creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

이학석사 학위논문

기상 특성을 반영한 매립지 메탄 발생량 산정모델 개선

Improving the estimation of landfill methane generations based on meteorological characteristics

2023년 8월

서울대학교 환경대학원

환경계획학과 환경관리학전공

김 동 희

기상 특성을 반영한 매립지 메탄 발생량 산정모델 개선

지도교수 정 수 종

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함
2023년 8월

서울대학교 환경대학원
환경계획학과 환경관리학전공
김 동 희

김동희의 이학석사 학위논문을 인준함
2023년 8월

위 원 장

부위원장

위 원

국문 초록

폐기물 매립지는 주요 인위적 메탄 배출원 중 하나로 기후변화 완화를 위한 효율적인 메탄 관리를 위해 폐기물 매립에 의한 메탄 배출량의 정확한 산정이 우선되어야 한다. 매립지에서 폐기물이 분해되며 발생하는 메탄은 폐기물량과 성상뿐만 아니라 온도, 강수량 등 매립지 주위 기상 조건에 영향을 많이 받는다. 기존의 매립지 메탄 발생량을 추정하는 수치 모델인 FOD(First order decay) 모델과 LandGEM(Landfill generation emission model) 모델은 매립지 주위 기상 조건을 단순화하여 반영해 연간 발생량을 산정하며, CLEEN(Capturing Landfill Emissions for Energy Needs) 모델은 온도와 강수량을 반영하지만, 해외 일부 매립지에 대해 보정 하였기 때문에, 국내 매립지에 적용하기 적합하지 않다. 본 연구에서는 CLEEN 모델을 수도권매립지 제1 매립장의 현장 특성을 반영하여 국내에 최적화된 메탄 발생량 산정모델인 'CLEEN_k'로 개선하였다. 매립지 메탄 발생량을 산정하는데 중요한 계수 중 하나인 메탄 발생 속도 상수 k를 폐기물 분해 실험을 기반으로 k_{lab}과 수도권매립지 제1 매립장의 계절별 현장 측정량(강제 포집량, 표면발산량, 간이 소각량)을 기반으로 k_{actual}을 산정한다. 그리고 현장 측정량이 없는 기간에 대해 계수를 결정하기 위해 다중 선형회귀로 산출된 보정 식 $F_{SU,k}$ (R^2=0.84)로 보정한 k_{adj}로 메탄 발생량을 산정하였다.

연구 결과, 현장 측정 기간인 2005년부터 2019년까지 CLEEN_k로 산정한 총 메탄 발생량은 294 백만 m^3이며, 현장 측정량의 총 메탄 발생량과 차이가 약 6% 발생하여 다른 모델들이 현장 측정량과의 차이가 32%~ 198% 발생하는 것에 비해 작은 차이를 보였다. 또한 현장 측정량과의 RMSE가 다른 모델에 비해 6.5%~ 560% 작게 계산되어 현장 측정량을 가장 잘 모의하는 것으로 나타났다. CLEEN_k 모델을 국내 다른 매립지에 적용한 결과 현장 측정량과 가장 유사하였으며, 국가 인벤토리와 비교하였을 때도 CLEEN_k가 현장 측정량에 가장 근접하였다. RCP 미래 기후 시나리오를 반영해 메탄 발생량을 산정한 결과 기온과 강수량 변화가 가장 클 것으로 예상되는 RCP 8.5 시나리오에서 가장 많은 메탄 발생량이 예상되었으며, 기후변화에 따른 온도와 강수량 변화를 고려한 매립지 메탄 발생량 산정의 필요성을 확인하였다.

주요어 : 매립지, 메탄, 폐기물, 모델
학번 : 2021-27213

목 차

Ⅰ. 서론 ····· 1
1. 연구 배경 및 목적 ····· 1

Ⅱ. 연구의 방법 ····· 7
2.1 연구 대상 ····· 7
2.2 활동자료 ····· 9
2.3 매립지 현장 측정 ····· 11
2.4 매립지 메탄 발생량 산정 ····· 13
2.4.1 CLEEN 모델 ····· 14
2.4.2 CLEEN_k 모델 ····· 16
2.4.3 FOD 모델 ····· 20
2.4.4 LandGEM 모델 ····· 21

Ⅲ. 연구 결과 ····· 23
3.1 CLEEN_k 산정 결과 ····· 23
3.1.1 수도권매립지 제1 매립장 k_{lab}, $F_{SU,k}$, k_{adj} 산정 결과 ····· 23
3.1.2 메탄 발생량 산정 결과 ····· 25
3.1.3 모델의 불확도 ····· 28
3.2 모델 간 메탄 발생량 비교 ····· 29
3.2.1 계절별 메탄 발생량 비교 ····· 29
3.2.2 연간 메탄 발생량 비교 ····· 31
3.3 미래 메탄 발생량 시나리오 ····· 36
3.4 CLEEN_k 모델 적용성 평가 ····· 42
3.4.1 수도권매립지 제2 매립장 적용성 평가 ····· 44

3.4.2 난지도 매립지 적용성 평가 ····· 49
3.5 국가 온실가스 인벤토리와 비교 ····· 54

Ⅳ. 결론 및 토의 ····· 58
참고문헌 ····· 61
Abstract ····· 67

표 목 차

[표 1] 수도권매립지 제1 매립장 특징 ····· 7
[표 2] 연간 폐기물 매립량, 누적 매립량, 폐기물 종류별 조성비 ····· 9
[표 3] 발생량 산정에 활용된 활동자료와 기간 및 출처 ····· 10
[표 4] 계절별 매립가스 현장 조사 시기 및 배출경로별 조사지점 수 ····· 11
[표 5] 매립지 메탄 발생량 산정 모델간 특성 비교 ····· 13
[표 6] 연도별 총 메탄 발생량과 전년 대비 증감률 ····· 25
[표 7] 수도권매립지 제1 매립장 계절별 현장 측정량 및 CLEEN_k 모델 산정량 27
[표 8] 활동자료별 불확도 범위 ····· 28
[표 9] 수도권매립지 제1 매립장 CLEEN_k와 CLEEN 모델 산정량 비교 ····· 31
[표 10] 수도권매립지 제1 매립장 모델별 산정량 및 RMSE 비교 ····· 34
[표 11] 시나리오별 기간별 평균 기온 및 강수량 ····· 37
[표 12] 시나리오별 기간별 예상 누적 메탄 발생량 및 이전 기간 대비 증가량 ··· 38
[표 13] 수도권매립지 제2 매립장 CLEEN_k와 CLEEN 모델 산정량 비교 ····· 45
[표 14] 수도권매립지 제2 매립장 모델별 산정량 및 RMSE 비교 ····· 47
[표 15] 난지도 매립지 발생량 산정에 활용된 활동자료와 기간, 자료의 불확도 및 출처 ····· 49
[표 16] 난지도 매립지 CLEEN_k와 CLEEN 모델 산정량 비교 ····· 51
[표 17] 난지도 매립지 모델별 산정량 비교 ····· 53
[표 18] 연도별 CLEEN_k 산정량, 인벤토리, 현장 실측량 비교 ····· 57

그 림 목 차

[그림 1] 수도권매립지 위치, 매립장별 매립 진행 상황 ····· 8
[그림 2] CLEEN_k 모델 산정 흐름도 ····· 17
[그림 3] 계절별 온도와 강수량에 따른 klab 변화 ····· 23
[그림 4] 계절별 온도와 강수량에 따른 kadj 변화 ····· 24
[그림 5] 계절별 현장 측정량과 모델 산정량 비교 ····· 29
[그림 6] 모델별 현장 측정량과 연간 메탄 발생량 비교 ····· 32
[그림 7] 수도권매립지 제1 매립장 모델별 현장 측정량과의 RMSE 비교 ····· 35
[그림 8] RCP 미래 시나리오에 따른 기온, 강수량, 메탄 발생량 변화 ····· 40
[그림 9] 시나리오별 2100년까지 누적 메탄 발생량 ····· 41
[그림 10] 인천 수도권매립지와 서울 난지도 매립지 위치 ····· 42
[그림 11] 난지도 매립지 위치 ····· 43
[그림 12] 수도권매립지 제2 매립장 계절별 모델별 현장 측정량과 메탄 발생량 비교 ····· 44
[그림 13] 수도권매립지 제2 매립장 연간 모델별 현장 측정량과 메탄 발생량 비교 46
[그림 14] 수도권매립지 제1 매립장 모델별 현장 측정량과의 RMSE 비교 ····· 48
[그림 15] 난지도 매립지 가스 포집량과 계절별 모델별 메탄 발생량 비교 ····· 50
[그림 16] 난지도 매립지 가스 포집량과 연간 모델별 메탄 발생량 비교 ····· 52
[그림 17] CLEEN_k 모델로 산정한 배출량과 국가 온실가스 인벤토리, 현장 실측값 비교 ····· 55

수 식 목 차

[식 1] ····· 14
[식 2] ····· 15
[식 3] ····· 15
[식 4] ····· 15
[식 5] ····· 18
[식 6] ····· 18
[식 7] ····· 19
[식 8] ····· 19
[식 9] ····· 20
[식 10] ····· 21
[식 11] ····· 21
[식 12] ····· 21
[식 13] ····· 21
[식 14] ····· 22
[식 15] ····· 24
[식 16] ····· 54

Ⅰ. 서론

1. 연구 배경 및 목적

메탄은 IPCC에서 규정하는 6대 온실기체 중 하나로 전 세계 온실가스 배출량의 약 20%를 차지한다(US EPA, 2022). 지난 30년간 메탄 농도는 1990년 1714.5 ppb에서 2020년 1878.9 ppb로 약 10% 상승하였다(IPCC, 2021). 또한, 연간 메탄 배출량의 증가량은 1990년 8.75 ppb에서 2021년 17ppb로 빠른 속도로 증가하고 있으며, 매년 증가율도 점차 커지고 있다(Lan et al., 2023). 산업화 이후 대기 중 추가로 배출된 메탄은 전 지구 기온의 0.5℃가량 상승에 기여하였을 것으로 예상된다(IPCC, 2021).

최근 기후변화 완화와 탄소중립 달성을 위해 메탄 감축에 관한 전 세계적 관심이 증가하고 있다(IPCC, 2014; Dlugokencky et al., 2011). 메탄은 대기에 약 10년간 체류하며 대기 중 5년에서 최대 200년까지 체류하는 이산화탄소에 비해 짧지만, 20년을 기준으로 약 80배, 100년을 기준으로 약 30배 강한 복사강제력을 가지고 있다(IPCC, 2021). 따라서, 대기 중 메탄 농도를 저감하는 것은 이산화탄소보다 기후변화 완화 효과가 더 크고 즉각적이다(Collins et al., 2018).

2021년 개최된 제26차 기후변화 당사국총회(The 26th session of the Conference of the Parties, COP26)에서는 우리나라를 포함한 105개국이 전 세계에서 배출되는 메탄 배출량을 2030년까지 2020년 대비 최소 30% 감축하는 ‘글로벌 메탄 서약(Global Methane Pledge)’에 합의하였다. 이에 근거하여 메탄 감축을 위한 정책 수립 및 정책 효과 모니터링을 위해서는 주요 메탄 배출원을 파악하고, 메탄 배출량의 정확한 산정이 우선적으로 수행되어야 한다(온실가스 종합정보센터, 2022). 하지만 우리나라는 아직 정확한 메탄

배출원과 배출량에 대한 이해가 부족한 실정이다.

대기 중 메탄 등의 온실가스 배출량을 산정하는 방법에는 상향식(Bottom-up) 방법과 하향식(Top-down) 방법이 있다(Nisbet et al., 2010). 상향식 방법은 통계자료와 수치 모델을 기반으로 온실가스 배출량을 정량화하는 방법이며, 상향식 방법으로 산출된 배출량을 온실가스 인벤토리라고 한다(Eggleston et al., 2006). 이러한 온실가스 인벤토리는 활동자료(Activity data)와 배출계수(Emission factor)를 이용하여 산정된다. 활동자료는 인구수, 가스, 전력 사용량 등과 같은 온실가스를 발생시키는 인간 활동의 통계자료를 말하며, 배출계수는 단위 활동 당 배출량을 정량화하는 계수(예, Gg CH_4/천연가스 사용량 m^3)를 말한다.

우리나라는 온실가스 종합정보센터에서 매년 '국가 온실가스 인벤토리 보고서(National Inventory Report)'를 발간하며 국가 온실가스 인벤토리를 공개하고 있다(온실가스 종합정보센터, 2022). 국가 온실가스 인벤토리 보고서는 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서 제안하는 '국가 온실가스 인벤토리에 대한 2006 IPCC 가이드라인(2006 IPCC 가이드라인)' 기준에 따라 산정되고 있다. 2023년 기준 가장 최근에 발간된 '2021 국가 온실가스 인벤토리 보고서'에는 1990년부터 2019년까지의 국가 온실가스 인벤토리 정보가 수록되어 있다. 국가 온실가스 인벤토리 보고서는 배출량 산정까지 2년의 지연시간이 필요하므로, 온실가스 배출량 변화를 즉각적으로 파악하는데 한계가 있다. 따라서 온실가스 감축 정책의 효과를 파악하기 위하여 지연시간을 줄이는 방법을 도입해야 할 필요성이 있다.

하향식 방법은 항공관측, 위성 관측, 이동 관측, 고정관측 등을 수행하여 현장의 온실가스 배출량을 측정하거나, 대기 수송 모델링을 통해 온실가스 배출량을 산정하는 방법이다(Nisbet and Weiss, 2010). 하향식 방법은

배출원에서 배출되는 온실가스를 직접 관측하는 방법으로 상향식 방법에서 예상하지 못하는 온실가스 배출을 감지할 수 있지만 모든 시공간 범위에 대한 관측을 진행할 수 없어, 감지된 배출원을 정확하게 식별하기 어렵다(Allen, 2014). 상향식 방법과 하향식 방법은 상호 보완적인 관계이며, 정확한 온실가스 배출량 및 배출원 파악을 위해 두 가지 방법이 모두 병행되어야 한다. 그러나 우리나라는 메탄에 대한 인벤토리 정보가 미비하기 때문에, 하향식 방법을 사용하기에 앞서 부문별로 배출원과 배출량의 시간 변동성을 확인할 수 있는 상향식 방법에 기반한 정확하고 즉각적인 메탄 인벤토리가 산정되어야 한다(Tchepel et al., 2012; Celho et al., 2014; Dias et al., 2018).

메탄 배출량은 국가 온실가스 인벤토리 보고서에서 폐기물 매립, 벼재배, 가축 장내 발효, 천연가스 탈루 부문으로 구분되어 산정되고 있다. 그 중 폐기물 매립 부문은 전체 메탄 배출량의 28.5%(7,732.24 Gg CO_2 eq)로 가장 많은 부분을 차지하고 있다(온실가스 종합정보센터, 2022). 폐기물 매립 부문에서 메탄 배출량은 메탄가스 강제 포집, 매립지 복토층 개선 등과 같은 메탄 배출량 저감기술로 관리가 용이하며, 배출량 저감이 즉각적으로 반영될 여지가 존재한다(Huber-Humer et al., 2008; Robertson, 2017; Qin et al., 2022). 따라서 효율적인 메탄 배출원 관리를 위해서는 폐기물 매립에 의한 메탄 배출량 관리가 우선되어야 할 필요가 있다(온실가스 종합정보센터, 2022; Kumar et al., 2004).

