였으며, 주거지역과 시장상가에서 발생하는 폐기물의 겉보기 밀도가 다소 높은 것으로 조사되었는데, 이는 주거지역 및 시장상가의 경우 수분함량이 높은 음식물의 발생량이 많기 때문이다. 발생원별 폐기물 조성비를 살펴보면 가연성 물질은 종이류가 36.0 %, 비닐·플라스틱류 21.6 %, 음식물류 19.7 % 순으로 조사되었으며, 고무, 피혁류가 3.5 %, 목재류가 2.0 %로 가장 낮은 것으로 조사되었다. 생활폐기물 중 음

[표 1] 생활폐기물의 물리적 조성
[Table 1] The physical characteristics of municipal solid waste

형태	중량 (kg)	겉보기 밀도 (kg/m ³)	조성												
			구분	가연성							불연성				
				음식물	종이류	섬유류	비닐, 플라스틱	목재류	고무, 피혁류	소계	유리 도자기류	철금속	비철 금속	기타	소계
공동 주택	13.7	157	중량	3.10	4.00	2.10	3.46	0.37	0.20	13.23	0.30	0.07	0.10	0.00	0.47
			비율	22.6%	29.2%	15.3%	25.3%	2.7%	1.5%	96.6%	2.2%	0.5%	0.7%	0.0%	3.4%
단독 및 연립	12.3	150	중량	1.08	5.40	1.76	2.97	0.18	0.15	11.54	0.50	0.08	0.14	0.00	0.72
			비율	8.8%	44.0%	14.4%	24.2%	1.5%	1.2%	94.1%	4.1%	0.7%	1.1%	0.0%	5.9%
시장 상가	13.3	154	중량	5.56	2.05	1.68	1.08	0.29	1.96	12.62	0.43	0.08	0.13	0.00	0.64
			비율	41.9%	15.5%	12.7%	8.1%	2.2%	14.8%	95.2%	3.2%	0.6%	1.0%	0.0%	4.8%
농촌 지역	10.7	129	중량	3.47	2.14	1.20	2.48	0.35	0.10	9.74	0.54	0.27	0.15	0.00	0.96
			비율	32.4%	20.0%	11.2%	23.2%	3.3%	0.9%	91.0%	5.0%	2.5%	1.4%	0.0%	9.0%
공공 지역	11.3	140	중량	0.90	5.82	0.21	3.15	0.23	0.30	10.61	0.34	0.10	0.24	0.00	0.68
			비율	8.0%	51.6%	1.9%	27.9%	2.0%	2.7%	94.0%	3.0%	0.9%	2.1%	0.0%	6.0%
업무 지역	11.4	144	중량	1.30	6.50	0.26	1.95	0.14	0.28	10.43	0.47	0.12	0.35	0.00	0.94
			비율	11.4%	57.2%	2.3%	17.2%	1.2%	2.5%	91.7%	4.1%	1.1%	3.1%	0.0%	8.3%
상업 지역	11.8	146	중량	2.30	3.27	1.40	2.57	0.15	0.35	10.04	0.69	0.34	0.70	0.00	1.73
			비율	19.5%	27.8%	11.9%	21.8%	1.3%	3.0%	85.3%	5.9%	2.9%	5.9%	0.0%	14.7%
평균	11.8	144	중량	2.33	4.26	1.10	2.56	0.23	0.42	10.89	0.48	0.17	0.30	0.00	0.95
			비율	19.7%	36.0%	9.2%	21.6%	2.0%	3.5%	92.0%	4.1%	1.4%	2.5%	0.0%	8.0%

식물류의 비율은 분리수거로 인하여 과거에 비해 조성 비율이 낮게 조사되었는데 이해승 등[7]은 봄철 G 지자체의 음식물류 폐기물의 비율을 단독과 공동 주택의 음식물류의 비율을 각각 29.34, 28.98 % 라고 보고하였는데 본 연구에서는 단독 및 공동주택의 음식물류 비율이 8.8, 22.6 %로 낮게 조사되었다. 또한 윤석표 등[8]은 음식물류 폐기물의 직매립 금지로 생활폐기물 중의 음식물류의 함량은 2004년도 대비 중량기준으로 약 12 % 감소하였으며, 겉보기 밀도도 약 25 % 감소하였다고 보고하고 있다. 현재 이러한 음식물류 폐기물의 감소로 본 연구에서는 상대적으로 종이류와 비닐-플라스틱류의 조성 비율이 증가한 것으로 조사되었다.

