

개발도상국 매립가스 CDM 등록사업의 예상실적과 감축실적 분석

유승민^a, 박대원^{b†}

Analysis of estimated and actual reductions through registered LFG CDM projects in developing countries

Seungmin Ryu^a, Daewon Pak^{b†}

(Received: Feb. 18, 2021 / Revised: Apr. 28, 2021 / Accepted: Apr. 29, 2021)

ABSTRACT: As the implementation of carbon reduction measures would be monitored starting from 2023 in line with the Paris Agreement, it is crucial and urgent to control GHGs emitted from wastes contributing to 11% of methane emissions. Despite such importance and urgency, 93% of wastes are deposited in unsanitary landfills in developing countries, presenting challenges to methane management. Against the backdrop, landfill gas-to-energy projects have once again drawn attention for their economic substantiality secured through CDM projects while there has been much research actively carried out to estimate methane emissions and GHG reductions in landfills located in developing countries. Although a significant difference was found between estimations calculated based on research methodologies and actual results monitored through registered CDM projects, there has not been a study conducted on what is causing such a difference. Accordingly, the research team conducted an analysis of 18 LFG projects out of 46 that were registered as LFG CDM projects under the UNFCCC and has identified precipitation(28%), malfunction(22%), organic content(11%), amount of landfilled waste(11%) and temperature(11%) as key parameters causing the difference between the amount of methane captured and the amount of GHG reduced.

Keywords: Solid Waste Management, Developing Countries, Landfill gas, CDM

초 록: 2015년 채택된 파리협정으로 2023년부터 탄소감축 이행여부를 점검함에 따라, 메탄가스 발생의 11%를 차지하고 있는 폐기물로부터 배출되는 온실가스 관리는 매우 중요하고 시급한 실정이다. 그럼에도 불구하고, 93%의 폐기물이 비위생적으로 매립되고 있는 개발도상국에서의 매립가스 관리는 여전히 도전적인 과제이다. 이에 CDM 사업을 활용하여 경제적으로 지속가능한 매립가스 자원화 사업이 다시 주목을 받고 있으며, 다양한 개발도상국의 매립장에서 매립가스 발생량과 온실가스 감축량을 산정하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 연구방법에 따라 예측된 수치와 CDM 사업으로 등록된 이후 모니터링을 통한 실측치 간에는 상당한 차이를 보이고 있으며, 차이가 발생한 원인에 대한 연구는 수행된 사례가 없었다. 이에 본 연구에서는 현재까지 UNFCCC에 등록된 매립가스 CDM 등록사업 46건 중 모니터링을 수행한 사업 18건의 매립가스 프로젝트를 분석하였으며, 연구결과 강수량(28%), 설비고장(22%), 유기성분 함량(11%), 매립물량(11%), 매립지내 온도(11%) 등이 예측치와 실측치 간의 차이를 유발하는 주요 원인임을 확인할 수 있었다.

주제어: 고형폐기물 관리, 개발도상국, 매립가스, 청정개발체계

^a 서울과학기술대학교 에너지환경공학과 박사과정(Ph.D. student, Department of Environmental Energy Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea)

^b 서울과학기술대학교 에너지환경공학과 교수(Professor, Department of Environmental Energy Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea)

† Corresponding author(e-mail: daewon@seoultech.ac.kr)

1. 서론

기후변화로 인한 전 지구적 위기를 극복하기 위해 2015년 채택된 파리협정(Paris Agreement)에 의거하여 개도국을 포함한 195개 당사국은 2023년부터 매 5년마다 탄소감축 이행 여부를 점검하고 감축해야 한다¹⁾. 이러한 국제적인 온실가스 감축의 의무가 가시화됨에 따라, 메탄가스 발생의 11%를 차지하고 있는 폐기물로부터 배출되는 온실가스 관리는 매우 중요하고 시급한 실정이다²⁾. 선진국의 경우 폐기물 에너지화, 연료화, 비료화 등 다각적인 방법으로 자원화 설비를 이미 갖추고 있으나, 대부분의 저소득 국가들에서는 93%의 폐기물이 여전히 비위생적으로 매립되고 있어 전 세계 온실가스 배출의 주범이 되고 있다³⁾. 그러나 저소득 국가에서 폐기물 관리에 소요되는 예산은 전체 지자체 예산의 약 20%를 차지할 정도로 재정적 부담이 큰 상황임에 따라, 저소득 국가에서 매립가스 처리는 여전히 매우 도전적인 과제이다⁴⁾. 이러한 현실적인 한계를 극복하기 위해, 저소득 국가에서는 경제적으로 지속가능한 매립가스 관리 방안으로 CDM 사업을 적극적으로 활용할 필요가 있다. 다만, CDM 사업을 수행하는데 있어서 사업 등록 이후에 매립가스 포집량과 온실가스 감축량의 실측치가 등록시에 예상된 예측치보다 낮을 경우, 경제적으로 지속 가능한 사업 추진이 어렵게 되므로 사전에 감축량에 영향을 미치는 인자들을 파악하는 것은 매우 중요하다.

