

폐기물 매립지의 온실가스 감축을 위한 메탄가스 배출량 평가: 온두라스 Puerto Cortes 매립장 사례 분석

김충곤^{at}

Calculation and Projection of Methane Emissions from Waste Landfill for GHG Emission Reduction: Case Study of Puerto Cortes Landfill in Honduras

Choong Gon Kim^{at}

(Received: Mar. 13, 2024 / Revised: Mar. 18, 2024 / Accepted: Mar. 19, 2024)

ABSTRACT: The objective of this study was to assess the feasibility of a landfill project aimed at reducing greenhouse gas (GHG) from Puerto Cortes Landfill in Honduras ("Project"). The feasibility study involved surveying the status, composition and amount of waste entering the landfill, and projecting GHG emissions from the landfill. A projection of the GHG emissions with the IPCC model and based on the survey results indicated that the period 2027 to 2041 would see a total GHG emission reduction of 506,835 ton-CO₂/year, with a mean yearly GHG emission reduction of 33,789 ton-CO₂, assuming landfill gas collection is implemented, The findings of the study are expected to serve as basic data for deciding about whether and how to proceed with the Project.

Keywords: Puerto Cortes Landfill, IPCC model, Landfill gas, GHG emissions

초 록: 본 연구는 온두라스 푸에르토 코르테스 매립지의 온실가스 감축 사업을 하고자 매립장 반입량 조사, 폐기물 성분조사 등 기초자료 수집 및 온실가스 배출량 산정을 하였다. 반입량과 성분조사를 바탕으로 IPCC 모형을 통한 온실가스 배출량 산정하였다. 2027년부터 2041년까지 IPCC모형의 매립가스 회수를 고려하여 산정한 결과 총 온실가스 감축량은 506,835ton-CO₂이며, 연평균 온실가스 감축량은 33,789 ton-CO₂로 산정되었다. 본 연구는 푸에르토 코르테스 매립장 온실가스 감축 사업의 타당성을 평가하고 이행 방안을 도출하기 위한 온실가스 배출량에 대한 기초자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

주제어: 푸에르토 코르테스 매립장, IPCC 모형, 매립가스, 온실가스 배출량

^a 서원대학교 환경공학과 조교수(Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Seowon University)

† Corresponding author(e-mail: choonggon@gmail.com)

1. 서론

온두라스 푸에르토 코르테스시는 Cortes 주에 속한 인구 13만 규모 도시로, 온두라스 북부 슬라 계곡에 속한 8개의 지자체 중 관리형 위생매립장 보유하고 있는 유일한 지자체이다¹⁾. 2021년 기준 푸에르토 코르테스 인구는 13만 8,152명이며, 2023년 현재 푸에르토 코르테스시의 폐기물 일 발생량은 110톤이다²⁾.

푸에르토 코르테스시는 수거업체를 통해 폐기물을 수거하고 있고, 수거율은 98%이며, 주 2회 수거하고 있다¹⁾.

푸에르토 코르테스시의 유일한 매립지인 해당 매립지는 관리형 위생매립 방식으로 운영되고 있으며, 폐기물 반입 시 무게를 측정할 수 있는 계량기, 침출수 오염을 방지하는 차수막, 병원성 폐기물을 처리할 수 있는 간이소각로, 매립가스 포집공 등이 설치되어 있다³⁾.

푸에르토 코르테스는 온두라스를 포함한 중남미 다른 지역과 같이 분리수거를 하고 있지 않으며, 폐기물 매립지에 반입된 전체 폐기물 중 페비닐 및 폐플라스틱 등 재활용 가능한 물질은 폐기물 수집 노동자들에 의해 선별이 이루어지고 있다³⁾.

이에 본 연구에서는 온두라스 푸에르토 코르테스 매립장의 온실가스 감축사업을 통해 환경오염과 매립가스 관리의 대안을 제시하고자 푸에르토 코르테스 매립장으로 반입되는 폐기물 성상 및 매립량 등 기초조사를 하였으며, 이를 통해 매립장 내 누적된 폐기물 매립량의 추산과 모델링을 통한 온실가스 배출량을 예측 분석하고 평가하였다. 분석된 결과는 푸에르토 코르테스 매립장 온실가스 감축 사업의 타당성을 평가하고 이행 방안을 도출하기 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 매립장

본 연구의 대상인 온두라스 푸에르토 코르테스 매립장은 매립면적이 12,000m²이다. 일 100톤의 생

활폐기물을 매립 처리하고 있으며, 2011년 매립이 종료될 예정이었으나 매립지를 확장하여 2041년까지 연장 사용할 계획이다. 푸에르토 코르테스 매립장은 시 소유이며, 시에서 직접 운영하고 폐기물 수거는 민간업체에서 하고 있다.