연구 지역의 발열량 분석결과, 건조고위발열량의 경우 음식물류는 1,305 kcal/kg, 종이류는 3,009 kcal/kg의 범위를 보이는 것으로 조사되었으며, 비닐-플라스틱류의 경우 8,550 kcal/kg로 조사되었다. 전체적으로 건조 고위발열량의 경우 비닐-플라스틱류의 발열량이 가장 높고, 음식물류 폐기물의 발열량이 가장 낮은 것으로 조사되었다. 발생원별 습윤 고위발열량은 시장상가와 농촌지역이 낮게 나타났으며, 단독 및 연립주택과 공공지역이 높은 것으로 조사되었다. 한편, 소각로 설계시 기준이 되는 습윤 저위발열량은 습윤 고위발열량을 습윤 저위발열량으로 환산하여 산정하였으며, 시장 상가지역이 1,485 kcal/kg으로 가장 낮고, 단독 및 연립주택 지역이 3,541 kcal/kg으로

가장 높은 것으로 나타났다. 이해승 등[7]은 2005년도에 본 연구 지자체의 봄철 습윤 저위발열량을 배출원별로 1,215~2,541 kcal/kg로 보고하였는데 본 연구에서의 습윤 저위발열량은 1,485~3,446 kcal/kg으로 조사되었다. 발열량의 증가는 음식물류 폐기물의 분리수거로 인하여 상대적으로 발열량이 높은 종이류와 비닐-플라스틱류의 비율이 증가하였기 때문이다. 따라서 향후 폐기물 소각시설이나 재활용 시설들을 설치할 경우 음식물류 폐기물 분리 전-후의 발열량 증가 요인을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

3.2 음식물류 폐기물 성상

연구대상 지자체에서 발생하는 음식물류 폐기물의 안정적인 처리와 처리하는 과정에서 발생하는 바이오가스를 에너지화하기 위한 기초자료를 제공하기 위하여, 반입되는 음식물류 폐기물의 성상 및 특성을 파악하였다. 시료채취는 전용수거통의 음식물류를 채취하여 혼합하였고, 채취 후 밀봉하여 수분손실을 최소화한 후 실험실에서 물리적 조성, 발열량 등의 분석을 수행하였다. 연구대상 지자체의 음식물류 폐기물의 겉보기 밀도는 803~952 kg/m³으로 조사되었으며 시장상가 952 kg/m³, 상업지역이 933 kg/m³로 가장 높았으며 업무지역이 803kg/m³로 가장 낮은 것으로 조사되었다. 물리적 조성 분석결과, 음