매립지에 매립된 폐기물은 혐기성 상태에서 미생물에 의해 분해되어 매립가스(LFG, Landfill gas)가 발생하게 된다. 매립가스는 메탄, 이산화탄소, 산소, 질소 등으로 구성되어 있으며 그 중, 메탄은 약 50%를 차지하고 있다(Eklund et al., 1998). 국가 온실가스 인벤토리 보고서에서는 매립가스 중 메탄이 차지하는 양을 메탄 발생량으로 정의하고 있다(Eggleston et al., 2006). 매립가스는 매립이 종료된 이후에도 최대 100년 동안 발생할 수

있어(Huber-Humer et al., 2009) 폐기물 매립지에서 발생하는 메탄 발생량을 정확히 파악하고 관리할 필요가 있다.

매립된 전체 폐기물 중 혐기적으로 분해 가능한 물질로부터 발생하는 모든 메탄을 메탄 발생량(CH_4 generated)이라고 하며, 메탄 발생량 중 CO_2로 산화되는 양과 강제 포집을 통해 회수되는 회수량을 제외한 양을 메탄 배출량(CH_4 emission)이라고 정의한다(Eggleston et al., 2006). 폐기물 매립지에서의 메탄 발생량을 산정하는 방법은 현장 측정 방법과 모델을 활용한 추정 방법이 있다. 폐기물 매립지의 메탄 발생량은 강제 포집량(회수량), 간이 소각량(가스 배제공 발생량), 표면발산량으로 구분된다. 현장 측정 방법은 매립지 현장에서 강제 포집량, 간이 소각량, 표면발산량 각각의 매립가스 배출경로에 따른 가스 발생량을 직접 측정하는 방법이다(이우원, 2020). 강제 포집량은 회수량이라고도 하며, 매립지에 설치·분포되어 있는 수직 가스 포집정에서 포집되어 매립가스 자원화 시설에서 회수되는 메탄가스 양을 말한다. 수직 가스 포집정에서 포집되지 않는 메탄가스는 가스 배제공을 통해 대기로 배출될 수 있다. 이를 관리하기 위하여 가스 배제공에 간이소각기를 설치하여 메탄가스를 연소시키며, 이를 가스 배제공 발생량 또는 간이 소각량이라고 한다. 매립지에서 발생한 여분의 메탄가스는 매립지 상부의 토양 공극 사이를 통과하여 대기 중으로 배출된다. 이를 표면발산량이라고 하며, 매립지 표면에서 플럭스 챔버(flux chamber) 실험으로 측정된다(수도권매립지관리공사, 2022; 이우원, 2020). 현장 측정 방법은 시공간의 제약과 인력의 한계로 인해 매립지 전체 면적에 대해 수행되기 어렵다. 따라서 매립지의 메탄 발생량을 정확하게 산정하기 위해서는 현장 측정 방법을 통해 측정된 현장 실측값을 모델에 활용하는 것이 필요하다.

모델을 활용하여 메탄 발생량을 추정하는 방법은 LandGEM (Landfill Generation Emission Model), CLEEN (Capturing Landfill Emissions for Energy Needs) 등이 있으며, 이는 폐기물 분해 속도를 1차 분해 반응으로 가정하는 수치 모델 FOD (First Order Decay)를 기반으로 한다. FOD 모델은 IPCC에서 제시하였으며, 세계적으로 매립지 메탄 배출량 산정에 많이 사용되고 있다(박진규, 2012). FOD 모델은 폐기물 매립량, 매립 폐기물 성상, 매립 경과 시간, 분해 가능한 유기탄소(Degradable organic carbon, DOC), 메탄 발생 속도 상수(k)를 입력변수로 하여 메탄 발생량을 추정한다. DOC는 생화학적으로 분해 가능한 폐기물 내 유기탄소를 뜻하며, 폐기물 조성에 근거하여 산정된다. DOC는 메탄 발생 잠재량(L_0)으로 표현될 수 있다. IPCC는 FOD 모델에 적용되는 매립지 유형(관리된 매립지, 관리되지 않는 매립지)과 기후대(아한대, 온대, 열대, 건조, 습윤)에 따른 기본 계수를 제시하고 있다. 또한 우리나라는 국가 온실가스 인벤토리 폐기물 부문 메탄 배출량 산정에 FOD 모델을 활용하고 있으며, 온실가스 종합정보센터에서 일부 항목에 대해 FOD 모델에 적용할 수 있는 COD와 k의 국가 고유 배출계수를 제시하고 있다(한국환경공단, 2017; 이남훈 등, 2009; Eggleston et al., 2006).

LandGEM 모델은 EPA (Environmental protection agency)에서 제안하였으며, FOD와 달리 메탄 배출량 계산 시 매립 폐기물의 성상을 고려하지 않으며, 폐기물 매립량만으로 메탄 발생량을 산정할 수 있는 모델이다. LandGEM 모델은 상용화에 초점을 맞춘 모델로 매립지 CDM(Clean development mechanism, 청정개발체제) 사업에서 매립지를 평가할 때 많이 사용되고 있다(이남훈 등, 2009; US EPA, 2005). LandGEM에서 사용되는 기본 계수인 L_0와 k는 LandGEM 모델 내에서 매립지 환경(온대지방의 전통적 매립지(conventional), 건조 매립지(arid), 습식 매립지(wet))에 따라 선택하여 산정이 가능하다(Thorneloe et al., 1999; US EPA, 2005).

선행연구에 따르면, 대기와 토양 온도가 증가하면 메탄 산화가 활성화되며 매립지 메탄 발생량이 증가하고(Tecle et al., 2009), 강우량이 증가하면 토양 내 수분 증가로 메탄 발생량이 증가하였다(Schroth et al., 2012). 이는 온도와 강수량에 따라 미생물에 의한 폐기물 분해 속도가 달라져 메탄가스 발생량에 차이가 발생하기 때문이다(Chakma, 2007; Alvarez and Martinez-Viturtia, 1986; Mehta et al., 2002). 따라서 메탄 발생 속도 상수 k는 폐기물 구성, 입자 크기, 수분, 온도, pH에 영향을 받는다(Barlaz et al., 1990; Machado et al., 2009). 일반 토양과 달리 매립지는 인위적으로 폐기물을 쌓아 올리고 복토를 덮기 때문에, 대기 중 기상 조건이 매립지 깊은 곳까지 토양 미생물의 활동에 영향을 줄 수 있다(Gebert et al., 2011). 기존의 FOD 모델과 LandGEM 모델은 계수 k를 매립지 환경에 따른 고정값을 활용하고 있다. 기존 모델은 미생물의 활동에 큰 영향을 미치는 온도와 강수 같은 기상 특성을 모델에 반영할 수 없어, 모델 결과는 실제 메탄 배출량 값과 차이가 날 것으로 추정된다(Delkash et al., 2022). 또한 상기 모델은 연 단위의 폐기물 매립량을 입력받아 연간 메탄 발생량이 산정되기 때문에, 상세한 시간 규모에서 변화하는 메탄 발생량을 파악할 수 없다는 한계가 있다. 따라서 정확도 높은 매립지 메탄 발생량 산정을 위해서는 온도와 강수량을 반영하여 메탄 발생량을 산정하는 것이 필요하다(Karanjekar et al., 2015). 특히, 우리나라와 같이 사계절에 따라 기온과 강수가 뚜렷한 특성을 가지는 지역은 온도와 강수량의 변화에 따라 매립지의 메탄 발생량도 변화한다. 이에 따라 메탄 감축을 위한 정확한 메탄 발생량 파악을 위해 기상 특성을 고려하여 매립지 메탄 인벤토리를 산정할 필요가 있다.

CLEEN(Capturing Landfill Emissions for Energy Needs) 모델은 FOD와 LandGEM을 개선한 모델로, 매립지 온도와 강수량을 반영하여 발생량을 산정할 수 있다(Karanjekar et al., 2015). 상기 연구는 CLEEN 모델 구축을 위해 실험실

환경에서 미생물의 폐기물 분해 반응 실험을 통해 여러 기상 조건에 따른 폐기물 분해 속도에 대한 관계식을 산출하였다. CLEEN 모델은 해당 실험 결과를 토대로 기상 조건에 따른 메탄 발생 속도 상수 k를 활용하여 메탄 발생량을 산정한다. 하지만 CLEEN 모델에서 제시하는 메탄 발생 속도 상수 k는 미국, 캐나다, 이스라엘의 11개 매립지 특성을 반영하여 산출하였기 때문에 국내 매립지에 적용하기에 적합하지 않다.

따라서, 본 연구는 국내 매립지에 최적화된 계절별 기상 특성을 반영한 메탄 발생량 산정 방법을 제시하고자, CLEEN 모델을 개선하여 우리나라 매립지의 현장 실측 데이터와 기상 관측 자료를 기반으로 계절별 1차 분해 상수를 산정하고, 기상 조건에 따른 매립지 메탄 발생량을 산출하는 방식을 제안한다.

Ⅱ. 연구의 방법

2.1 연구 대상

본 연구의 연구 대상지는 수도권매립지의 제1 매립장으로 선정하였다. 수도권매립지는 인천광역시 서구에 위치하며, 서울특별시, 인천광역시, 경기도의 수도권 지역 64개 시·군·구에서 배출되는 폐기물을 처리하고 있다. 수도권매립지는 국내 최대 규모의 매립지로 총 4개의 매립장으로 구성되어 있다. 그 중, 제1 매립장은 1992년 2월부터 2000년 10월까지 409만 m^2 부지면적 중 251만 m^2 면적에 6,425만 톤의 폐기물이 위생 매립 방식으로 매립되었다. 매립지는 4.5m 폐기물 층 위에 0.5m의 복토층이 한 단을 이루어 총 8단으로 이루어져 있으며 높이가 40m에 이른다. 매립 종료 이후 매립지에서 발생하는 매립가스는 포집되어 매립가스 자원화 시설의 50MW의 발전시설 통해 발전 연료로 사용하고 있다(수도권매립지관리공사, 2021). 수도권매립지는 국내 최대 규모이자 일일 폐기물 매립량이 20,000톤/일로 세계 1위, 매립지 면적이 2.51 km^2로 세계 6위를 차지하고 있어, 세계적으로도 상당한 규모를 가지고 있다(Statista Search Department, 2023a, 2023b). 수도권매립지 제1 매립장의 특징은 <표 1>과 같다.

<표 1> 수도권매립지 제1 매립장 특징

폐기물 반입 기간	매립 종류	매립지 상태	부지면적	매립 면적	매립지 높이	매립된 폐기물량
1992년 2월 ~ 2000년 10월(9년)	관리형 위생 매립	매립 종료	4.09 km^2	2.51 km^2	40m (8단)	6,425만 ton

<그림 1>은 수도권매립지의 위치와 2023년 기준 매립장별 매립 진행 상황을 나타내었다.

<그림 1> 수도권매립지 위치, 매립장별 매립 진행 상황

2.2 활동자료

본 연구는 수도권매립지 제1 매립장의 연도 및 월별 폐기물 매립량, 폐기물 매립 성상, 계절별 현장 메탄 측정량, 매립지 주변 기상 정보를 활용하였다. 폐기물 매립량은 매립 시작 시기(1992년 2월)부터 1999년 7월까지는 수도권매립지관리공사 통계연감의 연간 폐기물 매립량을 사용하였으며, 1999년 8월부터 매립 종료 시기(2000년 10월)까지는 수도권매립지관리공사의 월별 반입 폐기물량 데이터를 사용하였다.

수도권매립지 제1 매립장의 폐기물 매립 성상은 1999년부터 반입폐기물에 대한 물리적 조성 정보가 수집되었다. 따라서, 폐기물 매립 성상은 제1 매립장의 운영 기간에 해당되는 1999년과 2000년에 수집된 폐기물 종류별 조성비를 평균하여 사용하였다. 수도권매립지 제1 매립장의 연간 폐기물 매립량과 누적 매립량 및 폐기물 종류별 조성비는 <표 2>와 같다.

<표 2> 연간 폐기물 매립량, 누적 매립량, 폐기물 종류별 조성비

연도	연 매립량 (Gg/year)	누적 매립량 (Gg)	폐기물 종류별 조성비(%)							
			음식물	종이	플라스틱	목재	고무·가죽	섬유	기타	불연성
1992	2,677.47	2,677.47	-	-	-	-	-	-	-	-
1993	8,684.91	11,362.38	-	-	-	-	-	-	-	-
1994	11,250.41	22,612.79	-	-	-	-	-	-	-	-
1995	9,083.91	31,696.7	-	-	-	-	-	-	-	-
1996	8,461.78	40,158.47	-	-	-	-	-	-	-	-
1997	7,519.72	47,678.19	-	-	-	-	-	-	-	-
1998	6,431.45	54,109.64	-	-	-	-	-	-	-	-
1999	5,993.88	60,103.52	32.1	28.7	16.5	1.6	3.6	4.9	3.2	9.4
2000	3,731.94	63,835.46	36.1	25.3	20.8	1.1	3.4	4.4	0.9	8.0

계절별 메탄 현장 측정량은 '수도권매립지 매립가스 발생량 현장 모니터링 및 발생특성 분석'(이우원 외, 2020)의 '계절별 매립가스 배출 경로별 배출량 및 발생량 평가 결과' 값을 사용하였다. 강제 포집량은 매립장에 설치된 수직 가스정을 통해 포집된 매립가스양이다. 표면발산량은 미국 EPA 지침에 따라 열린 챔버(dynamic flux chamber) 설치 지점을 선정하고(수도권매립지 제1 매립장 212개 지점), 각 지점에서 수행된 모니터링 결과를 전체 면적에 대하여 환산된 양이다. 간이 소각량은 매립장 현장에 설치된 간이소각기에서 수집된 자료이다. 매립가스 발생량의 현장 측정은 2005년 봄부터 2019년 겨울까지 진행되었으며, 계절별로 배출경로별(강제 포집, 표면발산, 간이 소각) 매립가스 발생량을 확인할 수 있다. 단위는 표준상태(0℃, 1기압)에서의 유량 단위(Nm^3/min)를 사용한다.

기상 정보는 수도권매립지 가장 인근의 종관기상관측망(ASOS, Automated Synoptic Observing System)에서 측정된 1992년 3월부터 2022년 2월까지의 월 누적 강수량과 월 평균 기온 자료를 사용하였다. 각 활동자료의 단위와 사용 기간 및 출처는 <표 3>과 같다.