2.2. 연구 내용

2.2.1. 반입량 산정

푸에르토 코르테스 매립장에 반입되는 폐기물 반입량은 매립장을 관리하고 있는 푸에르토 코르테스시에서 제공한 자료를 반영하여 반입량을 산정하였다.

2.2.2. 성상조사

푸에르토 코르테스시 전체에서 발생하는 폐기물을 수거하는 푸에르토 코르테스 매립장에서 2023년 8월 14일부터 20일까지 총 7회에 걸쳐 성상조사를 하였다. 폐기물 성상조사는 푸에르토 코르테스 지자체 각 수거 노선(총 7개 수거노선)에서 반입되는 폐기물을 각 200kg 채취 후 원추사분법⁴⁾을 2회 시행한 뒤 시료를 분리하여 성상조사를 진행하였다. 폐기물 성상은 IPCC에서 규정한 폐기물 분류 리스트(11종)에 따라 분류하여 성상별 발생량 및 비중을 계산하였다. 성상별로는 유기성폐기물 중 음식물 쓰레기의 비중이 24%로 가장 높았으며, 비유기성 폐기물 중에는 비닐류 13%, 직물류가 12%로 가장 높은 편에 속했다.

2.2.3. 온실가스 배출량 산정

생활폐기물의 매립은 상당량의 메탄(CH₄)이 발생하며, 메탄은 매립된 폐기물 중 분해 가능한 유기탄소가 수십 년에 걸쳐 서서히 혐기성 분해되며 발생한다. 일정한 조건 하에 메탄 생성은 전적으로 잔존하는 탄소량에 의존하며, 이에 따라 매립 초기에 배출량이 가장 크며, 이후 분해 박테리아에 의해 분해 가능한 탄소가 소비되면서 점차 감소한다.

본 연구에서 온실가스 배출량 산정은 분해 과정은 1차 반응을 따른다는 가정을 적용하여 2006 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)에 제시된 1차 반응모델(FOD ; First Order Decay)⁵⁾을 통하

여 고형폐기물 매립시설에서의 메탄 배출량을 산정하였다. 메탄 배출량 산정에 적용한 식은 아래와 같다.

$$CH_4Emissions_T = [\sum_x CH_4generated_{x,T} - R_T] \times (1 - OX)$$

$$CH_4generated_{x,T} = DDOCm,decomp_T \times F \times 1.336$$

$$DDOCm,decomp_T = DDOCma_{T-1} \times (1 - e^{-k})$$

$$DDOCma_{T-1} = DDOCmd_{T-1} + (DDOCma_{T-2} \times e^{-k})$$

$$DDOCmd_{T-1} = W_{T-1} \times DOC \times DOC_f \times MCF$$

$CH_4Emissions_T$: T년도 메탄 배출량(tCH₄)

$CH_4generated_T$: T년도 발생 가능한 최대 메탄배출량(tCH₄)

R_T : T년도에 회수된 메탄량(tCH₄)

OX : 매립지 표면에서의 산화율

$DDOCm,decomp_T$: T년도에 혐기적으로 분해된 유기탄소(tC)

F : 발생 매립가스에 대한 메탄 부피비

1.336 : CH₄의 분자량(16.043)/C의 원자량(12.011)

$DDOCma_{T-1}$: T-1년도 말까지 누적된 유기탄소(tC)

k : 메탄 발생 속도상수

$DDOCmd_{T-1}$: T-1년도에 매립된 혐기적 분해가능한 유기탄소(tC)

W : 폐기물 매립량(tWaste)

DOC : 분해 가능한 유기탄소 비율(tC/t-Waste)