그러나 대부분의 선행연구들은 매립가스 발생량과 온실가스 감축량을 산정하기 위해 LandGEM (Landfill Gas Emission Model), IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) FOD (First Order Decay), CDM (Clean Development Mechanism) Tool과 같은 모델들을 활용하여 예측치를 분석하는 연구들만 주로 수행하고 있다⁵⁻⁸⁾. 실제로 CDM 사업으로 등록된 사업의 메탄 발생량 및 온실가스 감축량의 예측치가 실제 실측치와 어떠한 차이가 발생하고 있으며, 차이가 발생하는 주요 원인이 무엇인지에 대해 분석하는 연구는 수행되지 않았다. 이에 본 연구에서는 매립가스 CDM 등록사업들의 예측치와 실측치의 차이를 분석하고 그 원인을 파악해 봄으로써, 매립가스

포집량 및 온실가스 감축량이 과소 내지 과대평가 되는 가능성을 최소화하고자 한다.

이에 본 연구에서는 현재까지 UNFCCC에 등록된 매립가스 CDM 등록사업 46건 중 모니터링을 수행한 사업 18건의 프로젝트에 대한 기후조건, 매립가스 포집량, 실제 감축량, 검증의견 등을 종합적으로 분석하였다. 18건의 프로젝트 중 7건은 발행목표 감축량 대비 실제 감축량의 비율이 100% 이하였으나, 11건은 최대 200%까지 높은 발행목표 대비 감축율을 보였다. 높은 감축율을 보인 사업들은 매립 폐기물량이나 유기물 함량이 증가하거나 온도, 함수율 등 혐기성 반응에 적절한 조건의 경우인 것으로 파악되었다. 따라서 개발도상국에서 매립장의 운영 조건만 적절하게 관리된다면 매립가스 CDM 등록사업은 성공적으로 추진이 가능할 것으로 사료된다. 본 연구를 통해 분석된 결과는 향후 개발도상국 비위생 매립장의 매립가스 자원화 시설의 설치 계획과 온실가스 감축량 예측이 과소 내지 과대평가 되는 가능성을 최소화할 수 있는 기초자료로 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구방법

2.1. 이론적 고찰

폐기물 매립지는 하나의 커다란 혐기성 반응기로써 매립지내로 폐기물과 수분(폐기물 자체 보유수 및 강우 침투수)이 유입되고, 폐기물 중 유기물의 생물학적 분해과정을 통하여 침출수와 매립가스의 최종산물을 배출하는 일련의 혐기성 반응단계를 거치게 된다. 매립가스의 주요 성분은 메탄(CH_4)가 약 55(\pm 5)%, 이산화탄소(CO_2)가 약 45(\pm 5)%로서 대부분을 차지하고, 그밖에 다양한 성분의 가스를 포함하고 있다. Fig. 1과 같이 1단계는 초기조정단계로서 분해가 쉬운 물질이 먼저 이산화탄소로 전환되면서 매립지 내부의 산소를 소비한다. 2단계는 전이단계로서 호기성 분해에 따라 산소가 고갈되면서 혐기성 조건이 시작되는 단계이다. 3단계는 산형성단계이며 유기산의 생성이 급증하면서 이산화탄소와 수

소(H_2)가 점진적으로 감소하는 단계이다. 4단계에서는 메탄발효단계로서 산형성균에 의해서 생성된 산과 수소가스가 메탄과 이산화탄소로 전환된다. 이 시기에는 폐기물 중 유기물이 분해되는 동안 메탄과 이산화탄소의 농도가 비교적 일정하게 유지되는 특성을 나타낸다.

매립장의 메탄가스 발생량에 영향을 미치는 주요 인자는 산소(Oxygen), 수소(Hydrogen), pH, 영양분

(Nutrients), 온도(Temperature), 함수율(Water Contents) 등이다(Fig. 2). 메탄형성 박테리아는 혐기성 미생물로서 산소에 민감하게 반응하므로 산소 존재 시에는 메탄생성이 어려우며, 발효과정에서 생성된 수소는 pH를 감소시켜 메탄형성을 방해할 수 있다. 메탄형성 박테리아는 pH 6-8범위에서 가장 효과적으로 활동하며, 혐기성 상태에서 미생물이 활성을 유지하기 위해서는 잘 혼합된 유기물질이 필요하다. 또한, 온도상승에 의해 메탄형성도 활발하고 반응열의 증가에 의해 매립장 내부 온도도 증가되며 적정 수분도 유지되어 활발한 분해 작용이 유도된다. 매립장 내의 수분도 메탄생성을 증가시키는데, 기존 연구에 의하면 함수율 50~60% 사이에서 메탄 발생량이 증가하는 것으로 보고되고 있다¹⁰⁻¹³⁾. 폐기물매립지에서 함수율은 폐기물의 분해속도뿐만 아니라 폐기물의 분해율에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다¹⁴⁾. 이는 폐기물내의 수분이 대기로부터 산소전달을 제한하고 유기물질 및 미생물의 이동을 용이하게 하며 반응 억제물질을 희석하기 때문이다.