<표 3> 발생량 산정에 활용된 활동자료와 기간 및 출처

활동자료	단위	기간	출처
폐기물 매립량	Mg	1992년~1999년	수도권매립지관리공사 통계연감
		1999년 8월 ~ 2000년 10월	수도권매립지 연도별 반입량 현황 통계
폐기물 성상	%	1999년~2000년	수도권매립지관리공사 통계연감
매립가스 현장 측정량	Nm^3/min	2005년~2019년	수도권매립지 매립가스 발생량 현장 모니터링 및 발생 특성 분석
월 평균 기온 월 누적 강수량	℃, mm	1992년 03월 ~ 2023년 02월	종관기상관측망(ASOS 인천(112))

2.3 매립지 현장 측정

매립지 현장 측정량은 수도권매립지 관리공사에서 관리하는 ‘매립지 현장 모니터링을 통한 배출경로별 조사량’을 사용하였다. 수도권매립지 관리공사는 2005년부터 현재까지 매립지에서 발생하는 매립가스에 대한 현장 모니터링을 실시하고 있다. 현장 모니터링은 매립가스의 주요 배출경로별 배출기여도와 계절적 변동을 확인하기 위해 계절별로 현장 측정을 진행한다. 매립가스 배출경로는 강제포집, 가스배제공(간이소각), 표면발산으로 구분되며 표면발산량은 열린 챔버(dynamic flux chamber)를 사용한다. 정보 공개 청구를 통해 기간별 조사 시기와 배출경로별 조사지점에 대한 정보를 확보하였으며, 2005년에 대한 정보는 데이터가 없는 관계로 2006년부터 2019년까지 계절별 매립가스 현장 조사 시기와 배출경로별 조사지점 수는 <표 4>와 같다.

<표 4> 2005년~2019년 계절별 매립가스 현장 조사 시기 및 배출경로별 조사지점 수

연도	계절	조사 시기	배출경로별 조사지점 수				
			강제포집	가스배제공 (간이소각기)	표면발산		
					계	상부	사면
2005	-	-	-	-	-	-	-
2006	봄	4.26~4.28	1	17	33	21	12
	여름	8.3~8.4	1	1	33	21	12
	가을	10.27~11.1	1	1	33	21	12
	겨울	12.26~12.27	1	1	27	21	6
2007	봄	5.22~5.23	1	1	24	12	12
	여름	8.24~8.25	1	1	23	12	11
	가을	11.7~11.8	1	1	21	10	11
	겨울	12.26~12.27	1	1	21	11	10
2008	봄	5.6~5.7	1	0	19	8	11
	여름	8.6~8.7	1	0	20	10	10
	가을	10.16~10.17	1	0	21	11	10
	겨울	12.18~12.19	1	0	21	11	10
2009	봄	5.25~5.26	1	0	21	12	9
	여름	8.4~8.5	1	0	25	15	10
	가을	11.6~12.2	1	0	23	15	8

	겨울	10.2.3~2.4	1	0	26	15	11
2010	봄	6.3~6.4	1	0	27	15	12
	여름	7.8~7.9	1	0	27	15	12
	가을	10.12~10.13	1	0	22	15	7
	겨울	12.14~12.15	1	0	27	15	12
2011	봄	5.5~5.6	1	0	16	6	10
	여름	8.25~8.26	1	0	14	8	6
	가을	10.6~10.7	1	0	20	9	11
	겨울	12.1.10~1.12	1	0	26	15	11
2012	봄	5.21~5.23	1	0	27	15	12
	여름	7.31~8.2	1	0	23	11	12
	가을	11.29~12.1	1	0	15	6	9
	겨울	13.1.29~1.31	1	0	25	13	12
2013	봄	5.7~5.14	1	0	20	9	11
	여름	8.14~8.16	1	0	23	12	11
	가을	11.22~11.23	1	0	15	9	6
	겨울	14.2.7~2.14	1	0	23	11	12
2014	봄	5.21~5.24	1	0	28	19	9
	여름	8.13~8.16	1	0	33	21	12
	가을	11.10~11.14	1	0	38	21	17
	겨울	15.1.22~2.4	1	0	38	21	17
2015	봄	5.21~5.27	1	0	39	21	18
	여름	8.6~8.12	1	0	39	21	18
	가을	11.6~11.24	1	0	39	21	18
	겨울	16.1.11~1.20	1	0	39	21	18
2016	봄	5.17~5.23	1	0	39	21	18
	여름	8.6~8.12	1	0	39	21	18
	가을	11.6~11.24	1	0	39	21	18
	겨울	16.1.11~1.20	1	0	39	21	18
2017	봄	5.17~5.23	1	0	39	21	18
	여름	8.8~9.1	1	0	38	20	18
	가을	10.31~11.7	1	0	39	21	18
	겨울	18.1.19~2.9	1	0	38	20	18
2018	봄	4.13~4.20	1	0	38	21	17
	여름	7.18~7.24	1	0	39	21	18
	가을	10.19~11.2	1	0	39	21	18
	겨울	19.1.24~1.30	1	0	38	20	18
2019	봄	4.17~4.19	1	0	39	21	18
	여름	10.1~10.17	1	0	204	149	55
	가을	12.4~12.19	1	0	205	150	55
	겨울	20.1.14~1.30	1	1	205	150	55

2.4 매립지 메탄 발생량 산정

본 연구에서는 수도권매립지 제1 매립장에 대해 1992년 봄(1992년 3월 ~ 1992년 5월)부터 2022년 겨울 (2021년 12월 ~ 2023년 2월) 기간 동안 계절별 매립지 메탄 발생량을 산정하였다. 기존의 CLEEN 모델을 국내 매립지에 최적화한 CLEEN_k 모델로 개선하였으며, CLEEN_k 모델을 활용하여 수도권매립지 제1 매립장의 메탄 발생량을 산정하였다. 기존의 매립지 메탄 발생량을 산정하는 대표적인 모델인 FOD와 LandGEM에 대해서도 함께 발생량을 산정하여 개선된 CLEEN_k 모델과 결과를 비교하였다. 각 모델별 특성과 산정 방법 및 사용 인자는 <표 5>와 같다.

<표 5> 매립지 메탄 발생량 산정 모델간 특성 비교

항목	FOD	LandGEM	CLEEN
사용 인자	폐기물량, 폐기물 성상	폐기물량	폐기물량, 폐기물 성상, 기상 특성(온도, 강수량)
메탄 발생 속도 상수 (k)	폐기물 성상, 매립지 유형, 기후대에 따른 k 제시	매립지 특성에 따른 k 제시	폐기물 성상, 매립지 유형, 기상 특성(온도, 강수량)에 따른 k
특징	폐기물 성상 반영	폐기물량만 활용	폐기물 성상 및 기상 특성 반영
시간 해상도	연간	연간	계절별

2.4.1 CLEEN 모델

CLEEN 모델은 매립지의 폐기물량과 폐기물 성상 및 기상 특성(온도와 강수량)을 입력하여 매립지 메탄 발생량을 추정하는 모델이다(Karanjekar et al., 2015). CLEEN 모델은 실험실 조건에서 수행된 여러 기상 조건에 따른 미생물의 폐기물 분해 반응 실험 결과를 바탕으로 폐기물 성상과 온도, 강수에 따른 메탄 발생 속도 상수 k_{lab}을 산정하는 방정식 (식 1)을 제시한다. k_{lab}에 매립지 현장 조건을 반영하여 이을 보정하는 F_{SU}를 산정하는 방정식 (식 2)를 산정하고, k_{lab}과 F_{SU}로 산출한 k_{field}를 활용하여 메탄 발생량을 산정한다. CLEEN 모델에서 k_{lab}을 산정하는 식은 다음과 같다.

$$Log_{10}k_{lab} = -3.02658 - 0.0067282R^2 + 0.069313R + 0.00172807(R \times F) + 0.01046T - 0.01152F + 0.00418TX + 0.00598Y \quad \text{(식 1)}$$

k_{lab} = 실험실 메탄 발생 속도 상수 (yr^{-1})

R = 연 평균 강수량 (mm/day)

T = 연 평균 온도 (K)

TX = 매립 폐기물 중 섬유류 비율(%)

Y = 매립 폐기물 중 정원 폐기물류 비율(%)

F = 매립 폐기물 중 음식물류 비율(%)

CLEEN 모델의 k_{lab}은 실험실의 이상적인 조건(작은 폐기물 입자 크기, 균일한 수분 조건 등)에서 추정된 값으로 실제 매립지보다 과대 추정되는 경향을 보인다(Ress et al., 1998; Barlaz, 2006). CLEEN 모델은 매립지 현장 조건을 반영하여 k_{lab}을 보정하고자 미국, 캐나다, 이스라엘의 11개 매립지 조건을 반영하여 k_{lab}을 k_{field}로 보정하는 F_{SU}를 온도와 강수에 대한 다중 선형 회귀로 산정하였다. CLEEN 모델에서 F_{SU}를 산정하는 식은 (식 2)와 같다.

$F_{SU} = -0.00758T + 0.0135R + 0.137$ (식 2)

T = 연 평균 온도 (℃)

R = 연 평균 강수량 (mm/day)

CLEEN 모델은 (식 1)과 (식 2)로 산정한 온도와 강수량에 따른 k_{lab}과 F_{SU}를 활용하여 실측값에 보정된 k_{field}를 산정하여 메탄 발생량 추정에 활용한다. CLEEN 모델에서 k_{field}를 산정하는 식은 (식 3)과 같다.

$k_{field} = k_{lab} \times F_{SU}$ (식 3)

k_{field} = 기온과 강수 조건을 반영하여 보정된 k (yr^{-1})

k_{lab} = (식 1)로 산정된 실험실 조건에서의 k (yr^{-1})

F_{SU} = 보정 식 (식 2)

CLEEN 모델에서 보정된 k_{field}를 사용하여 메탄 발생량을 산정하는 식은 (식 4)와 같다.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{12} k_{field}\frac{M_i}{12}L_0 e^{-k_{field}t_{ij}} \quad \text{(식 4)}$$

Q_{CH_4} = 메탄 발생량(m^3/year)

n = 폐기물 매립년수

k_{field} = 메탄 발생 속도 상수(y^{-1})

L_0 = 메탄 잠재 발생량(m^3/ton)

M_i = i 년도의 폐기물 매립량(ton)

t_{ij} = i 년도에 매립된 폐기물 중 j번째로 매립된 폐기물의 매립년수

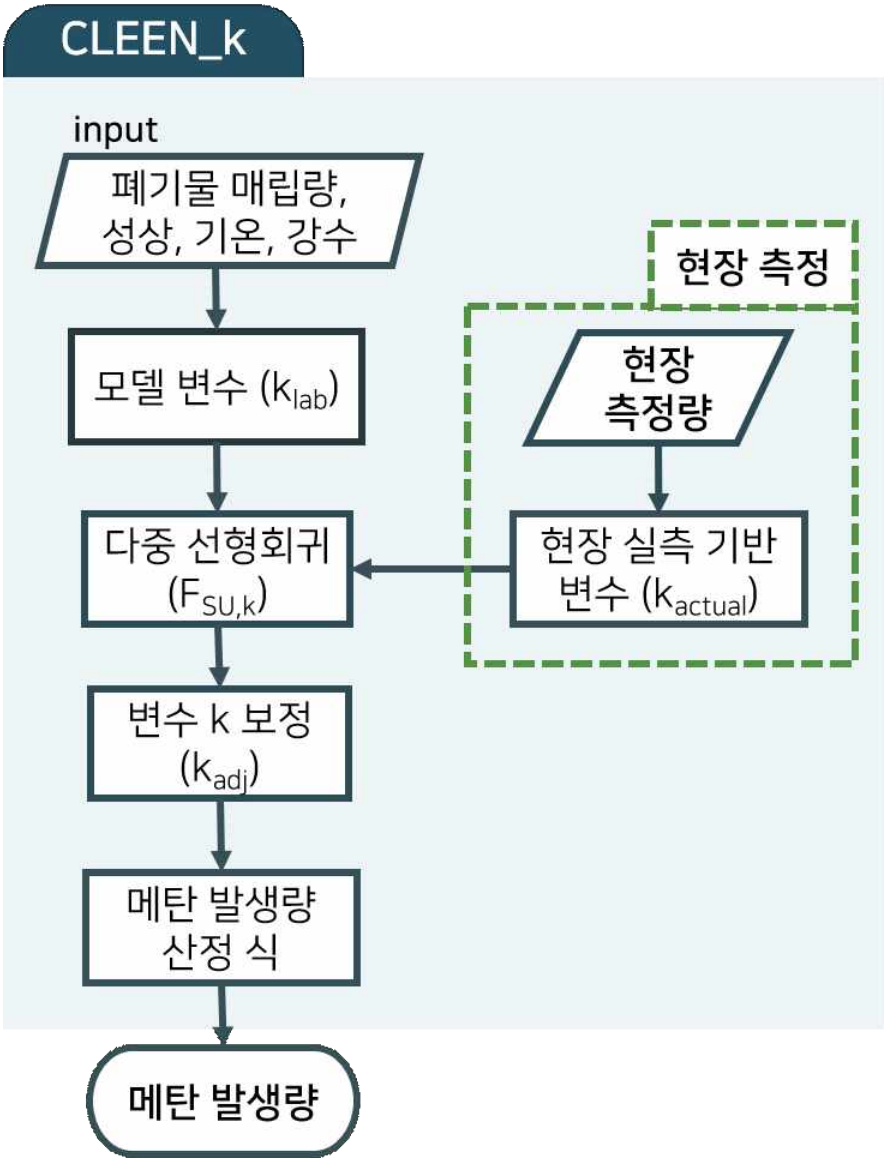
CLEEN 모델은 기온과 강수 조건을 고려하여 매립지 메탄 발생량을 추정할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, CLEEN 모델이 제공하는 보정 식 F_{SU} (식 2)를 활용하여 계산된 k_{field} 계수는 해외 일부 매립지 특성을 반영하여 보정한 값이기 때문에 국내 매립지 메탄 발생량 산정에는 적합하지 않다.

2.4.2 CLEEN_k 모델

본 연구에서는 국내 매립지의 기상 특성을 반영하여 메탄 발생량을 산정하고자 기존의 CLEEN 모델에 수도권매립지의 특성을 반영하여 'CLEEN_k'로 재구축하였다. CLEEN_k는 수도권매립지 제1 매립장의 폐기물 매립량, 성상, 기온, 강수량 데이터를 활동자료로 입력하여 메탄 발생량을 산정하는 모델이다. CLEEN_k는 기존의 해외 매립지 현장 실측값을 바탕으로 산정된 CLEEN 모델에 국내 매립지 현장 특성을 반영하기 위하여 수도권매립지 제1 매립장의 현장 측정량을 사용하였다.

CLEEN_k 모델 산정에는 세 가지 종류의 메탄 발생 속도 상수(k)가 사용된다. 먼저, k_{lab}은 CLEEN 모델에서 폐기물 분해 실험으로 산정된 식을 통해 산출된 실험실 기반 k이다. k_{actual}은 현장 측정량에 기반한 메탄 분해 상수로, 수도권매립지 제1 매립장의 현장 측정량으로 계산된 k이다. 이는 현장 측정량이 존재하는 경우에만 계산될 수 있다. k_{adj}는 현장 측정량이 없는 기간에 대해 미생물에 의한 폐기물 분해 정도(k_{lab})와 매립지 현장 특성(k_{actual})을 반영하여 산정하며 최종적으로 매립지 메탄 발생량 산정에 사용된다.

기존의 CLEEN 모델은 폐기물 분해 실험을 통해 산정된 k_{lab}을 미국 등 해외 매립지 실측값으로 보정 하였다. 반면, CLEEN_k 모델은 수도권매립지 제1 매립장의 현장 측정량을 반영하여 k_{lab}을 보정 하였다. 수도권매립지 제1 매립장의 현장 측정량으로 계산된 보정 식 $F_{SU,k}$로 k_{lab}을 매립지 현장 특성을 반영하여 보정하고, 이렇게 계산된 k_{adj}를 이용하여 메탄 발생량을 산정한다. CLEEN_k 모델 산정 흐름도는 <그림 2>와 같다.