DOC_f : 메탄으로 전환 가능한 DOC 비율

MCF : 호기성 분해에 대한 메탄 보정계수

T : 산정년도

x : 폐기물 성상

Table 1. DOC and k by Waste Composition

Municipal solid waste		
Waste composition	DOC	k
Mixed waste (bulk)	0.14	0.09
Paper	0.40	0.06
Textiles	0.24	0.06
Food	0.15	0.185
Wood	0.43	0.03
Garden and park waste	0.20	0.1
Diapers	0.24	0.06
Rubber and leather	0.39	0.03
Plastics	0.00	0
Metals	0.00	0
Glass	0.00	0
Others	0.00	0

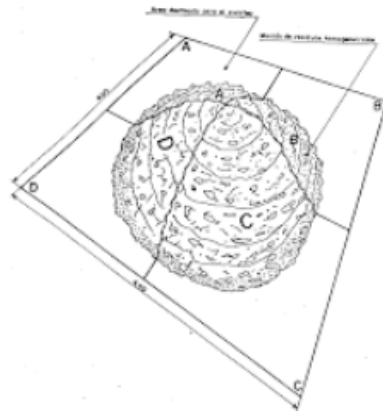


Fig. 1. Waste sampling through out conical quartering method.

Table 2. Assumptions for Assessment of GHG Emissions

Item	Description
Start year of landfill	2004
Yearly amount of landfill	100 tons/day, 36,500 tons/year
Waste composition	Table 3.
Assessment method	2006 IPCC Guideline Tier 1
Waste type	Municipal solid waste
DOC (Degradable Organic Carbon)	Table 1.
k (methane generation rate constant)	
Landfill type	Controlled anaerobic type : 1.0
Cover type	Cover with soil compost, etc. : 0.1
CH ₄ GWP ⁶⁾	28

3. 결과 및 고찰

3.1. 폐기물 반입 현황

푸에르토코르테스 매립장의 폐기물 반입량은 매립장 반입자료를 반영하여 적용하였으며, 매립이 시작된 2004년부터 매립 종료 예정인 2041년까지의 반입량을 기준으로 하였다. 연도별 매립량은 1일 100톤, 연간 36,500톤을 적용하여 온실가스 배출량을 산정하였다.

3.2. 폐기물 성상

푸에르토코르테스 매립장의 성상조사 결과 성상별로는 유기성폐기물 중 음식물 쓰레기의 비중이 24%로 가장 높았으며, 비유기성 폐기물 중에는 비닐류 13%, 직물류가 12%로 가장 높은 편에 속했다. 이는 니카라과 등 분리 배출을 하지 않는 중미 다른 국가와 매우 유사한 성상조사 결과값을 나타내었다⁷⁾.

3.3. 온실가스 배출량 및 감축량 예측

매립지에서 발생하는 메탄가스를 회수하기 전의 배출량을 베이스라인 배출량으로 설정할 수 있으며, 메탄가스를 회수한 후의 배출량을 프로젝트 배출량으로 설정할 수 있다. CDM 사업계획서에는 베이스라인과 비교하여 그 차이에 해당하는 배출량을 온실가스 감축량, 즉 CERs(Certificated Emission Reductions)로 계산할 것을 명시하고 있다. 이에 따라 푸에르토

Table 3. Results of Waste Composition Survey in Puerto Cortes City

Waste composition	Percentage (%)
Twigs, etc.	11.74
Rubber and leather	2.40
Paper	14.48
Food	24.00
Wood and composite wood	4.09
Vinyls	13.47
Aluminium and metals	3.47
Plastics	5.61
Diapers	4.04
Textiles	11.81
Glass	4.89

코르테스 매립장의 온실가스 예측시 매립가스 포집율을 85%로 가정하였고, 메탄 비율은 60%로 적용하여 배출량을 산정하였다.

온실가스 감축량 산정 결과 2027년부터 2041년까지 IPCC모형의 매립가스 회수를 고려하여 산정한 결과 총 온실가스 감축량은 506,835ton-CO₂이며, 연평균 온실가스 감축량은 33,789 ton-CO₂로 산정되었다.