[표 2] 음식물류 폐기물 밀도·물리적 조성
[Table 2] The physical characteristics of food waste

형태	중량 (kg)	겉보기 밀도 (kg/m ³)	구분	조성													
				가연성						불연성							
				곡류	채소류	과일류	어육류	기타	소계	비닐류	유리류	금속류	플라스틱류	석재류	뼈류	기타	소계
공동 주택	12.4	856	중량	3.53	5.26	1.75	0.89	0.15	11.58	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00	0.37	0.35	0.80
			비율	28.5%	42.5%	14.1%	7.2%	1.2%	93.5%	0.4%	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	3.0%	2.8%	6.5%
단독 및 연립	14.9	906	중량	3.98	4.59	2.42	1.43	0.18	12.60	0.03	0.00	0.00	0.13	0.00	0.39	0.24	0.79
			비율	29.7%	34.3%	18.1%	10.7%	1.3%	94.1%	0.2%	0.0%	0.0%	1.0%	0.0%	2.9%	1.8%	5.9%
시장 상가	12.0	952	중량	4.25	6.42	1.58	1.32	0.13	13.70	0.15	0.00	0.00	0.17	0.00	0.38	0.45	1.15
			비율	28.6%	43.2%	10.6%	8.9%	0.9%	92.3%	1.0%	0.0%	0.0%	1.1%	0.0%	2.6%	3.0%	7.7%
농촌 지역	13.5	887	중량	5.63	4.65	1.05	0.89	0.21	12.43	0.08	0.00	0.00	0.02	0.00	0.17	0.20	0.47
			비율	43.6%	36.0%	8.1%	6.9%	1.6%	96.4%	0.6%	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	1.3%	1.6%	3.6%
공공 지역	12.4	826	중량	4.25	3.41	2.74	0.87	0.16	11.43	0.15	0.00	0.00	0.05	0.00	0.21	0.20	0.61
			비율	35.3%	28.3%	22.8%	7.2%	1.3%	94.9%	1.2%	0.0%	0.0%	0.4%	0.0%	1.7%	1.7%	5.1%
업무 지역	11.4	803	중량	4.95	3.58	1.84	0.41	0.21	10.99	0.12	0.00	0.00	0.06	0.00	0.18	0.08	0.44
			비율	43.3%	31.3%	16.1%	3.6%	1.8%	96.2%	1.0%	0.0%	0.0%	0.5%	0.0%	1.6%	0.7%	3.8%
상업 지역	13.5	933	중량	5.73	4.09	1.96	0.69	0.36	12.83	0.04	0.00	0.00	0.18	0.00	0.18	0.24	0.64
			비율	42.5%	30.4%	14.6%	5.1%	2.7%	95.2%	0.3%	0.0%	0.0%	1.3%	0.0%	1.3%	1.8%	4.8%
평균	12.8	877	중량	4.76	4.36	1.95	0.87	0.21	12.15	0.09	0.00	0.00	0.09	0.00	0.24	0.23	0.66
			비율	37.1%	34.0%	15.2%	6.8%	1.7%	94.8%	0.7%	0.0%	0.0%	0.7%	0.0%	1.9%	1.8%	5.2%

식물류 폐기물의 전체 평균에서 곡류가 37.14 %, 채소류가 34.04 %로 높은 비율을 차지하였으며, 주거지역과 시장상가는 채소류가, 그 외 지역은 곡류가 높은 비율을 차지하는 것으로 조사되었다. Bomb식 단열 열량계를 이용하여 음식물류 폐기물의 발열량을 측정된 결과, 건조고위, 습윤고위, 습윤저위 발열량 평균인 각 4,593.1, 915.5, 116.3 kcal/kg으로 측정되었는데, 본 연구의 건조고위발열량 값은 국립환경연구원에서 보고한 계절별 건조고위 발열량 평균값 (4,159-4,994 kcal/kg)과 유사하였다[9]. 삼성분의 경우, 수분 80.1 %, 가연분 17.6 %, 회분 2.3 %로 수분 함량이 높게 조사되었는데 이는 국립환경연구원에서 보고한 일반적인 음식물류 폐기물의 함수율 범위(70.0~80.0 %)와 유사한 것으로 조사되었다[9].

3.3 매립가스 발생량 산정

연구대상 지자체 매립지에서 발생하는 메탄가스를 산정하기 위하여 표 3에 제시한 바와 같이 폐기물 발생 및 처리현황자료를 기준으로 LFG 성분 중 메탄가스 발생량 산정에 필요한 년도별 매립량 및 폐기물 성상 등을 예측하였다[10]. LFG 발생의 가장 영향을 미치는 요소인 음식물류 폐기물은 2005년 이후 직매립 금지로 인하여 발생량 모두 재활용되는 것으로 조사되었다. 현재 B 지자체 매립지에서 발생되고 있는 메탄가스 성상은 현재 매립 폐기물의 분해가 활발하게 발생하는 지점의 메탄 함량은 36.2~57.8 %로 조사되었으며, 그 외 지점은 20 %

내외로 조사되었다. 본 연구 대상지역의 B 지자체는 향후 RDF 제조시설을 계획하고 있어 이에 대한 가동 예정년도를 기준으로 RDF 제조시설 가동 유무에 따른 메탄가스 발생량을 산정하였다.