<그림 2> CLEEN_k 모델 산정 흐름도

CLEEN_k 모델 구축을 위하여 CLEEN 모델의 (식 1)을 이용하여 수도권매립지 제1 매립장의 온도와 강수 조건에 맞는 k_{lab}을 산정한다. k_{lab}에 수도권매립지 현장 특성을 반영하기 위하여 현장 측정량을 모의하는 k_{actual}을 산정한다. k_{actual}은 한 기간에서의 메탄 발생량을 산정하는 매립지 폐기물 1차 분해 식 (식 5)를 k에 대한 꼴로 변형한 방정식 (식 6)을 사용한다. 매립지 폐기물 1차 분해 식 (식 5)와 k_{actual} 산정 식 (식 6)은 다음과 같다.

$$Q_{CH_4} = kM_iL_0e^{-k} \quad \text{(식 5)}$$

Q_{CH_4}= 매립지 메탄 발생량 (m^3)
k = 1차 메탄 발생 속도 상수 ($year^{-1}$)
M_i = i 계절에 매립된 폐기물량 (Mg)
L_0 = 메탄 발생 잠재량(m^3/Mg)

$$\ln(k_{actual}) + k_{actual} = \ln(\frac{Q_{CH_4}}{M_iL_0}) \quad \text{(식 6)}$$

k_{actual} = 매립지 현장 측정량을 기반으로 산정된 1차 메탄 발생 속도 상수 ($year^{-1}$)
Q_{CH_4}= 매립지 현장 메탄 측정량 (m^3/season)
M_i = i 계절에 매립된 폐기물량 (Mg)
L_0 = 메탄 발생 잠재량(m^3/Mg)

(식 6)의 Q_{CH_4}항에 계절별 수도권매립지 제1 매립장 현장 측정량을 대입한 후, 이를 가장 잘 모의하는 k_{actual}를 계산한다. 이때 k_{actual}는 실제 매립지 현장에서 측정되는 메탄 발생 속도 상수 범위(0.01 yr^{-1} ~ 0.7 yr^{-1}) 내 값을 사용하였다(Oonk and Boom, 1995; IPCC, 2000; Karanjeker et al., 2015).

현장 측정량을 대입하여 산정된 계절별 k_{actual}은 현장 측정량 정보가 있는 기간에 대해서만 산정이 가능하다. 제1 매립장의 현장 측정량은 계절별로 구분되어 k_{actual} 또한 계절별로 산출 가능하다. 현장 측정량이 없는 기간에 대하여 k_{lab}에 매립지 현장 특성을 반영하기 위하여 k_{actual}을 기반으로 보정 식 $F_{SU,k}$를 산정한다. k_{actual}을 종속 변수로, 계절별 기온과 강수량을 독립변수로 다중 선형회귀를 통해 산출된 방정식 $F_{SU,k}$의 형태는 (식 7)과 같다.

$$F_{SU,k} = \frac{k_{actual}}{k_{lab}} = aT + bP + c \quad \text{(식 7)}$$

$F_{SU,k}$ = 보정 식

k_{actual} = 매립지 현장 측정량을 기반으로 산정된 1차 메탄 발생 속도 상수 ($year^{-1}$)

k_{lab} = (식 1)로 산정된 실험실 조건에서의 k ($year^{-1}$)

T = 계절 평균 온도 (℃)

R = 계절 평균 강수량 (mm/day)

k_{lab}을 선형회귀 결과의 $F_{SU,k}$로 보정하여 최종적으로 수도권매립지 제1 매립장의 메탄 발생량 산정에 사용되는 k_{adj}를 (식 8)과 같이 산정한다. k_{adj}를 산정할 때 k_{lab}을 기반으로 산정하는 이유는 실험실 조건에서 온도와 강수량에 따른 미생물에 의한 폐기물 분해 정도를 나타내는 k_{lab}을 사용하여 모델에 미생물의 폐기물 분해 정도를 반영하기 위함이다.

$$k_{adj} = k_{lab} \times F_{SU,k} \quad \text{(식 8)}$$

k_{adj} = 기온과 강수 조건을 반영하여 보정된 k ($year^{-1}$)

k_{lab} = (식 1)로 산정된 실험실 조건에서의 k ($year^{-1}$)

$F_{SU,k}$ = 보정 식

모델 산정에 사용되는 메탄 잠재 발생량(L_0)은 수도권매립지 제1 매립장의 현장 측정량을 기반으로 메탄 발생량을 산정한 선행연구의 18.0 m^3 CH_4/ton을 사용하였다(박진규 외, 2012). CLEEN_k 모델은 계절별 k_{adj}가 산출되어 계절별 메탄 발생량을 산출할 수 있다. 계절별 메탄 발생량을 모두 합한 연간 메탄 발생량 산정 식은 (식 9)와 같다.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{4} k_{adj} M_{ij} L_0 e^{-k_{adj} t_{ij}} \quad \text{(식 9)}$$

Q_{CH_4}= 매립지 메탄 생성량 (m^3/year)
n = 매립된 기간 (계산 연도 - 매립 시작 연도)
M_{ij} = i년도 j번째 분기에 매립된 폐기물량 (Mg)
k_{adj} = 보정된 1차 메탄 발생 속도 상수 ($year^{-1}$)
L_0 = 메탄 발생 잠재량(m^3/Mg)
t_{ij} = i 연도에 수거된 폐기물량(Mg)의 j번째 분기의 경과 연도(예, 3년 1분기)

2.4.3 FOD 모델

IPCC에서 제안하는 FOD 모델은 폐기물의 1차 분해 반응을 기반으로 메탄 발생량을 산정한다. FOD 모델은 매립된 폐기물 양과 매립된 폐기물 내 분해 가능한 유기물(Degradable organic carbon, DOC)의 양을 기반으로 폐기물 성상을 고려하여 메탄 발생량을 산정한다(Eggleston et al., 2006). 폐기물 성상별 DOC와 메탄 발생 속도 상수(k)는 온실가스 종합정보센터에서 제시하는 국가 배출계수와 2006 IPCC 가이드라인에서 제시하는 기본값을 사용하였다(한국환경공단, 2017). FOD 산정 식은 (식 10) ~ (식 13)과 같다.

$$CH_4 generated = DDOC_{m,decomp_T} \times F \times \frac{16}{12}$$ (식 10)

$$DDOC_{m_T} = W_T \times DOC \times DOC_f \times MCF$$ (식 11)

$$DDOC_{ma_T} = DDOC_{m_T} + (DDOC_{ma_{T-1}} \times e^{-k})$$ (식 12)

$$DDOC_{m,decomp_T} = DDOC_{ma_{T-1}} \times (1 - e^{-k})$$ (식 13)

$CH_4 generate_{x,T}$: T년도에 발생한 CH_4, tCH_4/yr

T : 발생량 산정년도

x : 폐기물 카테고리 성상/물질

F : 매립가스 내 CH_4 비율, Fraction

$DDOC_{mT}$: T년도에 매립된 폐기물 중 혐기적으로 분해 가능한 DOC의 총량, tC/yr

W_T : T년도에 매립된 폐기물의 총량, tWaste/yr

DOC : 매립된 해의 분해 가능한 유기탄소, tC/tWaste

DOC_f : 분해 가능한 DOC의 비율, Fraction

MCF : 매립 년도의 호기성 분해에 대한 CH_4 보정 계수, Fraction

$DDOC_{maT}$: T년도까지 매립지(SWDS)에 축적된 DDOCm, tC/yr

k = 메탄 발생 속도 상수 ($year^{-1}$)

2.4.4 LandGEM 모델

LandGEM 모델은 매립량만으로 메탄 발생량을 산정한다. LandGEM 모델은 메탄 발생 속도 상수(k), 메탄 잠재 발생량(L_0), 연간 폐기물 반입량을 기반으로 메탄 발생량을 산정한다. 본 연구에서는 LandGEM 모델을 제1 매립장 현장 측정량에 대해 최적화를 수행한 선행연구에서 제시하는 계수 값(k=0.1 yr^{-1}, L_0=18.0 m^3 CH_4/ton)을 사용하였다(박진규 외, 2012). 산정 식은 (식 14)와 같다.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0.1}^{1} kL_0 (\frac{M_i}{10}) e^{-kt_{ij}}$$ (식 14)

Q_{CH_4} = 메탄가스 총발생량 (m^3/year)

n = 폐기물 매립년수

k = 메탄 발생 속도 상수 ($year^{-1}$)

L_0 = 메탄 잠재 발생량(m^3/ton)

M_i = i 년도의 폐기물 매립량(ton)

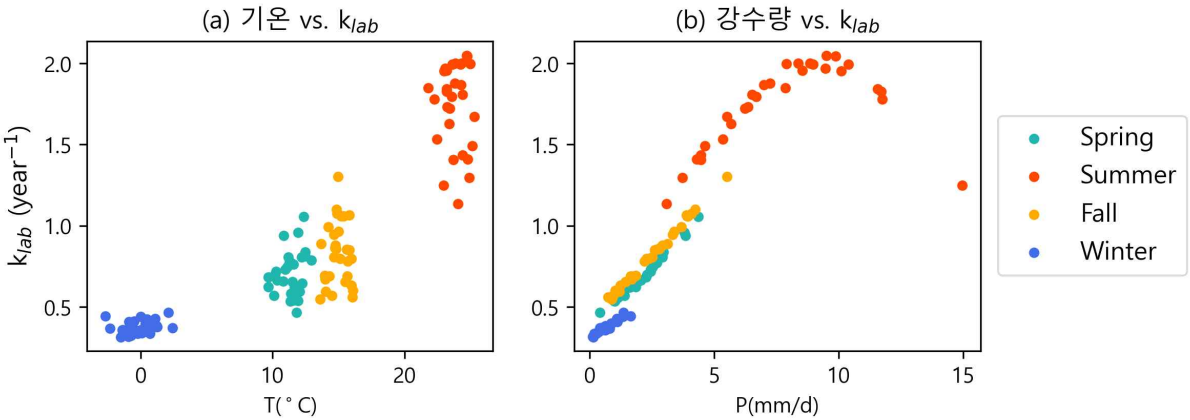
t_{ij} = i 년도에 매립된 폐기물의 j번째 경과 년 수(예, 3.2 년)

Ⅲ. 연구 결과

3.1 CLEEN_k 산정 결과

3.1.1 수도권매립지 제1 매립장 k_{lab}, F_{SU}, k_{adj} 산정 결과

k_{lab}을 산정하는 방정식 (식 1)에 수도권매립지 제1 매립장의 기상 특성과 폐기물 조성 비율을 반영하여 수도권매립지 제1 매립장의 계절별 k_{lab}을 산정하였다. 산정 결과 k_{lab}은 온도와 강수량에 따라 연간 계절별 0.25에서 2.2 범위를 갖는 것으로 나타났다. k_{lab}은 온도가 높을수록 증가하고, 강수량은 10mm/day까지 증가하다, 그 이상의 강수량에 대해서는 다시 감소하는 값을 보인다. 여름철 연간 k_{lab}은 1.1에서 2 사이의 값을 나타내며, 봄과 가을철의 연간 k_{lab}은 0.4에서 1.3 사이의 값을, 겨울철의 연간 k_{lab}은 0.3에서 0.5 사이의 값을 갖는다. 계절별 k_{lab} 비교 결과 여름철이 겨울철보다 더 높은 메탄 발생 속도를 가지는 것으로 추정된다. 기온과 강수량에 따른 계절별 k_{lab}은 <그림 3>과 같다.



<그림 3> 계절별 온도와 강수량에 따른 k_{lab} 변화
(a)는 기온(℃)에 따른 k_{lab}의 변화, (b)는 강수량(mm/day)에 따른 k_{lab}. 초록 점은 봄, 빨간 점은 여름, 노란 점은 가을, 파란 점은 겨울을 나타냄

수도권매립지 제1 매립장의 $F_{SU,k}$는 (식 6)에 현장 측정량을 대입하여 k_{actual}을 계산한 후, 수도권매립지 제1 매립장에 대하여 산정된 k_{lab}과 k_{actual}을 활용하여 (식 7)과 같은 형태로 $F_{SU,k}$를 산정한다. k_{actual}에 대해 온도와 강수에 대한 다중 선형 회귀를 진행하여 온도와 강수량으로 $F_{SU,k}$를 추정할 수 있는 방정식을 제작한다. k_{actual}은 현장 측정량이 있는 경우 산정할 수 있다. 다중 선형 회귀 결과 산출된 $F_{SU,k}$ 추정 방정식은 (식 15)와 같으며, 해당 다중 선형회귀 결과의 R^2은 0.83을 갖는다.

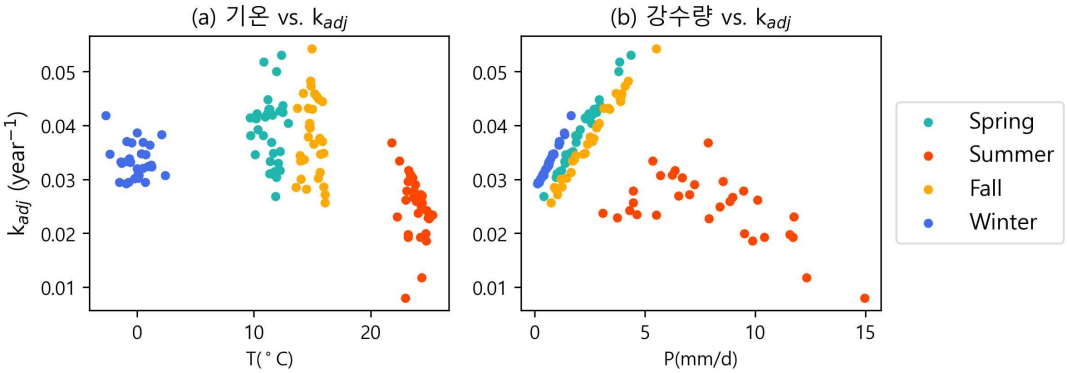
$$F_{SU,k} = -0.00267T - 0.00151P + 0.08893 \quad \text{(식 15)}$$

T: 계절 평균 온도 (℃)

P: 계절 평균 강수량 (mm/day)

$F_{SU,k}$: 보정 식

수도권매립지 제1 매립장의 메탄 발생량을 산정하는 k_{adj}는 상단의 k_{lab}과 $F_{SU,k}$를 이용하여 계산된다. 수도권매립지 제1 매립장에서 보정된 k_{adj}는 연간 0.01에서 0.06 사이의 값을 갖는다. 여름철 연간 k_{adj}는 0.013에서 0.04 사이의 값을 나타내며, 봄과 가을철의 연간 k_{adj}는 0.025에서 0.06, 겨울철 연간 k_{adj}는 0.025에서 0.04 사이의 값을 갖는다. 봄, 가을, 겨울철은 강수량이 증가할수록 k_{adj}가 증가하는 경향을 보이는 반면, 여름철에는 강수량이 증가할수록 k_{adj}가 감소하는 경향을 보인다. 기온과 강수량에 따른 계절별 k_{adj}는 <그림 4>와 같다.