2.2. 사례 분석방법

UNFCCC에 등록된 소규모(60,000tCO₂/yr 이하) 매립가스 프로젝트는 총 46개이나, 이 중 실제 운영 중인 프로젝트는 19건에 불과하다¹⁵⁾. 19개 프로젝트 중 메탄가스 감축 프로젝트가 18건이고, 나머지 1건

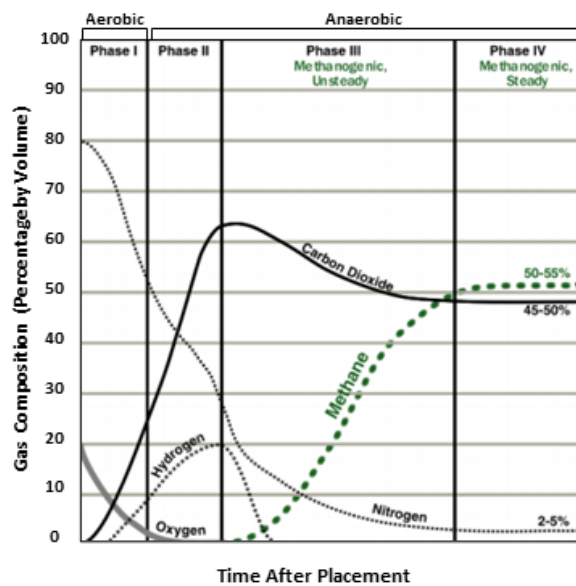


Fig. 1. Changes in typical LFG composition after waste placement⁹⁾.

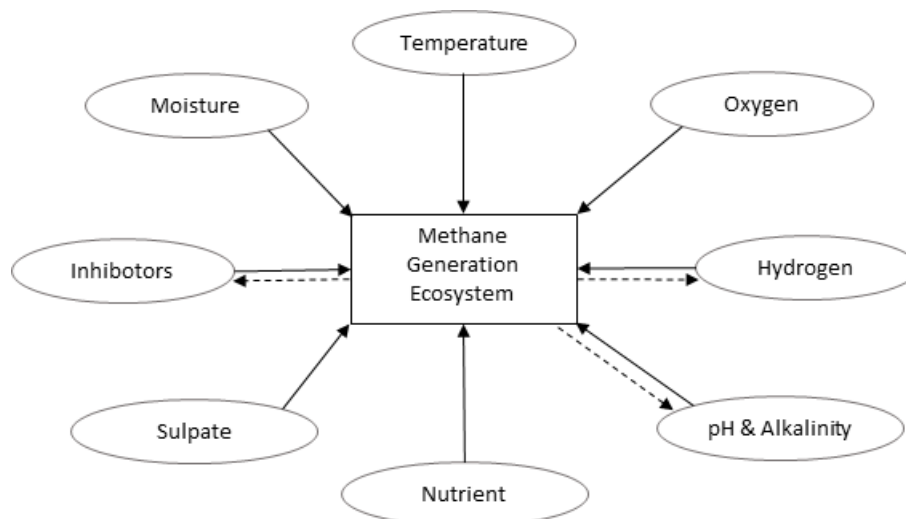


Fig. 2. Main factors of methane generation.

은 바이오매스 에너지 프로젝트이다. 본 연구에서는 바이오매스 에너지 프로젝트 1건을 제외한 18건의 메탄가스 감축 프로젝트의 사례를 비교하여 분석하였으며, 대상 프로젝트 목록은 Table 1과 같다. 중국이 11건, 한국이 4건, 아르헨티나, 콜롬비아, 태국이 각각 1건이며, 목표 감축량 대비 실제 감축량 비율

이 100%이하인 사례는 총 7건이고 11건은 목표 감축량 대비 실제 감축량의 비율이 100% 이상으로 확인되었다.

Table 1과 같이 프로젝트별로 온실가스 감축 성공율에 차이가 발생하는 사유에 대한 원인을 분석하기 위해, 총 18건 프로젝트의 최종 등록된 사업계획