RDF 제조시설이 설치된 경우 메탄가스 발생량을 산정하기 위하여, 현재 매립지의 2008년까지의 매립량인 615,353 ton을 기준으로 RDF 제조시설 가동 예정년도인 2014년까지의 년도별 매립량 71,449 ton/year을 산정하였고, 폐기물 성상은 2005년 음식물 반입이 금지된 이후로 음식물의 반입은 없고, 그 외 성분은 2000~2008년 평균값을 적용하였다. 연도별 매립량은 매립지의 일반적인 다짐밀도 0.6~0.8 ton/m³의 평균값인 0.7 ton/m³을 적용하여 매립용량을 구한 후 2014년까지의 평균값을 적용하였다. RDF 제조시설 가동 예정년도인 2014년 이후는 불연분의 매립량은 기존과 같은 매립량을 적용하였고, 가연분의 경우 65 %가 RDF 제조시설로 반입되는 것을 기준으로 이때 매립은 2030년까지 매립되는 것으로 산정되었다. RDF 제조시설 미 설치시, RDF 제조시설 가동 예정년도인 2014년까지의 년도별 매립량과 폐기물 성상을 매립지 사용종료 시점인 2021년까지 평균값을 일괄 적용하였다. 메탄가스 발생량은 표 4에 제시한 바와 같이 RDF 제조 시설 설치시와 미 설치시로 구분하여 산정하였으며, 메탄가스를 활용한 발전용량 계산 역시 RDF 제조시설 유무에 따라 산정하였다.

[표 3] 가연성 폐기물 성상별 발생 및 처리현황
 [Table 3] Present state of combustible-wastes treatment

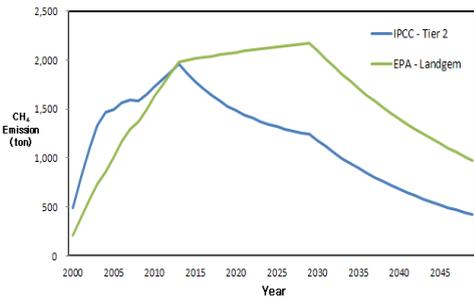
(단위 : ton/day)

구 분	발생량 및 처리현황		총 계	가 연 성						
				소계	음식물 채소류	종이류	나무류	고무 피혁류	플라 스틱류	기타
2000	발생량		256.8	206.8	62.1	32.7	19.0	4.2	24.4	64.4
	처리 방법	매 립	224.1	174.1	42.1	25.6	14.0	4.2	23.8	64.4
		소 각	8.5	8.5	0.0	6.5	2.0	0.0	0.0	0.0
		재활용	24.2	24.2	20.0	0.6	3.0	0.0	0.6	0.0
2001	발생량		241.5	191.0	59.0	29.5	19.0	4.5	27.5	51.5
	처리 방법	매 립	198.7	148.2	35.2	21.0	11.0	4.5	25.0	51.5
		소 각	9.5	9.5	0.0	6.5	3.0	0.0	0.0	0.0
		재활용	33.3	33.3	23.8	2.0	5.0	0.0	2.5	0.0
2002	발생량		240.0	190.0	59.5	23.3	19.6	4.5	26.0	57.1
	처리 방법	매 립	203.2	153.2	35.3	18.9	13.4	4.5	24.0	57.1
		소 각	0.6	0.6	0.0	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0
		재활용	36.2	36.2	24.2	4.0	6.0	0.0	2.0	0.0
2003	발생량		233.0	184.0	59.0	22.6	21.2	5.0	28.1	48.1
	처리 방법	매 립	194.0	145.0	37.5	18.0	12.5	5.0	24.0	48.0
		소 각	2.1	2.1	0.0	0.6	1.3	0.0	0.1	0.1
		재활용	36.9	36.9	21.5	4.0	7.4	0.0	4.0	0.0
2004	발생량		193.9	152.0	53.5	20.5	16.0	4.6	24.1	33.3
	처리 방법	매 립	160.2	118.3	31.3	17.1	11.4	4.6	20.8	33.1
		소 각	1.9	1.9	0.0	0.4	1.2	0.0	0.1	0.2
		재활용	31.8	31.8	22.2	3.0	3.4	0.0	3.2	0.0
2005	발생량		247.7	191.2	56.0	23.6	21.2	6.1	27.2	57.1
	처리 방법	매 립	191.3	134.8	0.0	23.5	21.1	6.1	27.1	57.0
		소 각	0.4	0.4	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1
		재활용	56.0	56.0	56.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2006	발생량		251.5	200.8	18	26.6	70.7	5.3	24.4	55.8
	처리 방법	매 립	204.8	154.1	0	26.4	42.5	5.3	24.3	55.6
		소 각	0.7	0.7	0	0.2	0.2	0	0.1	0.2
		재활용	46.0	46.0	18	0	28	0	0	0
2007	발생량		208.2	151.1	18.9	23.4	31.8	5.3	23.5	48.2
	처리 방법	매립	183.6	129.6	0.0	22.1	31.5	5.0	23.0	48.0
		소각	0.7	0.7	0.0	0.1	0.3	0.1	0.0	0.2
		재활용	23.9	20.8	18.9	1.2	0.0	0.2	0.5	0.0
2008	발생량		126.0	103.1	0	42.6	2.3	2.7	32.4	23.1
	처리 방법	매립	163.2	140.3	37.2	42.6	2.3	2.7	32.4	23.1
		소각	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0
		재활용	37.2	37.2	37.2	0	0	0	0	0