<그림 4> 계절별 온도와 강수량에 따른 k_{adj} 변화
(a)는 기온(℃)에 따른 k_{adj}의 변화, (b)는 강수량(mm/day)에 따른 k_{adj}. 초록 점은 봄, 빨간 점은 여름, 노란 점은 가을, 파란 점은 겨울을 나타냄

3.1.2 메탄 발생량 산정 결과

CLEEN_k를 이용하여 수도권매립지 제1 매립장의 메탄 발생량을 산정한 결과 1992년부터 2022년까지의 총 메탄 발생량은 1,108,647 천 m^3로 추정되었다. 수도권매립지 제1 매립장의 메탄 발생량은 1992년 매립 시작 이후 점차 증가하다 2000년 10월 매립이 종료된 이후 점차 감소하는 추세를 보인다. 연도별 총 메탄 발생량(m^3)과 전년도 대비 메탄 발생량의 증감률(%)은 <표 6>과 같다.

<표 6> 연도별 총 메탄 발생량과 전년 대비 증감률

연도	메탄 발생량 (m^3)	증감률 (%)	연도	메탄 발생량 (m^3)	증감률 (%)
1992	1,573,068	-	2008	33,764,480	-5.19
1993	12,596,370	700.75	2009	27,795,870	-17.68
1994	34,461,580	173.58	2010	22,779,750	-18.05
1995	43,729,880	26.89	2011	22,552,910	-1
1996	65,365,410	49.48	2012	18,468,950	-18.11
1997	80,263,090	22.79	2013	16,734,240	-9.39
1998	77,288,420	-3.71	2014	16,332,820	-2.4
1999	89,661,210	16.01	2015	15,169,580	-7.12
2000	85,150,780	-5.03	2016	12,402,730	-18.24
2001	69,166,040	-18.77	2017	12,956,680	4.47
2002	69,964,380	1.15	2018	8,944,680	-30.96
2003	61,661,860	-11.87	2019	8,022,620	-10.31
2004	54,430,890	-11.73	2020	7,870,715	-1.89
2005	47,169,470	-13.34	2021	6,424,254	-18.38
2006	42,568,640	-9.75	2022	7,762,733	20.83
2007	35,613,120	-16.34	-	-	-

메탄 발생량의 증감률은 1994년까지 큰 폭으로 증가한 후, 점차 감소하는 것으로 나타났다. 이는 폐기물 매립량에 의한 영향으로, 1994년 이후 폐기물 매립량이 계속 감소하여 메탄 발생량 또한 감소하는 것으로 보인다. 특정 연도에 메탄 발생량의 증감이 큰 폭으로 발생한 것은 당 해의 기온과 강수량에 의한 영향으로 나타났다. 1998년에는 메탄 발생량이 전년 80,263,090 m^3 대비 77,288,420 m^3로 약 3.71% 감소하였다. 이는 여름철과 겨울철 평균 기온이 전년에 비해 감소하고(여름철 24.2℃ → 23.2℃, 겨울철 1.1℃ → 0.7℃) 봄철과 겨울철 평균 강수량이 감소하여(봄철 3.8 mm/d → 2.7 mm/d, 겨울철 1.09 mm/d → 0.19 mm/d) 메탄 발생량이 감소한 것으로 추정된다. 또한, 2022년 메탄 발생량은 전년 6,424,254 m^3 대비 7,762,733 m^3로 약 21% 증가하였다. 이는 2022년 여름철 폭우로 강수량이 전년 4.3 mm/d에서 12.3 mm/d로 증가하여 많은 양의 메탄 발생량이 산정된 것으로 보인다.

수도권매립지 제1 매립장에서 현장 측정 기간(2005년 봄 ~ 2019년 겨울) 동안 측정된 총 메탄 발생량은 374,075 천 m^3으로 나타났다. 동일한 기간 동안 CLEEN_k로 산정된 총 메탄 발생량은 294,107 천 m^3로 추정되어 CLEEN_k 모델을 활용한 메탄 발생량과 현장 측정량과의 차이는 약 21% 정도의 차이를 보인다. 수도권매립지 제1 매립장의 계절별 메탄 현장 측정량과 CLEEN_k로 산정한 메탄 발생량은 <표 7>과 같다.

<표 7> 수도권매립지 제1 매립장 계절별 현장 측정량 및 CLEEN_k 모델 산정량(단위: m^3)

연도	계절	현장 측정량	CLEEN_k	연도	계절	현장 측정량	CLEEN_k
2005	봄	15,564,959	12,640,404	2013	봄	4,492,350	3,494,378
	여름	14,708,827	12,326,637		여름	5,130,601	5,359,782
	가을	15,165,823	10,608,931		가을	4,217,940	3,403,326
	겨울	16,095,771	11,593,494		겨울	3,460,166	4,476,752
2006	봄	12,455,909	10,542,208	2014	봄	4,502,825	4,168,481
	여름	17,850,307	10,977,499		여름	4,902,553	4,710,007
	가을	12,242,089	10,670,455		가을	3,767,881	3,636,837
	겨울	12,093,545	10,378,480		겨울	3,071,611	3,817,498
2007	봄	13,849,432	8,550,337	2015	봄	3,055,333	3,996,791
	여름	11,689,629	9,728,454		여름	3,447,895	4,864,229
	가을	10,385,174	8,035,815		가을	3,020,973	3,165,346
	겨울	9,430,557	9,298,514		겨울	2,704,492	3,143,214
2008	봄	8,122,282	8,519,620	2016	봄	2,708,257	1,911,927
	여름	10,277,294	8,736,527		여름	3,322,066	4,565,801
	가을	8,238,778	8,405,890		가을	2,392,934	3,443,544
	겨울	7,679,028	8,102,444		겨울	1,875,991	2,481,456
2009	봄	7,450,991	6,482,956	2017	봄	1,684,140	3,259,531
	여름	5,971,078	7,982,471		여름	2,660,379	3,876,876
	가을	8,489,500	6,767,313		가을	2,524,020	3,386,237
	겨울	6,405,528	6,563,127		겨울	2,985,244	2,434,038
2010	봄	6,368,622	5,494,772	2018	봄	3,315,737	905,906.7
	여름	6,534,064	7,713,786		여름	2,106,221	3,764,178
	가을	6,962,343	3,327,568		가을	2,053,012	1,785,722
	겨울	6,052,970	6,243,621		겨울	1,917,018	2,488,874
2011	봄	5,685,398	5,123,742	2019	봄	2,031,394	2,447,712
	여름	5,640,159	5,052,808		여름	1,864,623	3,095,229
	가을	4,894,864	6,284,470		가을	1,760,728	985,449.2
	겨울	4,938,274	6,091,890		겨울	2,017,722	1,494,230
2012	봄	5,167,875	5,065,735	-			
	여름	5,540,282	6,670,492				
	가을	4,782,780	3,122,634				
	겨울	4,346,960	3,610,085				

3.1.3 모델의 불확도

모델에서 메탄 산정량의 불확도는 각 인자 (기상 자료, 폐기물량, 폐기물 성상)별 활동자료의 불확도 범위를 반영하여 산정하였다. 기상 자료의 불확도는 종관기상관측장비(ASOS)의 온도와 강수 관측 센서의 정확도 값을 사용하였다. 폐기물량과 폐기물 성상의 불확도는 2006 IPCC 가이드라인에서 제시하는 불확도를 사용하였다. 각 활동자료의 불확도 범위의 최대·최솟값을 반영하여 CLEEN_k 모델의 메탄 발생량의 불확도 범위를 산출하였다. 각 인자별 불확도를 반영하여 산정한 CLEEN_k모델의 불확도 범위는 약 ±32%이다. 모델에 사용되는 활동자료별 불확도는 <표 8>과 같다.

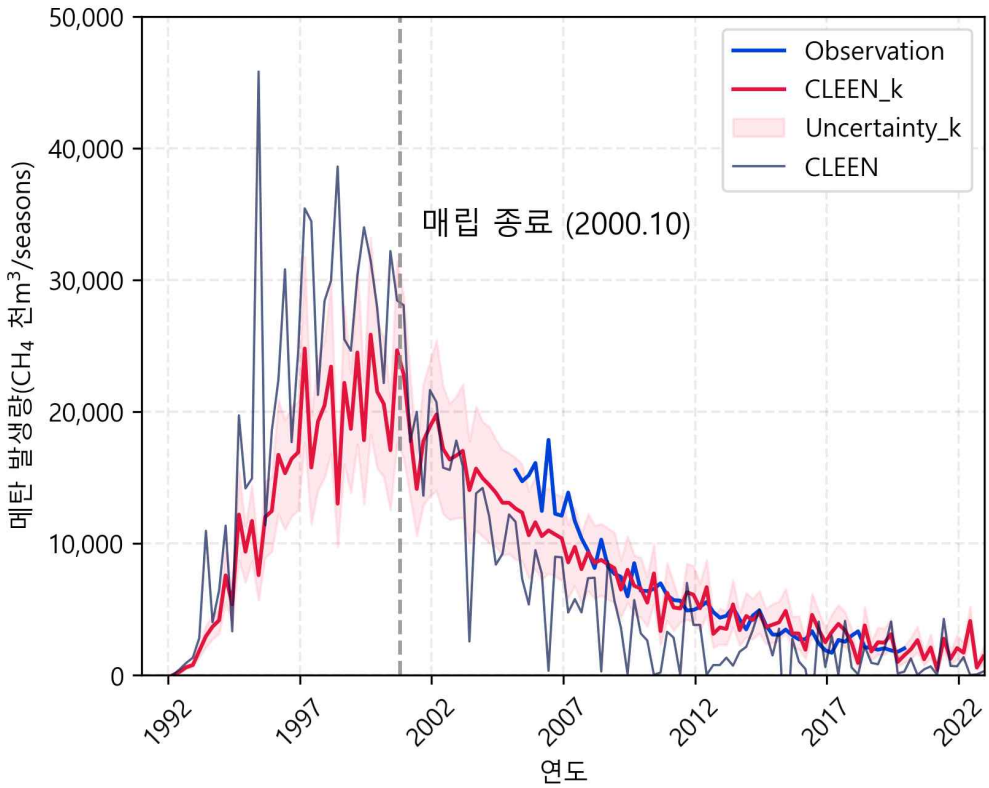
<표 8> 활동자료별 불확도 범위

활동자료		불확도 범위
종관기상관측장비 (ASOS)	온도(T)	± 0.3 ℃
	강수량(P)	± 3 %
폐기물량(W)		± 30 %
폐기물 성상		± 10 %

3.2 모델 간 메탄 발생량 비교

3.2.1 계절별 메탄 발생량 비교

기존의 CLEEN 모델 대비 CLEEN_k 모델의 성능 향상을 확인하고자, 계절별 비교가 가능한 CLEEN_k 모델과 CLEEN 모델로 수도권매립지 제1 매립장의 메탄 발생량을 산정하여 비교하였다. 수도권매립지 제1 매립장의 CLEEN_k와 CLEEN의 계절별 메탄 발생량은 <그림 5>와 같다.



<그림 5> 계절별 현장 측정량과 모델 산정량 비교
1992년 봄부터 2022년 겨울까지 모델별로 산정된 메탄 발생량을 현장 측정량과 비교함. 파란 선은 현장 측정량, 빨간 선은 CLEEN_k로 산정한 메탄 발생량, 분홍색 범위는 CLEEN_k의 불확도 범위, 남색 선은 CLEEN으로 산정한 메탄 발생량임. 세로 점선은 수도권매립지 제1 매립장의 매립이 종료된 시점인 2000년 10월.

모델을 활용한 수도권매립지 제1 매립장의 메탄 발생량 산출 결과, 매립 시작 시기인 1992년부터 2022년까지 전체 기간에 산정된 CLEEN_k의 총 메탄 발생량은 1,108,647 천 m^3이고, CLEEN의 총 메탄 발생량은 1,165,788 천 m^3로 CLEEN 모델이 약 5% 크게 산정하는 것으로 나타났다. CLEEN_k와 CLEEN 모델 모두 1990년 8월 매립 시작부터 메탄 발생량이 증가하며, 2000년 10월 매립이 종료된 이후 발생량이 감소하는 추세를 보인다. 이는 두 모델 모두 메탄 발생량 산정에 1차 분해 식을 기반으로 하여 메탄 발생량이 폐기물량에 의존하기 때문이다. 매립 진행 기간(1992년 봄 ~ 2000년 가을)의 CLEEN_k 모델로 산출한 총 메탄 발생량은 442,592 천 m^3로 CLEEN 모델로 산출한 메탄 발생량 677,660 천 m^3보다 약 1.5배 작게 산출되었다. 반면, 매립 종료 이후(2000년 겨울 ~ 2022년 겨울)의 CLEEN_k의 총 메탄 발생량은 666,055 천 m^3로 CLEEN 모델로 산출한 총 메탄이 발생량 488,128 천 m^3보다 약 1.4배 크게 산정되었다. CLEEN 모델이 CLEEN_k 모델에 비해 매립이 진행되는 동안에 메탄 발생량을 과대 추정하고, 매립이 종료된 이후에는 과소 추정하는 것으로 나타났다. 또한, 기존의 CLEEN 모델을 활용한 결과는 CLEEN_k 모델 대비 온도와 강수량에 따른 변동성이 높은 것으로 나타났다. 전 기간 CLEEN_k 모델로 산출한 메탄 최대 발생량은 25,842 천 m^3로 1999년 가을에 발생하였다. CLEEN 모델로 산출한 메탄 최대 발생량은 45,813 천 m^3로 1995년 여름에 발생하였다. CLEEN 모델로 산정한 최대 발생량은 CLEEN_k 모델로 산정한 최대 발생량에 비해 약 1.8배 정도 크게 산정되었다. CLEEN_k와 CLEEN 모델의 피크가 반대로 나온 부분은 일정 이상의 기온과 강수량일 때 CLEEN_k 모델이 메탄 발생량을 과대/과소 추정하기 때문으로 보인다.

본 연구는 CLEEN_k 모델의 검증을 위해, 매립지 현장 측정량과 모델 산정량 간의 총량을 비교하고 RMSE(Root Mean Square Error, 평균 제곱근 편차)를 계산하였다. 현장 측정 기간(2005년 봄 ~ 2019년 겨울) 동안 현장에서 측정된 메탄 발생량은 312,540 천 m^3이다. CLEEN_k의 현장 측정 기간 총 메탄 발생량은 294,107 천 m^3로 현장 측정량과 약 6% 차이가 나며 RMSE는 1,873 천 m^3이다. CLEEN의 메탄 발생량은 157,338 천 m^3로 현장 측정량과 약 50% 차이가 나며 RMSE는 4,695

천 m^3로 나타나, CLEEN_k 모델이 CLEEN 모델보다 현장 측정량을 더 잘 모의하는 것으로 보인다. <표 9>는 기간별로 CLEEN_k와 CLEEN 모델로 산정된 메탄 발생량과 RMSE를 비교하였다.