Table 1. List of Landfill Gas CDM Projects in the Study

Registered No	Country	Project Title	LFG to Enegy Capacity	Monitoring Period (days)	Insurance Rate (%)
1645	Argentina	Methane capture and destruction on Las Heras landfill in Mendoza	1MW	876	35%
2794	Colombia	Bionersis landfill project in Pasto, Colombia	450kW×2	737	90%
2834	Republic of Korea	Mokpo Landfill Gas Recovery Project for Electricity Generation	1.06MW 1.058MW	3,235	44%
3663	Thailand	Active Synergy Landfill Gas Power Generation Project Nakhon Pathom	925kW	195	50%
3937	China	Nanyang Landfill Site LFG Recovery to Electricity Project	450kW×2	771	57%
4294	Republic of Korea	Gwangju metropolitan city sanitary landfill LFG power plant CDM project	1MW×2	2,867	59%
4503	China	Landfill Gas Recovery and Utilization Project in Linyi Municipal Waste Sanitary Landfill	0.5MW×2	397	67%
4610	China	Baoding Landfill Gas Recovery and Utilization Project in Hebei Province	0.5MW×3	451	113%
5130	China	Shandong Laiwu Landfill Gas Recovery and Power Generation Project	834kW×2	498	108%
5238	China	Luohe MSW Landfill Site LFG Recovery to Power Project	0.5MW×4	1,606	128%
5316	China	Jiyuan MSW Landfill Site LFG Recovery to Power Project	0.5MW×3	1,094	104%
5652	China	Jiaozuo Zhouliu MSW Landfill site LFG Recovery to power project	0.5MW×5	418	107%
6229	China	Luoyang Zhangluoping MSW Landfill Site LFG Recovery to Power Project	500kW×3	1,154	126%
6701	China	Yichang Huangjiawan MSW Landfill site LFG Recovery to power project	0.5MW×3	1,050	145%
6704	China	Ezhou MSW Landfill site LFG Recovery to power project	0.5MW×2	1,005	204%
6732	China	Shangqiu MSW Landfill site LFG Recovery to power project	0.5MW×4	1,094	127%
6922	Republic of Korea	Jinju Landfill Gas Recovery and Power Generation CDM Project	1,040kW×2	1,094	116%
10379	Republic of Korea	Wonju Landfill Gas Recovery Project for Electricity Generation	245kW×4	411	150%

서, 모니터링 보고서, 검증보고서, 감축량 산정시트 등을 다각적으로 검토하였다. 먼저 모니터링 기간 내 예측된 매립가스 포집량과 실제 매립가스 포집량의 차이를 비교하고 차이가 발생한 원인을 파악하였다. 다음으로 온실가스 감축 예상량과 실제 감축량 간의 상관관계를 비교하여 예측치와 실측치 간의 차이에 대한 분석을 수행하였다. 이때 CDM 사업 등록 시 예상 감축량과 모니터링 시 실제 감축량은 대상기간이 상이하여 직접적인 비교가 불가능하므로 동일 모니터링 기간 내 누적 예상 감축량과 누적 모니터링 실적을 비교하였다. 마지막으로 분석된 결과를 토대로 향후 CDM 사업 등록시 메탄가스 발생량 및 온실가스 감축량 예측치를 보다 정확하게

산정하기 위해 고려되어야 할 인자들에 대해 고찰해 보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 매립가스 포집량의 예측치와 실측치 분석

UNFCCC에 등록되어 모니터링 된 총 18건의 매립가스 프로젝트의 매립가스 포집량 실측치와 예측치를 분석한 결과(Table 2), 예측치보다 낮은 사례가 9건, 예측치보다 높은 사례가 9건으로 파악되었다. 예상 매립가스 포집량 대비 모니터링 후 실측 매립가스 포집량이 감소한 9건은 평균 83% 감소하였으

Table 2. Analysis of Predicted and Measured Values of Landfill Gas Collection

Registered No	Climate	Humidity	Mean Annual Rainfall (mm)	Mean Annual Temp. (°C)	Predicted LFG Volume (Nm ³ /y)	Measured LFG Volume (Nm ³ /y)	Measured Value/ Predicted Value	Reasons
1645	Subpolar	Dry	205.3	16.4	9,453,807	5,906,981	62%	Malfunction
6704	Tropical	Wet	1,402.0	17.5	5,188,752	3,247,498	63%	High precipitation
3663	Tropical	Wet	1,045.0	23.4	1,403,555	1,121,875	80%	High precipitation
4610	Subpolar	Wet	1,200.0	14.5	4,509,959	3,620,368	80%	High precipitation
2794	Subpolar	Wet	1,300.0	14.0	7,468,790	6,167,820	83%	High precipitation
3937	Subpolar	Wet	1,300.0	15.0	8,155,321	6,841,580	84%	High precipitation
6229	Subpolar	Dry	585.0	14.7	11,059,988	10,822,475	98%	Similar figures
5316	Subpolar	Dry	600.0	14.3	9,193,549	8,996,607	98%	Similar figures
6701	Subpolar	Dry	1,161.0	17.1	11,447,362	11,232,376	98%	Similar figures
6922	Subpolar	Dry	126.1	13.1	6,932,831	7,223,258	104%	Similar figures
4503	Subpolar	Dry	845.0	14.1	1,836,356	1,945,539	106%	Similar figures
4294	Subpolar	Dry	600.0	14.3	31,446,262	34,203,310	109%	Similar figures
6732	Subpolar	Dry	711.0	14.2	10,888,683	13,003,899	119%	Increase in landfilled amount
2834	Subpolar	Dry	600.0	14.3	29,037,959	38,439,208	132%	Increase in landfilled amount and Temperature
10379	Subpolar	Dry	1,343.0	11.3	3,856,045	5,332,520	138%	Increase in Landfill Temperature
5238	Subpolar	Dry	804.0	14.8	13,433,733	18,964,477	141%	Increase in landfilled amount and organic compound ratio
5652	Subpolar	Dry	568.0	15.0	9,907,265	15,106,172	152%	Increase in organic compound ratio
5130	Subpolar	Dry	300.0	14.5	1,453,901	3,999,178	275%	Increase in organic compound ratio

며, 실측된 포집량이 예측된 포집량보다 증가된 9건은 평균 141% 증가하였다.