또한, 본 연구에서 적용된 매립가스 포집율을 비교하기 위해 Fig. 2에서 보는 것과 같이 중미 지역에 보고된 CDM 사례⁸⁾와 인접 국가인 니카라과 마나과 시 La Chureca 매립장 그리고 한국의 대구 방천리 매립장 포집율⁹⁾을 비교하여 그림으로 정리하였다. 중미지역에서 CDM에 보고된 36개 사례와 비교할 때

Table 4. Projection of GHG Emission Reductions

Year	GHG emissions (tCO ₂ -eq)		GHG emission reductions (tCO ₂ -eq)
	Baseline emissions	Project emissions	
2027	43,582.65	12,348.42	31,234.235
2028	44,232.61	12,532.57	31,700.040
2029	44,842.77	12,705.45	32,137.317
2030	45,416.07	12,867.89	32,548.182
2031	45,955.19	13,020.64	32,934.551
2032	46,462.56	13,164.39	33,298.169
2033	46,940.41	13,299.78	33,640.626
2034	47,390.75	13,427.38	33,963.371
2035	47,815.45	13,547.71	34,267.735
2036	48,216.20	13,661.26	34,554.940
2037	48,594.57	13,768.46	34,826.106
2038	48,952.00	13,869.73	35,082.268
2039	49,289.83	13,965.45	35,324.380
2040	49,609.29	14,055.97	35,553.325
2041	49,911.52	14,141.60	35,769.921
Mean	46,950.03	13,302.51	471,065.245

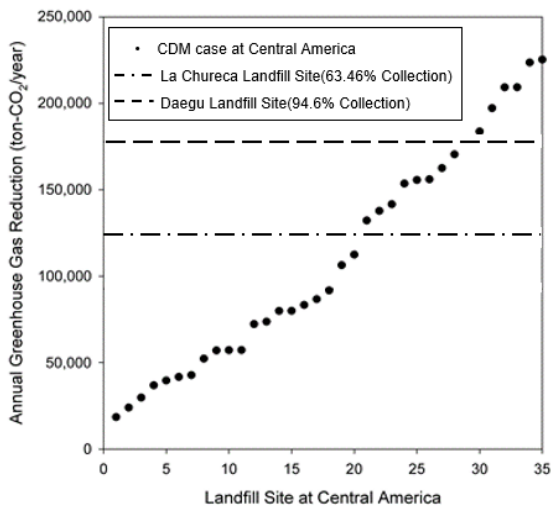


Fig. 2. Greenhouse gas credits of La Chureca site, Daegu site and other landfills at Central America registered in CDM⁷⁻⁹⁾.

푸에르토코르테스 매립장의 온실가스 포집 가능량 85% 포집 효율은 약 22위에 해당하는 수준으로 본 연구에 적용 값으로 적정한 것으로 판단된다.

3.4. 감축량 산정에 따른 경제성 분석

CER은 교토의정서의 온실가스 감축의무를 부여 받은 선진국이 의무 준수에 활용할 수 있는 배출권으로서, 유럽과 일본 정부가 주요 구매자였다. 유럽의 배출권거래제도(EU-ETS)에서도 기업이 온실가스 감축의무 준수에 CER을 활용할 수 있도록 허용함에 따라 EU-ETS의 대상 기업과 유럽의 금융권이나 중개회사가 CER을 적극적으로 구매하였으며, 탄소시장에서는 주로 EUA와 CER이 장내외에서 거래가 되고 있다¹⁰⁾.

탄소배출권 사업은 파리기후협약에 따라 기존 CDM 체제가 모두 SDM 체제로 전환해야 한다. 우리나라 역시 탄소중립 기본법을 토대로 SDM에 필요한 법적, 제도적 지원에 대한 근거를 수립하고 각종 대체를 수립하고 있다¹¹⁾.

현재 SDM 체제 전환이 이루어진 것이 아님에 따라 본 연구에서는 가장 큰 탄소시장인 유럽 탄소시장의 EU-ETS 시세를 적용하여 감축량에 따른 경제성을 분석하였다. EU-ETS 적용 가격¹²⁾은 2021년 1월부터 2023년 11월까지의 평균값 73.90유로(한화 105,091 원)를 적용하였으며, 온실가스 감축량에 평균 금액