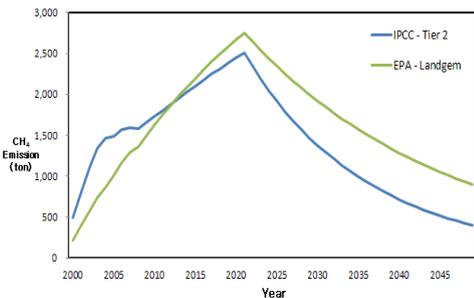
주) 환경부(2001-2009), 전국 폐기물 성상별 발생 및 처리현황

[표 4] RDF 제조시설 유무에 따른 메탄가스 발생량 추정
 [Table 4] Prediction of methane gas generation with or without RDF facility

Year	2014년 RDF 제조시설 설치시 메탄가스 발생량		2014년 RDF 제조시설 미 설치시 메탄가스 발생량		비고
	IPCC - Tier 2 Model (CH ₄ ton/year)	EPA - LandGEM (CH ₄ ton/year)	IPCC - Tier 2 Model (CH ₄ ton/year)	EPA - LandGEM (CH ₄ ton/year)	
2000	495.2	214.4	495.2	214.4	매립시작
2001	808.5	396.1	808.5	396.1	
2002	1,102.5	575.0	1102.5	575.0	
2003	1,337.5	738.0	1337.5	738.0	
2004	1,470.0	862.4	1470.0	862.4	
2005	1,492.8	1,011.6	1492.8	1,011.6	
2006	1,569.0	1,167.8	1569.0	1,167.8	
2007	1,592.8	1,297.7	1592.8	1,297.7	
2008	1,584.8	1,367.4	1584.8	1,367.4	
2009	1,656.7	1,501.0	1656.7	1,501.0	
2010	1,730.8	1,629.5	1730.8	1,629.5	
2011	1,806.0	1,752.8	1806.0	1,752.8	
2012	1,881.6	1,871.4	1881.6	1,871.4	
2013	1,956.9	1,985.3	1956.9	1,985.3	
2014	1,864.1	2,000.6	2031.5	2,094.7	RDF시설 가동
2015	1,781.4	2,015.3	2104.9	2,199.9	
2016	1,707.6	2,029.4	2176.8	2,301.0	
2017	1,641.9	2,043.0	2246.9	2,398.0	
2018	1,583.4	2,056.0	2314.9	2,491.2	
2019	1,531.3	2,068.6	2380.8	2,580.8	
2020	1,484.9	2,080.6	2444.5	2,666.9	
2021	1,443.7	2,092.2	2505.7	2,749.6	
2022	1,407.1	2,103.3	2342.3	2,641.8	
2023	1,374.6	2,113.9	2190.1	2,538.2	
2024	1,345.8	2,124.2	2048.3	2,438.7	
2025	1,320.3	2,134.1	1916.1	2,343.1	
2026	1,297.8	2,143.5	1792.8	2,251.2	
2027	1,278.0	2,152.6	1677.8	2,162.9	
2028	1,260.5	2,161.4	1570.4	2,078.1	
2029	1,245.2	2,169.8	1470.2	1,996.6	
2030	1,181.6	2,092.6	1376.6	1,918.3	매립종료
2031	1,117.3	2,010.6	1289.2	1,843.1	
2032	1,056.7	1,931.7	1207.5	1,770.8	
2033	999.8	1,856.0	1131.1	1,701.4	
2034	946.2	1,783.2	1059.7	1,634.7	
2035	895.7	1,713.3	993.0	1,570.6	
2036	848.1	1,646.1	930.5	1,509.0	
2037	803.2	1,581.6	872.1	1,449.8	
2038	760.9	1,519.5	817.4	1,393.0	
2039	721.0	1,460.0	766.2	1,338.4	
2040	683.3	1,402.7	718.3	1,285.9	
2041	647.7	1,347.7	673.5	1,235.7	
2042	614.1	1,294.9	631.5	1,187.0	
2043	582.4	1,244.1	592.1	1,140.5	
2044	552.3	1,195.3	555.3	1,095.8	
2045	524.0	1,148.4	520.7	1,052.8	
2046	497.1	1,103.4	488.4	1,011.5	
2047	471.7	1,060.2	458.1	971.9	
2048	447.7	1,018.6	429.7	933.8	
2049	425.0	978.6	403.1	897.1	