예측치보다 낮은 매립가스 포집량을 보인 9건의 사례 가운데 1645번 프로젝트는 기후적인 요인에 상관없이 해당 매립장의 매립가스 포집설비 고장에 따라 포집량이 감소한 사례여서 본 연구의 경향성 분석에서는 제외하였다. 동 프로젝트를 제외하고 예측치 이하의 매립가스 포집량을 보인 8건의 사례 중에서 3건은 98% 수준으로 실질적으로는 예측치와 거의 차이를 보이지 않았으며, 예측치와 차이를 보인 5건은 모두 연평균 강우량이 1,000mm 이상인 다습한 지역에 위치한 매립장으로 확인되었다. 기존 연구에 따르면, 매립지내 함수율이 50~60% 범위에서 혐기성 반응이 원활이 이루어져서 메탄가스 발생이 극대화된다¹⁰⁻¹³⁾. 그런데 연평균 강우량이 너무 높은 지역에 위치한 매립장의 경우 매립지내 세척(용출) 효과로 인해 분해 가능한 유기물량이 감소하게 된 것으로 사료된다¹⁶⁾. 단, 6701번 프로젝트와 같이 연평균 강우량은 높으나 기후가 건조한 기간에 모니터링한 매립장의 경우 예측치와 실측치는 거의 유사한 수치를 나타내고 있다.

예측치보다 높은 매립가스 포집량을 보인 9건의 사례 가운데 3건은 예측치와 10% 이내로 큰 차이가 없었으며, 나머지 6건은 1.2배에서 2.8배까지 매립가스 포집량이 증가하였다. 6732번과 2834번 프로젝트의 경우에는 계획대비 매립물량이 증가함에 따라, 각각 19%, 32% 씩 증가된 것으로 확인되었다. 10379번 프로젝트의 경우, 모니터링 기간 동안 온도가 상승함에 따라 매립가스 포집량은 오히려 38% 상승된 것으로 모니터링 보고서는 추정하고 있었다. 그러나, 측정일수가 411일에 불과한 상황에서 다른 환경적 요인은 고려하지 않고 온도만으로 판단하는 것은 어려운 것으로 사료되며, 모델에 적용되는 배출계수 값이 IPCC 가이드라인에서 제시하는 기본 값을 적용하여 모델의 예측치에 대한 정확성이 낮다는 점이 주요한 이유가 될 수 있을 것으로 판단된다. 5238번, 5652번, 5130번 프로젝트의 경우에는 매립폐기물 내 유기성분 비율이 계획보다 증가함에 따라 실제 매립가스 포집량이 증가한 것으로 보고되어 있다.

3.2. 온실가스 감축량의 예측치와 실측치 분석

UNFCCC에 등록된 매립가스 프로젝트 중 모니터링을 수행한 18건 중 7건의 프로젝트는 사업 시행 전 예상 온실가스 감축량 대비 모니터링 후 감축량이 평균 53% 수준으로 감소하였다(Table 3). 반면에 나머지 11건의 프로젝트는 예상 감축량 대비 실제 감축량이 증가하였으며 평균 증가 비율이 130%에 달하였다.

예측치보다 낮은 온실가스 감축량을 보인 7건의 사례 가운데 4건은 매립가스 처리설비의 고장과 운전 미숙이 주요 원인이었으며, 3건은 다습하고 연평균 강우량이 높은 지역에 위치한 매립장의 경우로 매립지내 함수율이 과도하게 높아 메탄가스 발생량 저하에 따른 온실가스 감축량 감소가 원인인 것으로 파악되었다. 예측치의 35% 수준으로 가장 낮은 실측치를 나타낸 4503번, 6922번 프로젝트의 경우, 매립가스 발생량은 예측치와 비슷하게 실측되었으나, 소각기 운영 지연에 따라 실제 온실가스 감축량이 하락하였다. 1645번 프로젝트의 경우에도 매립가스 포집설비 및 발전기의 고장으로 매립가스 포집량도 감소되고 실제 온실가스 감축량도 감소되었다. 5130번 프로젝트의 경우에는 매립폐기물의 유기성분 비율 증가로 메탄가스 발생량은 예측치보다 훨씬 높게 발생했음에도 불구하고, 소각기 운영 미숙에 따라 포집량의 일부만 소각됨으로써 실제 온실가스 감축량은 하락하였다. 4610, 3663, 3937번 프로젝트의 경우, 연평균 강우량이 매우 높은 다습한 지역에 매립장이 위치하여 매립지내 함수율이 과도하게 높아짐에 따라 혐기성 반응이 저하되어 메탄가스 발생량이 감소하고 그에 따라 온실가스 감축량도 하락한 것으로 사료된다.