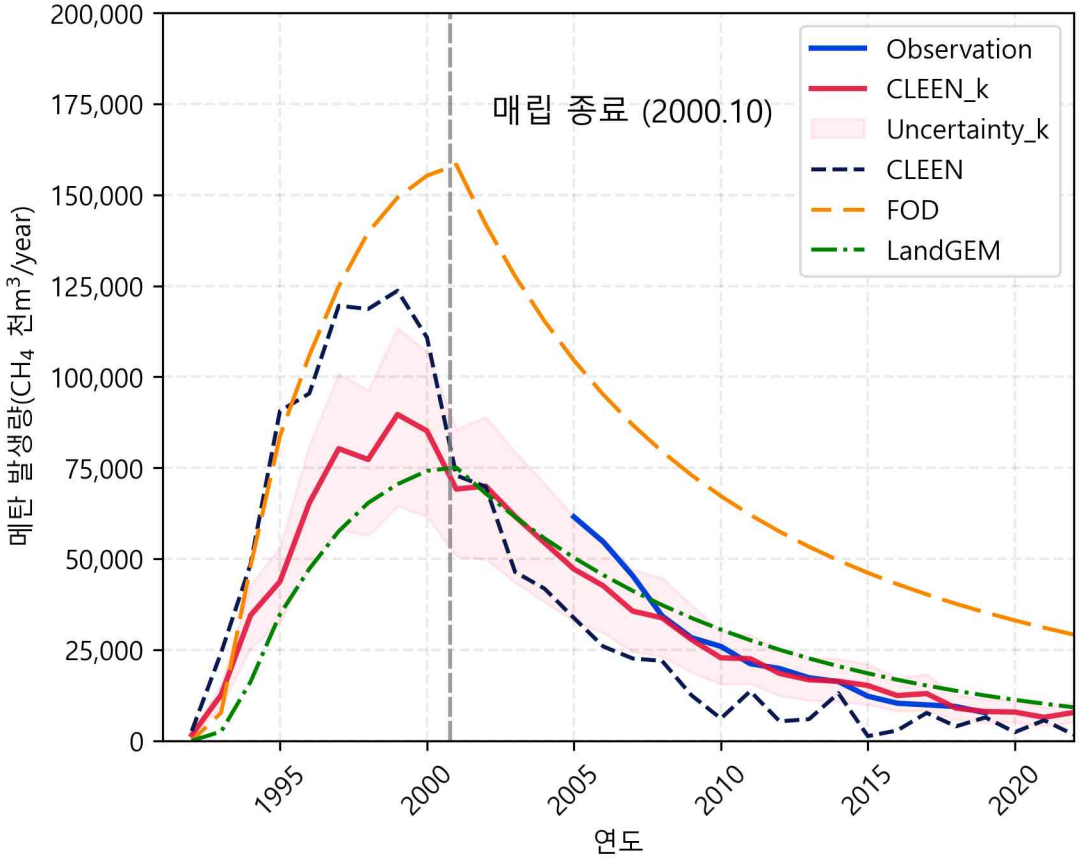
<표 9> 수도권매립지 제1 매립장 CLEEN_k와 CLEEN 모델 산정량 비교(단위: 천 m^3)

구분		CLEEN_k	CLEEN
기간	전 기간 (1992년 봄~2022년 겨울)	1,108,647	1,165,788
	매립 종료 이전 (1992년 봄~2000년 가을)	442,592	677,660
	매립 종료 이후 (2000년 겨울~2022년 겨울)	666,055	488,128
	현장 측정 기간 (2005년 봄~2019년 겨울)	294,107	157,338
최대 메탄 발생량 (시점)		25,842 (1999년 가을)	45,813 (1995년 여름)
RMSE		1,873	4,695

3.2.2 연간 메탄 발생량 비교

기존 모델 대비 CLEEN_k 모델의 성능 향상을 확인하고자, 수도권매립지 제1 매립장에 대한 CLEEN_k 모델, CLEEN 모델의 연간 메탄 발생량과 FOD 모델과 LandGEM 모델의 연간 메탄 발생량을 비교하였다. CLEEN_k 모델과 CLEEN 모델은 상기한 계절별 발생량을 연 단위로 합하여 활용하였다. FOD 모델의 메탄 발생량은 (식 10)~(식 13)을 활용하였으며, 수도권매립지 제1 매립장에 대해 2006 IPCC

가이드라인과 국가 온실가스 인벤토리 산정 지침에서 제시하는 계수를 반영하여 산정하였다. LandGEM 모델의 메탄 발생량은 (식 14) 을 활용하였으며, 수도권매립지 제1 매립장의 현장 측정량으로 보정된 선행연구의 k와 L_0 계수를 사용하였다(박진규 외, 2012). 매립지 메탄 발생량 산정 모델별 연간 메탄 발생량은 <그림 6>과 같다.



<그림 6> 모델별 현장 측정량과 연간 메탄 발생량 비교
1992년부터 2022년까지 모델별로 산정된 연간 메탄 발생량을 현장 측정량과 비교함. 파란 선은 현장 측정량, 빨간 선은 CLEEN_k로 산정한 메탄 발생량, 분홍색 면은 CLEEN_k의 불확도 범위임. 남색 점선은 CLEEN, 노란 점선은 FOD, 초록 점선은 LandGEM으로 산정한 메탄 발생량임. 세로 점선은 수도권매립지 제1 매립장의 매립이 종료된 시점인 2000년 10월을 표시함.

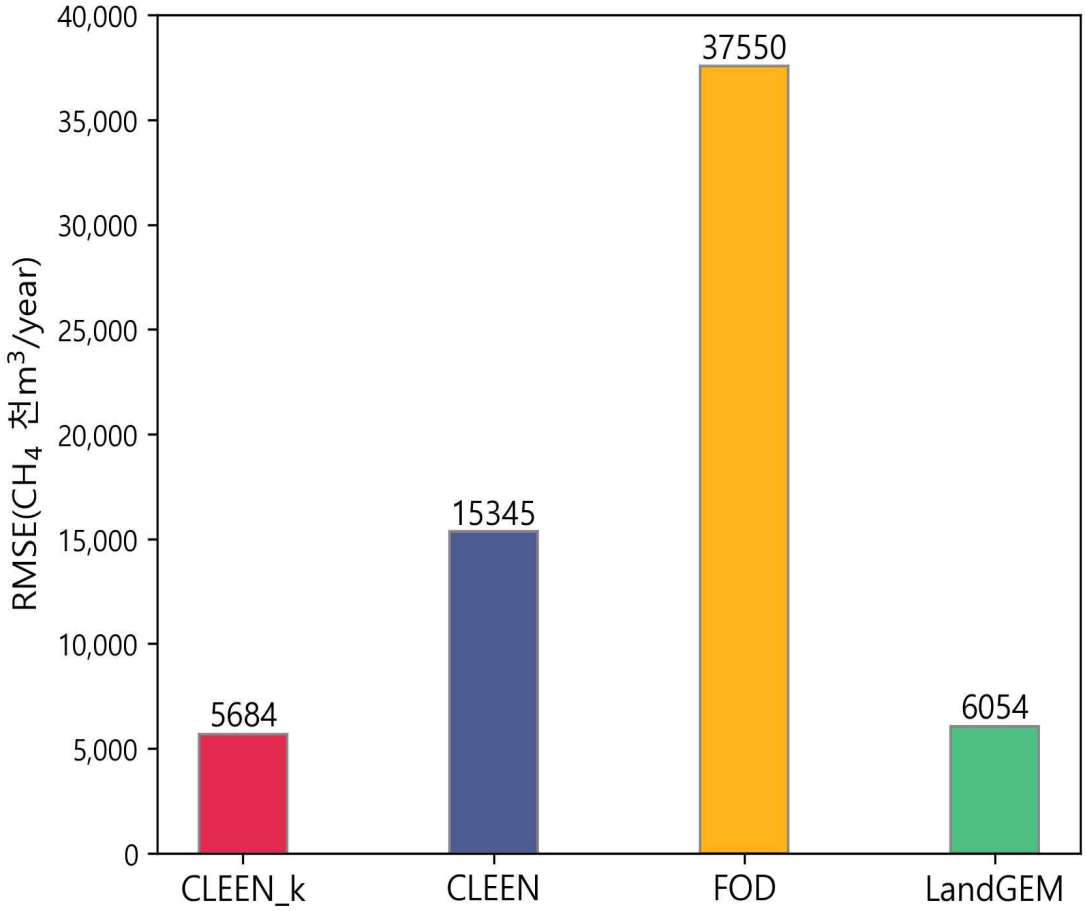
모델을 활용한 수도권매립지 제1 매립장의 메탄 발생량 산출 결과, 1992년 매립이 시작된 후 2022년까지 전체 기간에 대하여 모델별 총 메탄 발생량은 FOD 모델이 2,381,794 천 m^3, CLEEN 모델이 1,165,788 천 m^3, CLEEN_k 모델이 1,108,647 천 m^3, LandGEM 모델이 1,069,784 천 m^3 순으로 크게 산정되었다. 1992년 매립 시작 이후 2000년 매립이 종료되기 전까지 모델별 산출된 총 메탄 발생량은 FOD 모델이 814,407 천 m^3, CLEEN 모델이 677,660 천 m^3, CLEEN_k 모델이 442,592 천 m^3, LandGEM 모델이 368,286 천 m^3 순으로 크게 산정되었다. 매립이 종료된 이후 2001년부터 2022년 최근까지 FOD 모델이 1,567,387 천 m^3, LandGEM 모델이 701,497 천 m^3, CLEEN_k 모델이 666,055 천 m^3, CLEEN 모델이 488,128 천 m^3 순으로 많은 양의 메탄 발생량이 산정되었다. 폐기물 발생량 산정 모델 모두 1992년 8월 매립 시작 이후 메탄 발생량이 증가하며, 2000년 10월 매립 종료 이후 발생량이 감소하는 추세를 보인다. 이는 메탄 발생량 산정 모델 모두 1차 분해식을 기반으로 산정하여 폐기물량에 의존하기 때문이다.

각 모델별 성능 비교를 위하여 현장 측정량과의 RMSE를 계산하였다. RMSE는 CLEEN_k 모델이 5,684 천 m^3, LandGEM 모델이 6,054 천 m^3, CLEEN 모델이 15,344 천 m^3, FOD 모델이 37,550 천 m^3 순으로 작았다. 이는 CLEEN_k와 LandGEM 모델이 현장 측정량에 대해 보정한 계수를 사용하였기 때문에 현장 측정량을 더 잘 모의하는 것으로 보인다. LandGEM은 현장 측정량을 잘 모의하지만, 연간 메탄 발생량만 산정할 수 있기 때문에, 계절별 메탄 발생량의 변화를 볼 수 없다. 또한 모델 산정에 기상 조건이 반영되지 않기 때문에 CLEEN_k 모델보다 매립지 현장 특성을 잘 보여주지 못한다. <표 10>은 모델별 기간별 메탄 발생량 산정 결과와 RMSE를 비교하였다.

<표 10> 수도권매립지 제1 매립장 모델별 산정량 및 RMSE 비교(단위: 천 m^3)

구분		CLEEN_k	CLEEN	FOD	LandGEM
기간	전 기간 (1992년 ~2022년)	1,108,647	1,165,788	2,381,794	1,069,784
	매립 종료 이전 (1992년 ~2000년)	442,592	677,660	814,407	368,286
	매립 종료 이후 (2001년 ~2022년)	666,055	488,128	1,567,387	701,497
	현장 측정 기간 (2005년 ~2019년)	294,107	157,338	930,898	410,827
RMSE		5,684	15,345	37,550	6,054

<그림 7>은 수도권 제1 매립장에 대하여 계산한 모델별 현장 측정량과의 RMSE를 나타내었다.



<그림 7> 수도권매립지 제1 매립장 모델별 현장 측정량과의 RMSE 비교
2005년부터 2019년까지 현장 측정량과 모델간의 RMSE를 비교함. 빨간색 바는 CLEEN_k, 남색 바는 CLEEN, 노란색 바는 FOD, 초록색 바는 LandGEM의 RMSE이다. 바 그래프 위의 숫자는 각 모델별 RMSE 값임.

3.3 미래 메탄 발생량 시나리오

매립지 메탄 발생량은 매립이 종료된 이후에도 최대 100년까지 발생할 수 있으며(Huber-Humer et al., 2009), 기후변화로 인해 평균 기온과 강수량이 상승하게 되면 매립지 메탄 발생량도 변화하게 될 것이다. 따라서 매립지 메탄 감축 계획 목표 수립을 위하여 기온과 강수량의 변화에 따른 메탄 발생량의 변화를 예측할 필요가 있다. 본 연구에서는 기상 조건을 반영하여 메탄 발생량을 산정할 수 있는 CLEEN_k 모델의 장점을 활용하여 기후변화 RCP (Representative Concentration Pathways, 대표농도경로) 시나리오에 따른 한반도 미래 기상 조건을 반영한 매립지 메탄 발생량을 예측하고자 하였다.

RCP 시나리오는 IPCC 5차 평가 보고서에서 사용된 시나리오로(Van Vuuren et al., 2007), RCP 4.5 (Clarke et al., 2007), RCP 6.0 (Hijioka et al., 2008), RCP 8.5 (Riahi et al., 2007) 네 가지가 있다. 각 시나리오는 인간 활동이 지구의 에너지 평형을 변화시키는 영향력의 정도를 나타낸다(IPCC, 2014). RCP 시나리오는 인간 활동 정도에 따라 시나리오가 나뉜다. RCP 2.6은 강력한 탄소 저감 정책이 사용되어 인간 활동에 의한 영향을 지구 스스로가 회복 가능한 시나리오이다. RCP 4.5와 RCP 6.0은 탄소 저감 정책이 실현되나 RCP 2.6보다 약간 더 많은 에너지를 사용하는 시나리오이다. RCP 4.5는 청정 에너지원과 탄소 포집 및 저장을 일부 사용하며 탄소 저감 정책이 상당히 실현되는 경우, RCP 6.0은 화석연료 사용에 의존하지만, 탄소 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우이다. 그리고 RCP 8.5는 탄소 저감 정책을 사용하지 않고 현재처럼 산업활동을 이어 나갔을 때의 시나리오이다(이철 외, 2014). 본 연구는 기상청 기후정보 포털에서 제공하는 RCP 시나리오별 평균 기온과 강수량을 사용한다. 기상청에서 국가 표준 시나리오로 제공하는 RCM(Regional Climate Model) 자료 중 하나인 영국 기상청 해들리 센터(United Kingdom Met Office Hadley Center)에서 개발한 HadGEM3-RA 기후모델 자료를 사용하였으며, 이는 RCP 시나리오별 한반도 시군구 지역단위에서의 데이터를 확인할 수 있다(기상청, 2018). 본 연구에서는 수도권매립지가 위치한 인천광역시 서구 지역의 2011년부터 2100년까지 월별 기상

자료를 사용하였다.

시나리오별 인천광역시 서구 월별 미래 예상 평균 기온(℃)과 연 강수량(mm)을 계절별로 전처리한 후 CLEEN_k 모델에 적용하여 수도권매립지 제1 매립장에서의 미래 예상 메탄 발생량을 산정하였다. 예상 기후는 현재(1992년~2022년), 21세기 전반기(2022년~2040년), 21세기 중반기(2041년~2070년), 21세기 후반기(2071년~2100년)로 기간을 구분하였으며, 메탄 발생량은 현재(1992년~2022년), 21세기 전반기(1992년~2040년), 21세기 중반기(1992년~2070년), 21세기 후반기(1992년~2100년)로 매립이 시작된 이후 예측 기간까지 누적 메탄 발생량을 산정하였다. <표 11>은 시나리오별 기간별 평균 기온과 강수량을 나타내었으며, <표 12>는 시나리오별 기간별 예상 누적 메탄 발생량과 이전 기간 대비 증가율을 비교하였다.