Table 5. Economic Analysis of GHG Emission Reductions

Year	Emission reductions (CERs) (tCO ₂ -eq)	Unit price		Projected economic effects	
		Euro	KRW (Korean won)	Euro	KRW
2027	31,234.235			2,308,209	3,282,436,990
2028	31,700.040			2,342,632	3,331,388,904
2029	32,137.317			2,374,947	3,377,342,781
2030	32,548.182			2,405,310	3,420,520,995
2031	32,934.551			2,433,863	3,461,124,899
2032	33,298.169			2,460,734	3,499,337,878
2033	33,640.626			2,486,042	3,535,327,027
2034	33,963.371	73.90	105,091	2,509,893	3,569,244,622
2035	34,267.735			2,532,385	3,601,230,539
2036	34,554.940			2,553,610	3,631,413,200
2037	34,826.106			2,573,649	3,659,910,306
2038	35,082.268			2,592,579	3,686,830,626
2039	35,324.380			2,610,471	3,712,274,419
2040	35,553.325			2,627,390	3,736,334,478
2041	35,769.921			2,643,397	3,759,096,768
Mean	33,789.01			2,497,007	3,550,920,962

을 반영한 결과 Table 5와 같이 연평균 약 35억원의 수익 창출이 가능한 것으로 산정되었다.

4. 결론

온두라스 푸에르토 코르테스 매립장을 대상으로 온실가스 감축 사업의 타당성을 평가하고자 폐기물 반입량, 성상조사, 매립가스 배출량 및 경제성을 산정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 반입량과 성상조사를 바탕으로 IPCC 모형을 통한 온실가스 배출량 산정 결과 2027년부터 2041년까지 IPCC모형의 매립가스 회수를 고려하여 산정한 결과 총 온실가스 감축량은 506,835ton-CO₂이며, 연평균 온실가스 감축량은 33,789 ton-CO₂로 산정되었다.
- 2) 매립가스 발생 및 포집량 예측 결과는 신뢰할 만한 수준임을 보여주었다. 매립가스 포집 효율은 85%로 적용하여 상당히 보수적으로 고려했음에도 포집 가능량 예측 결과 푸에르토 코르테스 매립장의 매립가스 잠재 감축량은 중미 지역의 과테말라, 파나마, 니카라과 등 다른 매

립장에 비교할 때 평균값과 중간값에 상회하는 수준으로 나타났다.

- 3) 온실가스 감축량에 따른 경제성 분석을 위해 EU-ETS 적용 시세로 73.90유로(2021년 1월~2023년 11월 평균값)를 적용한 결과 온실가스 감축량에 따른 연평균 수익은 약 35억으로 나타났다.

그러므로, 본 연구에서 산정한 매립가스 배출량 및 경제성 평가는 푸에르토 코르테스 매립장 온실가스 감축 사업의 타당성을 평가하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

References

1. Martinez, M., "Waste management in 8 municipalities of Sula Valley", General Directorate of Environmental Management(DGA) of Ministry of Natural Resources and Environment of Honduras. (2023).
2. Ministry of Natural Resources and Environment of Honduras, Ministry of Environment of Chile, GIZ, "Manual for operation and management of sanitary landfills in honduras". (2014).

3. Municipality of Puerto Cortés, Honduras, “Energy valorization of waste through coprocessing in cement Klins in Puerto Cortés, Honduras”. (2016).
4. Ministry of Environment, “Official test standards for environmental pollution”. (2020).
5. International Panel on Climate Change Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, “Chapter 5 CH4 EMISSIONS FROM SOLID WASTE DISPOSAL”. (2006).
6. IPCC, “AR5, the 5th assessment report”. (2014).
7. Kim, C.G., Lee, H.J., Kang, H.J. and Kim, J.Y., “Calculation and projection of greenhouse gas emissions from La Chureca Landfill in Managua, Nicaragua”, J. of KORRA, 30(4), pp. 131~139. (2022)
8. United Nations Framework Convention on Climate Change, “CDM - Project search”, <https://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html> (accessed date: December 22, 2020)
9. United Nations Framework Convention on Climate Change, “Project design document form, Daegu Bangcheon-Ri Landfill gas CDM project (Ref.0851)”. (2020).
8. United Nations Framework Convention on Climate Change, “CDM - Project search”, <https://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html> (accessed date: December 22, 2020)
10. Lee, H.C., Kim, M.G. and Choi, Y.B., “Analysis of the phase 4 EU emissions trading system and future direction of the Korean emissions trading system after the 3rd compliance period: Centered on the response for carbon leakage”, Journal of Eurasian Studies, 19(4), pp. 29~52. (2022)
11. Han, S. U. and Ma, A. R., “The meaning of the framework act on carbon neutrality and future legal tasks”, Journal of Law and Politics Research, 21(4), pp. 123-146. (2021)
12. Trading Economics, <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon> (accessed date: December 1, 2023)