예측치보다 높은 온실가스 감축량을 보인 11건의 사례 중 5건은 예측치와 거의 유사한 실측치를 보였으며, 나머지 6건은 실제 매립량 증가, 유기성분 비율 증가, 온도상승 등의 이유로 예측치보다 증가된 감축량을 보였다. 5316, 4294, 6229, 2794, 6701번 프로젝트의 경우, 메탄의 지구온난화지수(GWP)가 등록시 21에서 모니터링시 25로 증가한 걸 고려하면 예측치와 실측치간에 거의 차이가 없는 것으로 분석된다. 5238, 6732, 6704, 5652번 프로젝트는 예측치보다 모니터링 시 실제 매립량이 증가하였고, 10379,

Table 3. Analysis of Predicted and Measured Values of GHG Reduction

Registered No	Climate	Humidity	Mean Annual Rainfall (mm)	Mean Annual Temp. (°C)	Predicted GHG Reduction (tCO ₂ e)	Measured GHG Reduction (tCO ₂ e)	Measured Value/ Predicted Value	Reasons
4503	Subpolar	Dry	845.0	14.1	35,836	12,575	35%	Malfunction
4610	Subpolar	Wet	1,200.0	14.5	74,825	32,843	44%	High precipitation
1645	Subpolar	Dry	205.3	16.4	75,419	37,868	50%	Malfunction
6922	Subpolar	Dry	126.1	13.1	116,054	66,470	57%	Malfunction
3663	Tropical	Wet	1,045.0	23.4	12,853	7,628	59%	High precipitation
3937	Subpolar	Wet	1,300.0	15.0	104,016	70,030	67%	High precipitation
5130	Subpolar	Dry	30.0	14.5	27,211	24,483	90%	Poor operation
5316	Subpolar	Dry	600.0	14.3	89,323	93,178	104%	Similar figures
4294	Subpolar	Dry	600.0	14.3	244,827	261,102	107%	Similar figures
6229	Subpolar	Dry	585.0	14.7	104,374	111,483	107%	Similar figures
2794	Subpolar	Wet	1,300.0	14.0	43,081	46,684	108%	Similar figures
6701	Subpolar	Dry	1,161.0	17.1	96,757	112,334	1161%	Similar figures
5238	Subpolar	Dry	804.0	14.8	160,309	201,897	1269%	Increase in landfilled amount and organic compound ratio
10379	Subpolar	Dry	1,343.0	11.3	27,805	35,438	128%	Increase in landfill Temperature
6732	Subpolar	Dry	711.0	14.2	93,311	119,665	128%	Similar when calibrating GWP
6704	Tropical	Wet	1,402.0	17.5	45,758	66,431	145%	Increase in landfilled amount
2834	Subpolar	Dry	600.0	14.3	229,973	345,265	150%	Increase in landfilled amount and temperature
5652	Subpolar	Dry	568.0	15.0	20,052	40,834	204%	Increase in landfilled amount

2834번 프로젝트는 예측치보다 모니터링 시 매립지 내 온도가 상승하여 예측치보다 높은 실측치를 보였다. 특히 예측치보다 2배 이상의 높은 실제 온실가스 감축량을 보인 5652번 프로젝트의 경우에는 실제 매립량이 증가되었을 뿐 아니라, 매립 폐기물 내의 유기성분 비율이 함께 증가함에 따라 매립가스 포집량과 메탄가스 농도가 각각 152%, 108% 증가되었으며, 온실가스 감축량도 204%의 높은 증가율을 보였다.

3.3. 매립가스 포집량 및 온실가스 감축량의 주요 영향인자

UNFCCC에 등록된 매립가스 CDM 프로젝트 중

모니터링이 수행된 18건 프로젝트에 대한 모니터링 보고서를 분석한 결과, 매립가스 포집량 및 온실가스 감축량에 영향을 미치는 주요 원인은 Table 4와 같이 유기성분 함량 증가(33%), 매립물량 증가(22%), 매립지내 온도 상승(11%)이 주요 원인으로 확인되었다¹⁵⁾.

열대 다습한 기후에 위치하고 연평균 강우량이 1,000mm 이상일 경우 매립가스 포집량의 예측치 대비 실측치는 감소되었다. 또한, 모니터링 기간 중에 매립지내 온도가 상승하거나 매립 폐기물내 유기성분 함량이 증가한 경우에는 매립가스 포집량이 급증하는 경향을 나타내었다.