[그림 1] RDF 제조시설 설치시 메탄가스 발생량 추이
 [Fig. 1] Prediction of methane gas generation according to RDF facility install



[그림 2] RDF 제조시설 미 설치시 메탄가스 발생량 추이
 [Fig. 2] Prediction of methane gas generation without RDF facility install

Fig. 1과 2는 매립지에서 장래 메탄 가스발생량을 산정한 자료를 제시한 것이다. 우선 RDF 제조시설이 설치되었을 경우, 메탄가스는 2013년(1,956.9 CH₄ton/year)을 정점으로 점차 감소하였으며, RDF 제조시설이 설치되지 않았을 경우는 2021년(2,505.7 CH₄ton/year)을 정점으로 점차 감소하는 것으로 조사되었다. 메탄가스 발생량의 감소는 음식물류 폐기물이 지속적인 공급이 이루어지지 않고, RDF 제조시설이 설치되었을 경우 매립지로 유입되는 유기성 폐기물량이 급감하기 때문에 RDF 제조시설이 설치되지 않았을 경우보다 가스 발생량이 감소하는 것으로 조사되었다. Fig. 1, 2의 두 모델에서 산정한 메탄가스 발생량을 비교해 보면 RDF 제조시설이 설치되지 않았을 경우에는 IPCC-Tier 2 model과 EPA -LandGEM model의 메탄 발생량 예측량이 비슷한 경향을 나타냈으나, RDF 제조시설이 설치되었을 경우 두 model의 최대 메탄발생 시점과 감소되는 추이가 많은 차이가 발생하였다. 이러한 원인으로 여러 가지 요인을 고려할 수 있다. EPA-LandGEM model에서 메탄 발생을 상수 k 및 메탄 잠재 발생량은 model에서 제시하는 기본값이 적용되든가 현장 실험 및 실측결과에 의한 현장 특유의 값이 적용된다. 이

에 현장 실측값이 없을 경우 기본값은 매립지가스의 수집 및 처리의 설계에 필요한 최대값을 적용하기 때문에 EPA- LandGEM model에 의한 결과가 더 크게 예상될 수 있다[5]. 또한 model에 적용되는 추정인자 변화에 따라 비교적 큰 차이가 발생할 수 있기 때문에 보다 정확한 매립가스 발생량 예측을 위해서는 장기적인 현장측정 자료가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 매립지에서 발생하는 메탄가스를 통한 발전가능 용량을 RDF 시설이 가동되기 전 메탄가스 발생량과 매립이 종료된 2030년의 발생량으로 메탄가스를 통한 발전가능 용량을 계산하였다. 매립가스 포집/활용사업은 매립가스 발생량이 일정 규모 이상(10 m³/min)되어야 경제성 확보가 가능하며, 통산 1 MW의 전기를 생산하는데 약 10 Nm³/min의 매립가스가 필요하다. 따라서 본 연구에서 발전가능 용량에 대한 경제성 평가는 1 MW 전기를 생산할 수 있는 가스 발생량을 기준으로 하였다.