<표 11> 시나리오별 기간별 평균 기온 및 강수량(단위: ℃, mm)

구분	현재 기후 (1992년~2022년)		21세기 전반기 (2023년~2040년)		21세기 중반기 (2041년~2070년)		21세기 후반기 (2071년~2100년)	
	평균 기온 (℃)	연평균 강수량 (mm)	평균 기온 (℃)	연평균 강수량 (mm)	평균 기온 (℃)	연평균 강수량 (mm)	평균 기온 (℃)	연평균 강수량 (mm)
RCP 2.6	12.53	1197.2	13.68	1173.2	14.01	1137.2	14.09	1172.1
RCP 4.5			13.49	970.62	14.24	1316.9	14.97	1135
RCP 6.0			12.87	1133.1	13.39	1120	14.99	1156.5
RCP 8.0			13.31	1082.9	14.79	1158.6	16.8	1267.6

<표 12> 시나리오별 기간별 예상 누적 메탄 발생량 및 이전 기간 대비 증가량(단위: 백만 m^3, %)

구분	현재까지 (1992년~2022년)	21세기 전반기 (1992년~2040년)		21세기 중반기 (1992년~2070년)		21세기 후반기 (1992년~2100년)	
		누적량 (백만 m^3)	증가량 (%)	누적량 (백만 m^3)	증가량 (%)	누적량 (백만 m^3)	증가량 (%)
RCP 2.6	1,108,648	1,165	5.12	1,185	1.69	1,192	0.62
RCP 4.5		1,169	5.41	1,190	1.82	1,197	0.56
RCP 6.0		1,162	4.82	1,175	1.1	1,184	0.75
RCP 8.0		1,166	5.13	1,187	1.81	1,202	1.32

RCP 2.6 시나리오는 강력한 탄소 저감 정책이 사용되었을 때의 시나리오다. RCP 2.6 시나리오는 21세기 전반기 예상 평균 기온이 13.68℃, 연 강수량이 1173.2mm/d로 시나리오 중 가장 크지만 21세기 중반기 기온과 강수량 상승률이 감소하며 최종적으로 2100년까지 1,193 백만 m^3의 가장 적은 양의 메탄이 발생할 것으로 예상된다.

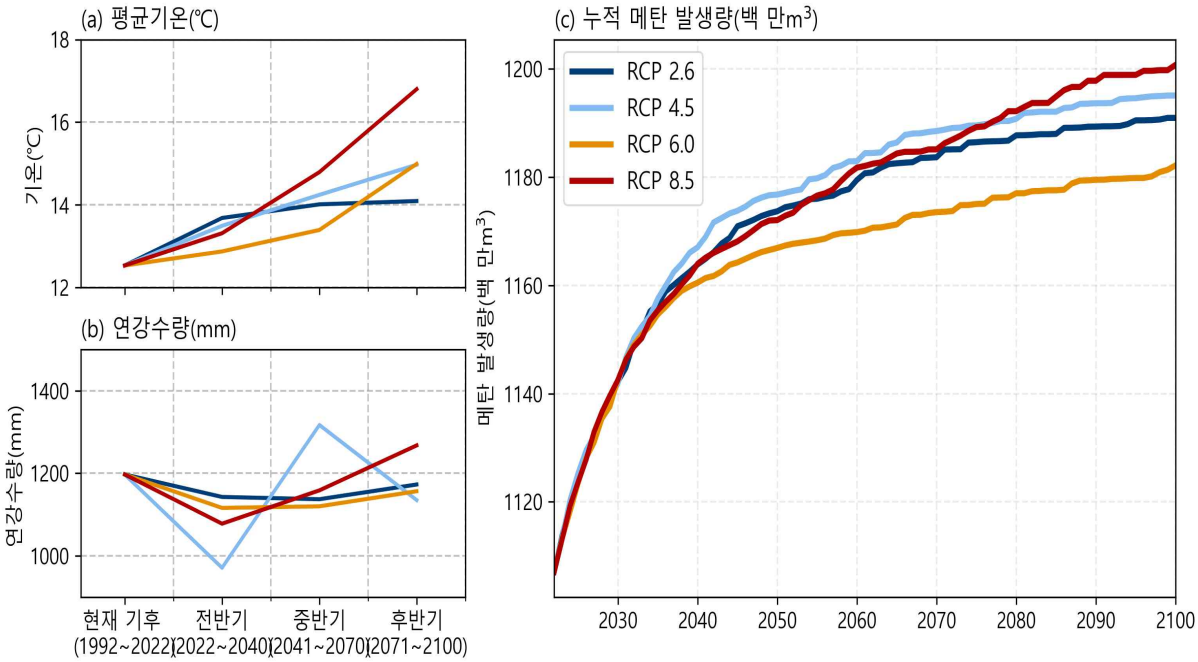
RCP 4.5 시나리오는 탄소 저감 정책이 상당히 시행될 때의 시나리오이다. RCP 4.5 시나리오의 평균 기온은 다른 시나리오에 비해 2번째로 크며, 강수량은 21세기 전반기에 감소하다 21세기 중반기 강수량이 급격히 증가한다. RCP 4.5 시나리오는 21세기 전반기와 중반기에 가장 많은 메탄양의 메탄이 발생하며,

2100년까지 총 1,197 백만 m^3로 두 번째로 많은 메탄이 발생할 것으로 예상된다.

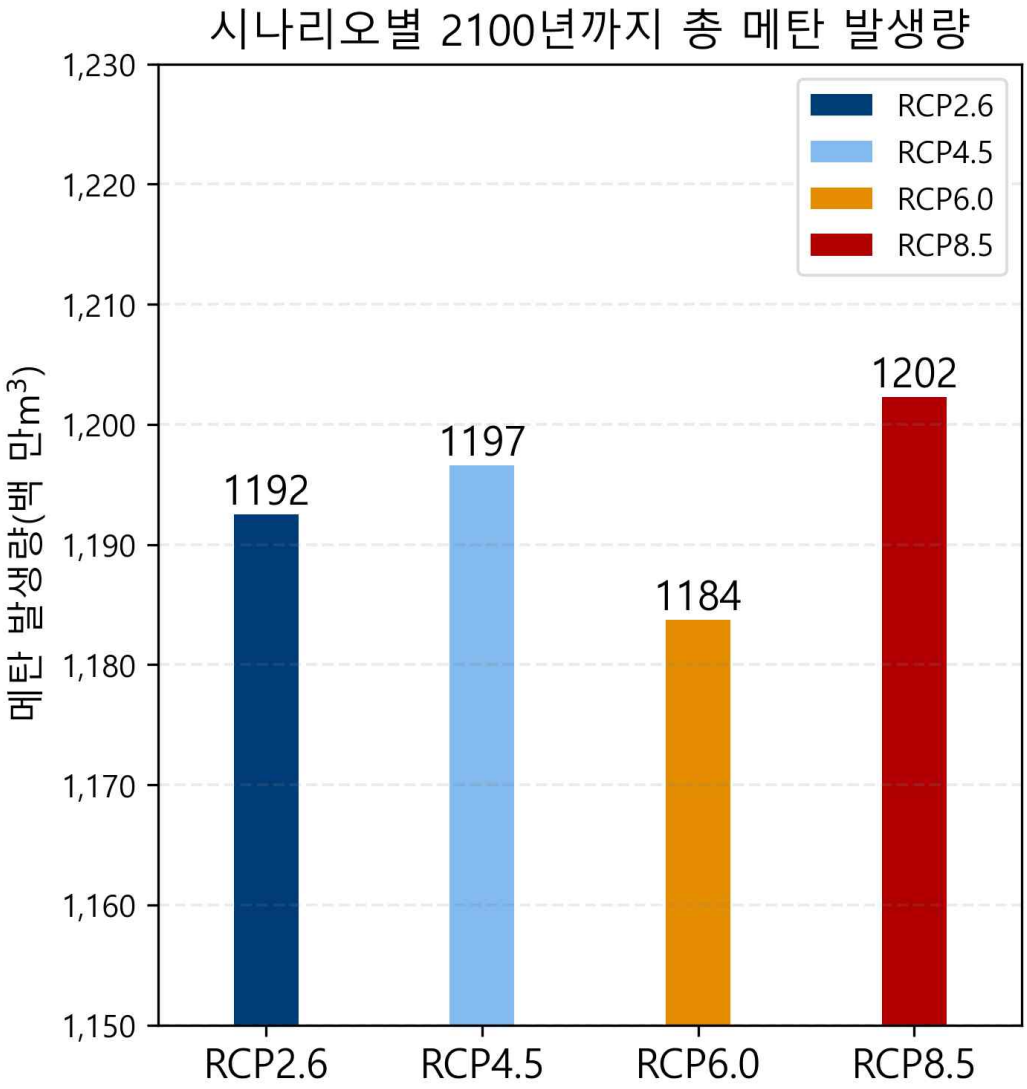
RCP 6.0 시나리오는 탄소 저감 정책이 어느 정도 시행될 때의 시나리오이다. RCP 6.0 시나리오의 예상 평균 기온은 21세기 전반기 12.87℃, 중반기 13.39℃로 다른 시나리오에 비해 가장 작다. RCP 6.0 시나리오의 2100년까지 누적 메탄 발생량은 1,184 백만 m^3로 다른 시나리오에 비해 가장 적을 것으로 예상된다.

RCP 8.5 시나리오는 현재의 산업활동을 이어갔을 때의 예상 기후와 누적 메탄 발생량을 나타낸다. RCP 8.5는 21세기 전반기 평균 기온이 13.21℃에서 중반기와 후반기에 14.79℃, 16.8℃로 다른 시나리오에 비해 가장 높아질 것으로 예상되며, 연 강수량도 21세기 후반기 1267.6mm로 가장 크다. RCP 8.5 시나리오의 2100년까지 누적 메탄 발생량은 1,202 백만 m^3로 가장 많은 양의 메탄이 발생할 것으로 예상된다.

시나리오별 미래 메탄 발생량은 큰 차이 없이 비슷하게 증가하다, 2035년부터 점차 차이가 벌어지기 시작한다. 21세기 전반기와 중반기까지 누적 메탄 발생량은 RCP 4.5, RCP 8.5, RCP 2.6, RCP 6.0 순으로 크며, 21세기 후반기 RCP 8.5, RCP 4.5, RCP 2.6, RCP 6.0으로 가장 많은 메탄이 발생할 것으로 예측되었다. 2100년까지 누적 메탄 발생량은 RCP 8.5 시나리오에서 가장 클 것으로 예상되었는데, 이는 21세기 중반기와 후반기 RCP 8.5 시나리오의 평균 기온과 강수량이 급격히 증가하기 때문으로 보인다. 가장 많은 양의 메탄이 예측된 RCP 8.5 시나리오와 가장 적은 양의 메탄이 예측된 RCP 6.0 시나리오에서의 메탄 발생량의 차이는 18.6백만 m^3로 이는 소 약 17만 마리가 1년간 배출하는 메탄과 맞먹는다(EPA, 2020). 이는 온도와 강수량이 증가할수록 매립지에서 발생 가능한 메탄이 증가할 수 있으며, 기후변화로 인한 평균 기온 및 강수량의 증가가 매립지에서 메탄 발생량의 증가로 이어질 수 있음을 시사한다. 따라서 정확한 메탄 발생량 산정을 위해 CLEEN_k 모델과 같이 미래 기온과 강수량의 변화를 고려하여 메탄 발생량을 산정할 필요가 있다. <그림 8> 시나리오별 기간별 예상 메탄 발생량을 나타내었으며, <그림 9>는 시나리오별 2100년까지 총 누적 메탄 발생량을 나타내었다.



<그림 8> RCP 미래 시나리오에 따른 기온, 강수량, 메탄 발생량 변화
(a) 기간별 시나리오에 따른 평균 기온 그래프. 1992년부터 2022년까지 현재 기후, 2022년부터 2040년까지 21세기 전반기, 2041년부터 2070년까지 21세기 중반기, 2071년부터 2100년까지 21세기 후반기로 구분함. 현재 기후는 1992년부터 2022년까지 수도권매립지 기상 정보로 사용한 ASOS 관측치를 사용하였으며, 2022년부터 2100년까지는 기후모델 값을 사용함. 평균 기온 단위는 ℃. 남색 실선은 RCP 2.6 시나리오, 하늘색 실선은 RCP 4.5 시나리오, 노란색 실선은 RCP 6.0 시나리오, 빨간색 실선은 RCP 8.5 시나리오를 나타냄. (b) 기간별 시나리오에 따른 연 누적 강수량 그래프. 각 구간의 평균 연 누적 강수량을 나타냈으며 단위는 mm. 시대 구분과 그래프 색은 그림 (a)와 동일. (c) 시나리오별 누적 메탄 발생량 그래프. 2023년부터 2100년까지 시나리오별 누적 메탄 발생량 그래프이며 단위는 백만 m^3. 그래프 색은 그림 (a)와 동일.



<그림 9> 시나리오별 2100년까지 누적 메탄 발생량
1992년부터 2100년까지 발생하는 총 메탄 발생량을 시나리오별로 비교함. 남색 바는 RCP 2.6 시나리오, 하늘색 바는 RCP 4.5 시나리오, 노란색 바는 RCP 6.0 시나리오, 빨간색 바는 RCP 8.5 시나리오를 나타냄. 바 그래프 위의 숫자는 시나리오별 2100년까지 총 누적 메탄 발생량 값이며 단위는 백만 m^3.

3.4 CLEEN_k 모델 적용성 평가

수도권매립지 제1 매립장 데이터를 기반으로 산출된 CLEEN_k 모델이 국내 다른 매립지에 대해서도 잘 모의가 되는지 확인하기 위하여 수도권매립지 제2 매립장과 난지도 매립지에 대하여 적용성 평가를 진행하였다.

수도권매립지 제2 매립장은 제1 매립장에 폐기물 매립이 종료된 후 2000년 10월부터 2018년 10월까지 서울, 인천, 경기 수도권 지역에서 발생한 폐기물이 매립되었다. 수도권매립지 제2 매립장은 제1 매립장과 비슷한 기상 조건을 가지고 있으며, 폐기물량 및 성상, 현장 측정량과 같은 데이터 관리도 비교적 잘 이루어지고 있어 모델의 적용성을 평가하기 적절하다고 판단하였다. 수도권매립지와 난지도 매립지의 위치는 <그림 10>과 같다.