그러나 매립가스 포집량이 증가한 경우에도 매립

Table 4. Ajoin Reasons Affecting the Amount of Landfill Gas Collection and GHG Reduction

Registered No	Mean Annual Rainfall (mm)	Mean Annual Temp. (°C)	Predicted LFG Volume (Nm ³ /y)	Measured LFG Volume (Nm ³ /y)	Predicted GHG Reduction (tCO ₂ e)	Measured GHG Reduction (tCO ₂ e)	Reasons
4503	845.0	14.1	1,836,356	1,945,539	35,836	12,575	Decreases in GHG reduction due to delayed operation of incinerations with similar methane gas generation
4610	1,200.0	14.5	4,509,959	3,620,368	74,825	32,843	Decreases in both LFG collection and GHG reduction due to high precipitation
1645	205.3	16.4	9,453,807	5,906,981	75,419	37,868	Decreases in LFG collection due to frequent malfunction of collection facilities Decreases in GHG reduction due to frequent malfunction of generators
6922	126.1	13.1	6,932,831	7,223,258	116,054	66,470	LFG collection measured similar to the predicted amount GHG reduction was less due to unstable operation of power generation facilities.
3663	1,045.0	23.4	1,403,555	1,121,875	12,853	7,628	Decreases in both LFG collection and GHG reduction due to high precipitation
3937	1,300.0	15.0	8,155,321	6,841,580	104,016	70,030	Decreases in both LFG collection and GHG reduction due to high precipitation
5130	30.0	14.5	1,453,901	3,999,178	27,211	24,483	Increases in LFG collection due to increases in organic compound ratio GHG reduction was less due to partial incineration of captured LFG caused by poor operation of incinerators.
5316	600.0	14.3	9,193,549	8,996,607	89,323	93,178	Similar to the predicted amount
4294	600.0	14.3	31,446,262	34,203,310	244,827	261,102	Similar to the predicted amount
6229	585.0	14.7	11,059,988	10,822,475	104,374	111,483	In consideration of the increases in the Global Warming Potential(GWP) of methane from 21 to 25, there is no significant difference from the predicted amount of 95,767 tCO ₂ e
2794	1,300.0	14.0	7,468,790	6,167,820	43,081	46,684	Decreases in LFG collection due to high humidity and precipitation Slight increases in GHG reduction due to slight increases in landfilled amount
6701	1,161.0	17.1	11,447,362	11,232,376	96,757	112,334	Similar as the average precipitation
5238	804.0	14.8	13,433,733	18,964,477	160,309	201,897	Increases in actually landfilled amount Increases in organic compound ratio
10379	1,343.0	11.3	3,856,045	5,332,520	27,805	35,438	Increases in the amount of methane gas generated due to temperature rise during the monitoring period
6732	711.0	14.2	10,888,683	13,003,899	93,311	119,665	In consideration of the increases in the GWP of methane from 21 to 25, there are increases by 9.8% Increases in landfilled amount
6704	1,402.0	17.5	5,188,752	3,247,498	45,758	66,431	Decreases in LFG collection due to high precipitation Increases in GHG reduction due to increases in landfilled amount
2834	600.0	14.3	29,037,959	38,439,208	229,973	345,265	Increases in LFG collection due to temperature rise Increases in GHG reduction due to Increases in actually landfilled amount
5652	568.0	15.0	9,907,265	15,106,172	20,052	40,834	Increases in LFG collection due to increases in organic compound ratio Increases in GHG reduction due to Increases in actually landfilled amount

가스 포집설비나 소각, 발전설비의 안정적인 운영과 유지관리가 되지 않은 경우에는 프로젝트 시행 전 예상 온실가스 감축량 대비 모니터링 후 감축량은 53% 수준으로 감소하였다. 실제 온실가스 감축량이 늘어난 11건 중 2건은 대한민국에서 수행한 프로젝트이고, 9건이 중국으로 11건 모두 소득수준이 비교적 높아 설비의 안정적인 운영이 가능한 국가들에서 추진된 사례들로 확인되었다.

따라서 적절한 수준의 함수율, 온도, 유기물 함량 관리를 통해 메탄가스의 안정적인 농도와 포집량을 유지하면서 매립가스 처리설비의 적절한 유지관리만 보장된다면 매립가스 CDM 등록사업의 성공적인 추진과 함께 파리협약에 따른 개발도상국의 온실가스 감축에도 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 UNFCCC에 등록된 매립가스 CDM사업 46건 중에 모니터링을 수행한 18건의 매립가스 포집량과 온실가스 감축량에 대한 예측량과 발생량의 차이를 비교하고, 주요 원인을 분석하였다. 분석 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 매립가스 포집량의 예측치와 실측치 분석 결과, 목표치 대비 예측치가 감소한 사례는 50%로 포집량은 평균 83% 감소되었다. 감소된 프로젝트의 66%가 연평균 강우량이 1,000mm 이상인 매립장으로 높은 강우량이 메탄가스 발생에는 부정적인 영향을 미치는 것으로 사료된다. 증가한 사례도 동일하게 50%로 포집량은 평균 141% 증가하였다. 증가된 프로젝트의 33%는 유기성분 비율증가, 22%는 매립물량 증가, 11%는 매립지 내부온도 증가가 주요 원인으로 분석되었다.
2. 온실가스 감축량의 예측치와 실측치의 분석 결과, 목표치 대비 예측치가 감소한 사례는 39%로 감축량은 평균 53% 감소되었으며, 감소된 프로젝트의 57%는 설비의 고장과 운전미숙이 원인이었다. 증가한 사례는 61%로 감축량은 평균 130% 증가하였고, 36%는 매립물량 증가,

18%는 매립지내 온도상승, 9%는 유기성분 비율증가가 주요 원인으로 분석되었다.