메탄가스를 통한 발전가능 용량을 산정한 결과, RDF 제조시설이 설치되었을 경우 2014년 발전용량은 0.9 MW, 2030년은 0.57 MW로 계산되었으며, 1 MW 이하의 발전용량으로는 메탄가스를 이용한 발전시설의 경제성이 없는 것으로 조사되었다. RDF 제조시설이 설치되지 않았을 경우, 매립이 종료된 2021년과 종료 후 10년인 2031년의 메탄가스 발생량으로 발전가능 용량을 계산한 결과, 매립기간동안 발전용량이 1 MW 이상으로 계산되었고, 매립 종료 후 2025년까지의 발전용량 역시 1 MW 이상으로 계산됨에 따라 매립 종료 후 2025년까지 발전에 의한 경제성이 있는 것으로 조사되었다.

본 연구에서는 매립가스 자원화 활성화 방안 자료를 기준으로 년도별 매립량 및 폐기물 성상 등을 예측하여 장래 메탄 발생량을 산정하였다.

[표 5] 메탄가스를 활용한 발전용량 계산

[Table 5] Calculation of generation capacity using methane gas

대상지역	대상년도	메탄발생량 (m ³ /min)	메탄발생량 (cubic feet/min)	발전용량 Megawatt(MW) capacity
REF 제조시설 설치	2014	4.96	175.16	0.90
	2030	3.15	111.24	0.57
RDF 제조시설 미설치	2021	6.67	235.54	1.22
	2031	3.43	121.12	0.62

그러나 실제 매립가스는 메탄과 이산화탄소 등을 포함하게 된다. 따라서 B 지체체의 폐기물 매립지에서 발생하는 매립가스를 산정하기 위하여 매립가스 자원화 활성화

화 방안 중 G 지자체의 자료를[11] 이용하여 연구대상 지자체 매립장의 매립가스 발생량을 산정하였다. 매립가스 자원화 활성화 방안에서는 매립가스 배출량을 산정하기 위하여 메탄가스 발생량을 부피로 환산하고 메탄 이외 이산화탄소 발생까지 고려한 역산을 통해 매립가스 발생량을 산정하였는데, 폐기물내 유기탄소 함량은 물리적 성상 자료와 IPCC의 기본 값(Default value)을 이용하여 산정하였다. 또한 속도상수 k값은 폐기물의 다양한 성상이 혼합 매립되어 처리된다는 것을 고려해 메탄 반응속도가 중간정도 분해속도를 갖고 분해된다고 가정하여 산정하였고, 기타 변수에 대해서는 IPCC에서 제시한 강수/기후 조건에 따라 설정된 기본 값을 이용하여 적용하였다. 또한 여러 변수 중 메탄비율(F)은 0.5를 적용하였는데, 본 연구대상 매립지에서 분해가 가장 활발하게 진행되는 지점의 메탄(48.2~57.8%) 비율과 유사한 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 매립가스 자원화 활성화 방안[11]에서 제시한 메탄비율을 제외한 값을 이산화탄소를 포함한 기타가스로 추정하고, B 지자체의 폐기물 매립지 RDF 설치 유무에 따른 매립가스를 산정하였다. 이러한 방식으로 B 지자체의 매립지의 RDF 제조시설 가동시 매립가스 발생량은 2014년에는 9.92 m³/min, 2030년에는 6.30 m³/min로 산정되었으며, RDF 제조시설 미가동시는 2021년의 매립가스 발생량은 13.34 m³/min, 2031년 매립가스 발생량은 6.86 m³/min로 산정되었다. 본 연구에서 산정한 매립지의 매립가스 발생 추정량 9.92 m³/min는 다른 B 지자체의 폐기물 매립지 LFG 발생량인 10.11 m³/min와 비교하면 거의 유사하게 산정되었다[11].

본 연구대상 지자체는 2014년을 기준으로 자원화시설을 가동할 계획이나, 매립가스 발생량은 음식물류 폐기물의 직매립 금지로 인하여 장래 점차 감소되는 것으로 조사되어 본 연구대상 지자체의 매립가스 자원화시설은 경제성이 없는 것으로 조사되었다. 따라서 본 연구대상 지자체는 RDF 제조시설 건설과 함께 매립가스 포집시설을 설치하여 매립가스의 대기 중 발생을 감소시키는 것이 유리할 것으로 판단된다.