3. 매립가스 포집량 및 온실가스 감축량에 영향을 미치는 주요인자는 강우량(28%), 설비고장(22%), 유기성분 함량(11%), 매립물량(11%), 매립지내 온도(11%) 순으로 확인되었다.

본 연구는 UNFCCC 모니터링 보고서를 토대로 분석함에 따라, 매립폐기물의 성상, 함수율, 매립연령, 매립지 사용종료 여부, 복토층 상태, 매립가스 조성등과 같은 직접적인 특성이 매립가스 발생에 미치는 영향에 대한 분석에는 한계가 있었다. 그러나 매립장 CDM 등록사업 중 모니터링을 수행한 사업을 기준으로 매립물량, 유기성분 함량과 같은 직접적인 요인 이외에도, 온도, 기후, 습도, 강우량 등 간접적인 요인이 매립가스 포집량과 온실가스 감축량에 미치는 영향이 매우 크다는 점을 확인할 수 있었다. 이에, 동 연구의 결과는 향후 개도국에서 수행하고자 하는 매립가스 CDM 사업 추진 시 예측치에 영향을 주는 인자들을 사전에 고려하여, 온실가스 감축량 예측이 과소 내지 과대평가 되는 가능성을 최소화할 수 있는 기초자료로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

향후, 동 연구를 통해 분석된 프로젝트의 사례와 유사한 온도, 기후, 습도, 매립물량, 유기성분 함량과 유사한 프로젝트에 대한 사례를 가지고 다각적인 온실가스 감축량 산정방법(IPCC FOD, LandGEM, BMP 테스트 등)으로 분석하여 비교해 보면, 보다 정확한 온실가스 감축량을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

References

1. Agreement, P., "Paris agreement", Report of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change, 4, pp. 743. (2015).
2. Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P. and Van Woerden, F., "What a waste 2.0: a global snapshot of solid

- waste management to 2050”, The World Bank. pp. 1~6. (2018).
3. Ghosh, P., Shah, G., Chandra, R., Sahota, S., Kumar, H., Vijay, V. K. and Thakur, I. S., “Assessment of methane emissions and energy recovery potential from the municipal solid waste landfills of Delhi, India”, *Bioresour. Technol.*, 272, pp. 611~615. (2019).
 4. Da Silva, N. et al., “First order models to estimate methane generation in landfill: A case study in south Brazil”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), pp. 104053. (2020).
 5. Breno, C. D. O., Ramos, J. R. D. S., de Sousa Silva, R., Cattanio, J. H., do Couto, L. L. and Mitschein, T. A., “Estimates of methane emissions and comparison with gas mass burned in CDM action in a large landfill in Eastern Amazon”, *Waste Manag.*, 101, pp. 28~34. (2020).
 6. Maria, C., Góis, J. and Leitão, A., “Challenges and perspectives of greenhouse gases emissions from municipal solid waste management in Angola”, *Energy Reports*, 6, pp. 364~369. (2020).
 7. Yaman, C., “Investigation of greenhouse gas emissions and energy recovery potential from municipal solid waste management practices”, *Environ. Dev.*, 33, pp. 100484. (2020).
 8. Yaman, C., Anil, I. and Alagha, O., “Potential for greenhouse gas reduction and energy recovery from MSW through different waste management technologies”, *J. Clean. Prod.*, 264, pp. 121432. (2020).
 9. USEPA (US Environmental Protection Agency), “LFG Energy Project Development Handbook”, (2017).
 10. Won, S. H. and Park, D. W., “Effect of Leachate Recirculation LFG Generation Characteristics”, *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 26(2), pp. 19~32. (2018).
 11. Lee, D. H., Behera, S. K., Kim, J. W. and Park, H. S., “Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: A lab-scale study”, *Waste Management*, 29(2), pp. 876~882. (2009).
 12. Poland, F. G. and Harper, S. R., “Critical review and summary of leachate and gas production from landfills”, EPA/600/2-86/073, U.S. EPA, (1985).
 13. Park, J. K. and Lee, N. H., “The effect of water content change on methane generation in landfills”, *Journal of the Korean Society for Waste and Recycling of Waste Resources*, pp. 71~71. (2017).
 14. Jeong, J. H., Jeong, S. Y., Moon, D. H. and Jang, S. W., “Evaluation of anaerobic digestion characteristics and efficiency of various organic wastes”, *Journal of the Korean Society for Waste Recycling*, 33(6), pp. 621~627. (2016).
 15. UNFCCC CDM Project Search, <https://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html> [Accessed 15 March 2020].
 16. Karanjekar, R. V., Bhatt, A., Altouqui, S., Jangikhatoonabad, N., Durai, V., Sattler, M. L. and Chen, V. “Estimating methane emissions from landfills based on rainfall, ambient temperature, and waste composition: The CLEEN model”, *Waste Management*, 46, pp. 389~398. (2015).