4. 결론

- 1) B 지자체의 생활폐기물 특성 분석 결과, 평균 겉보기 밀도는 144.0 kg/m³이었으며, 가연성 평균 폐기물 조성비는 종이류가 36.0 %, 비닐·플라스틱류가 21.6 %, 음식물류가 19.7 % 순으로 조사되었다.
- 2) 발열량 실측결과, 평균 고위발열량(습윤)은 3,471 kcal/kg, 저위발열량(습윤)은 2,941 kcal/kg 로 측정되

었는데, 음식물류 폐기물의 직매립 금지 이후 발열량이 높은 종이류와 비닐, 플라스틱의 비율이 증가하여 음식물류 폐기물 직매립 이전 보다 발열량이 증가한 것으로 조사되었다.

- 3) 음식물류의 겉보기 밀도는 803~952 kg/m³, 물리적 조성 결과 곡류 37.14 %, 채소류가 34.04 %로 가장 높은 비율을 차지하였으며, 발열량은 건조고위, 습윤고위, 습윤저위발열량 평균이 각각 4,593, 916, 116 kcal/kg로 조사되었다.
- 4) 메탄가스 발생량은 2021년(2,505.7 CH₄ ton/ year)을 정점으로 점차 감소하는 것으로 예측되었으며, 자원화 시설이 가동되면 메탄가스는 2013년(1,956.9 CH₄ton/ year)을 정점으로 점차 감소되는 것으로 예측되었다.
- 5) 메탄가스 에너지 활용의 경우, 매립 종료 후 2025년까지의 발전용량이 1 MW 이상으로 발전에 의한 경제성이 있었으나, 자원화시설 운영시점을 기준할 때 2014년의 발전용량이 0.9 MW로 예측되어 경제성이 떨어지는 것으로 조사되었다. 또한 연구대상 지자체의 매립가스 발생량은 9.92 m³/min 로 예측되어 타 지자체의 발생량(10.11 m³/min)과 유사하게 조사되었다.

References

- [1] Chun S. K, "Effect of waste energy recovery on SUDOKWON landfill gas generation," Journal of Korean Society of Environmental Engineers. 2010; **32(10)**, 942-948, 2010.
- [2] Sing J. S, Jung J. Y, Kim S. D, Kang D. K, "A study on MELF model for estimating methane generation reaction constant," Journal of Energy & Climate Change, **2(2)**, 180-186, 2007.
- [3] Seo D. C, et al., "Prediction of landfill gas(LFG) generation rate using organic carbod content of municipal solid waste," Journal of Korean Solid Waste Engineering Society. **18(8)**, 702-714, 2001.
- [4] Ministry of Environment. "Feasibility study for the municipal landfill LFG recycling project," 2-4, 2009.
- [5] Hong S. P, "Estimation of methane generation rate and potential methane generation capacity at Cheongju Megalo landfill site based on LandGEM Model," Journal of Korean Society of Environmental Health. **34(6)**, 414-422, 2008.
- [6] Ministry of Environment. "Research of waste landfill

- technology,” 50-60, 2005.
- [7] Lee H. S, Choi Y. B, “Characteristics of municipal solid wastes and heating value in tourist season of the eastern side of gangwondo,” Journal of Korean society for sanitation. **21(1)**, 66-75, 2006.
- [8] Yoon S. P, Lim H. S, “Change of municipal solid waste composition and landfilled amount by the landfill ban of food waste,” Korea organic resource recycling association. **13(3)**, 63-70, 2005.
- [9] National Institute of Environmental Research. “Establishment of comprehensive management technology for organic wastes(I),” 57-96, 2004.
- [10] Ministry of Environment. “Present status of nationwide waste generation and disposal,” 2001-2009.
- [11] Ministry of Environment. “Landfill gas recycling promotion plans,” 1-24, 2008.
-

이 해 승(Hae-Seung Lee)

[정회원]



- 1989년 8월 ~ 1991년 11월 : (주)유신코퍼레이션, 환경부
- 1994년 3월 ~ 1997년 3월 : Hokkaido University 환경위생과 (환경공학 박사)
- 1999년 2월 ~ 현재 : 강원도립 대학 소방환경방재과 교수

<관심분야>

폐기물처리, 매립지 관리