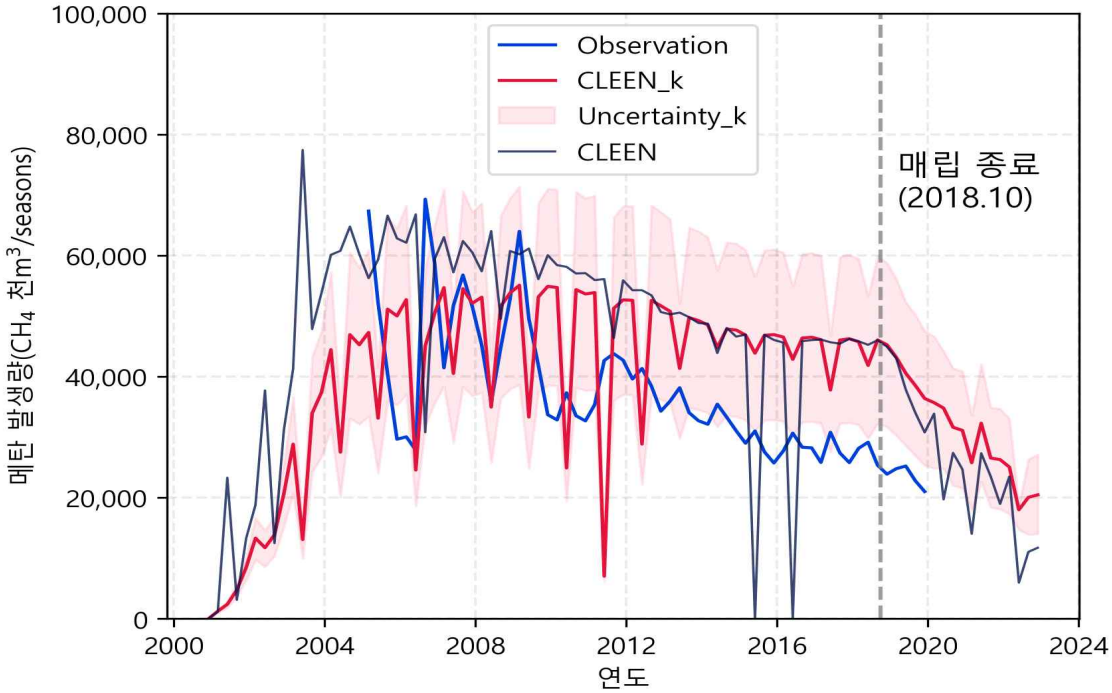
<그림 10> 인천 수도권매립지와 서울 난지도 매립지 위치

난지도 매립지는 서울시 마포구에 위치하며 1978년부터 1993년까지 서울시에서 발생한 폐기물을 처리하는 데 사용되었다. 난지도 매립지는 서울시 내 위치한 유일한 폐기물 매립지로 현재 매립이 종료되었지만, 2019년 서울시 메탄 배출량 중 가장 많은 부분(1473.61 Gg CO_2eq, 54.8 %)을 차지하고 있다. 따라서 서울에서의 메탄 관리를 위하여 폐기물 매립지에서의 메탄 발생량을 정확히 파악할 필요가 있다. 난지도 매립지는 비위생 단순 매립방식으로 운영되었으며, 매립 종료 후 침출수로 인한 토양 및 지하수 오염과 매립가스로 인한 대기오염이 우려되어 1997년 매립지 안정화 공사를 진행하였다(정하익, 2002; 송재민, 2017). 난지도 매립지는 수도권매립지와 비슷한 위·경도에 위치하여 계절별 기상 조건이 크게 차이 나지 않을 것으로 예상되며, 동일한 지역(서울시)에서 발생한 폐기물이 매립되었기 때문에, 폐기물 성상 또한 비슷하여 모델의 적용성 평가를 확인하는데 적절하다고 판단하였다. <그림 11>은 난지도 매립지의 위치와 모습을 나타내었다.

<그림 11> 난지도 매립지 위치

3.4.1 수도권매립지 제2 매립장 적용성 평가

CLEEN_k 모델을 수도권매립지 제2 매립장에 대하여 매립지 메탄 발생량을 산정하였다. 메탄 발생 잠재량(L_0)은 선행연구에서 수도권매립지 제2 매립장에 대하여 BMP 테스트를 한 결과의 중간값인 47.5 m^3CH_4/Mg (37~58 m^3CH_4/Mg)를 사용하였다(Park et al., 2018). k값은 수도권매립지 제2 매립장의 계절별 k_{lab}에 보정식 $F_{SU,k}$ (식 6)을 적용하여 보정된 k_{actual}로 메탄 발생량을 산정한 후 계절별 현장 측정량과 이를 비교하였다. 수도권매립지 제2 매립장은 2000년 10월부터 2018년 10월까지 매립이 진행되었다. 메탄 발생량 산정 시 사용한 활동자료는 수도권매립지 제1 매립장과 동일한 출처의 자료 <표 2>를 사용하였다. CLEEN_k의 제2 매립장의 계절별 메탄 발생량은 <그림 12>와 같다.



<그림 12> 수도권매립지 제2 매립장 계절별 모델별 현장 측정량과 메탄 발생량 비교
2000년 겨울부터 2022년 겨울까지 모델별로 산정된 메탄 발생량을 현장 측정량을 비교함. 파란 선은 현장 측정량, 빨간 선은 CLEEN_k로 산정한 메탄 발생량, 분홍색 면은 CLEEN_k의 불확도 범위, 남색 선은 CLEEN으로 산정한 메탄 발생량임. 세로 점선은 수도권매립지 제2 매립장의 매립이 종료된 시점인 2018년 10월.

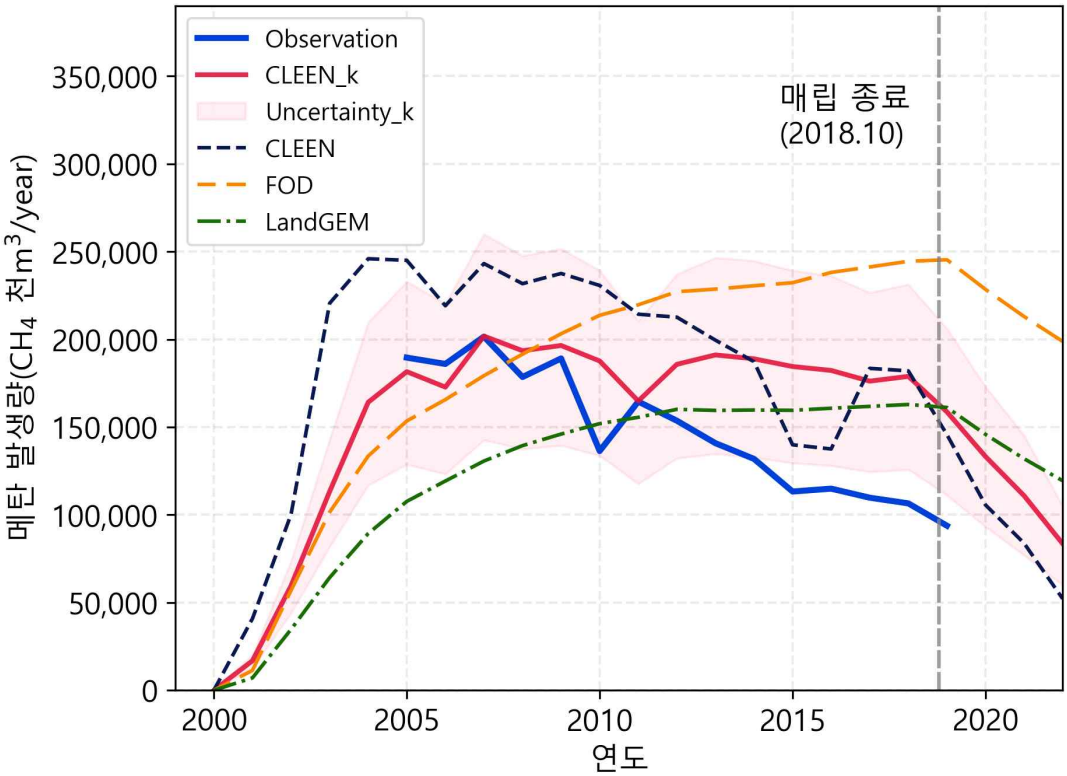
수도권매립지 제2 매립장에서 매립이 시작된 2000년 10월부터 최근 2022년 가을까지 CLEEN_k로 산정된 총 메탄 발생량은 3,405,699 천 m^3이며, CLEEN 모델로 산정된 총 메탄 발생량은 3,846,855 천 m^3로 CLEEN 모델이 CLEEN_k보다 많은 양의 메탄이 발생한 것으로 모의한다. 또한, CLEEN_k 모델은 2009년 봄에 최대 메탄 발생량 55,094 천 m^3를 모의하고, CLEEN 모델은 2003년 여름 최대 메탄 발생량 77,448 천 m^3로 약 40% 정도 크게 모의하였다.

2005년부터 2019년까지 수도권매립지 제2 매립장의 현장 측정량의 총 메탄 발생량은 2,210,055 천 m^3이며, CLEEN_k 모델 산정량은 2,744,826 천 m^3로 산정량이 현장 측정량과 약 24% 정도 차이가 난다. 이는 수도권매립지 제1 매립장에 대하여 산정한 보정 식이 제2 매립장에 적용하며 약간의 오차가 발생한 것으로 보인다. 2005년 봄부터 2019년 겨울까지 현장 측정 자료에 대하여 계절별 모델별 RMSE를 계산하였다. CLEEN_k의 RMSE는 16,142 천 m^3, CLEEN의 RMSE는 19,038 천 m^3로 CLEEN_k가 CLEEN보다 현장 측정량을 더 잘 모의하는 것으로 보인다. CLEEN_k와 CLEEN 모델로 메탄 발생량을 산정한 결과는 <표 13>과 같다.

<표 13> 수도권매립지 제2 매립장 CLEEN_k와 CLEEN 모델 산정량 비교(단위: 천 m^3)

구분		CLEEN_k	CLEEN
기간	전 기간 (2000년 겨울~2022년 가을)	3,405,699	3,846,855
	현장 측정 기간 (2005년 봄~2019년 겨울)	2,744,826	3,009,531
최대 메탄 발생량 (시점)		55,094 (2009년 봄)	77,448 (2003년 여름)
RMSE		16,142	19,038

FOD 모델과 LandGEM 모델로 수도권매립지 제2 매립장의 연간 메탄 발생량을 산정하여 모델별 연간 매립지 메탄 산정량을 비교하였다. 매립이 시작된 2000년부터 2022년까지 전체 기간에 대하여 모델별 산출된 총 메탄 발생량은 FOD 모델 4,157,494 천 m^3, CLEEN 모델 3,846,855 천 m^3, CLEEN_k 모델 3,405,699 천 m^3, LandGEM 모델 2,828,316 천 m^3 순으로 컸다. <그림 13>은 모델별 수도권매립지 제2 매립장의 연간 메탄 발생량과 현장 측정량을 나타내었다.



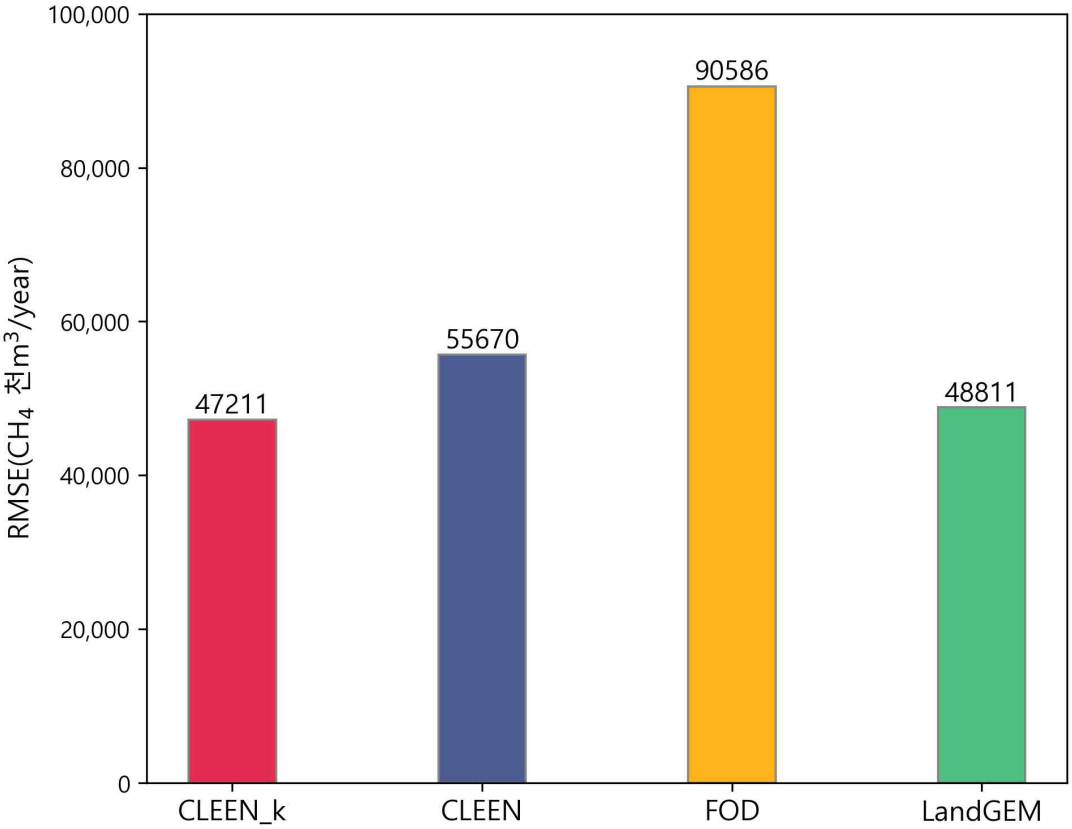
<그림 13> 수도권매립지 제2 매립장 연간 모델별 현장 측정량과 메탄 발생량 비교
2000년부터 2022년까지 모델별로 산정된 메탄 발생량을 현장 측정량과 비교함. 파란 선은 현장 측정량, 빨간 선은 CLEEN_k로 산정한 메탄 발생량, 분홍색 면은 CLEEN_k의 불확도 범위. 남색 점선은 CLEEN, 노란 점선은 FOD, 초록 점선은 LandGEM으로 산정한 메탄 발생량임. 세로 점선은 수도권매립지 제2 매립장의 매립이 종료된 시점인 2018년 10월.

모델별 산정량이 수도권매립지 제2 매립장의 현장 측정량을 얼마나 잘 모의하는지 비교하기 위하여 연간 메탄 발생량과 현장 측정량과의 RMSE를 계산하였다. 모델별 RMSE는 CLEEN_k 모델이 47,210 천 m^3, LandGEM 모델이 48,811 천 $m^{3,}$ CLEEN 모델이 56,277 천 m^3, FOD 모델이 90,586 천 m^3 순으로 작았으며 CLEEN_k 모델이 현장 측정량을 가장 잘 모의하는 것으로 보인다. 이는 위치와 기상 조건이 비슷한 매립지에 대하여 메탄 발생량을 산정하여 CLEEN_k 모델이 다른 모델에 비해 제2 매립장의 현장 측정량을 비교적 잘 모의하는 것으로 보인다. 수도권매립지 제2 매립장 모델별 연간 메탄 발생량과 RMSE는 <표 14>와 같다.

<표 14> 수도권매립지 제2 매립장 모델별 산정량 및 RMSE 비교(단위: 천 m^3)

구분		CLEEN_k	CLEEN	FOD	LandGEM
기간	전 기간 (2000년 ~2022년)	3,426,152	3,826,723	4,157,494	2,828,316
	현장 측정 기간 (2005년 ~2019년)	2,744,826	2,977,686	3,214,138	2,235,876
RMSE		47,211	55,670	90,586	48,811

<그림 14>는 수도권 제2 매립장에 대하여 계산한 모델별 현장 측정량과의 RMSE를 나타내었다.



<그림 14> 수도권매립지 제1 매립장 모델별 현장 측정량과의 RMSE 비교
2005년부터 2019년까지 현장 측정량과 모델간의 RMSE를 비교함. 빨간색 바는 CLEEN_k, 남색 바는 CLEEN, 노란색 바는 FOD, 초록색 바는 LandGEM의 RMSE. 바 그래프 위의 숫자는 각 모델의 RMSE.

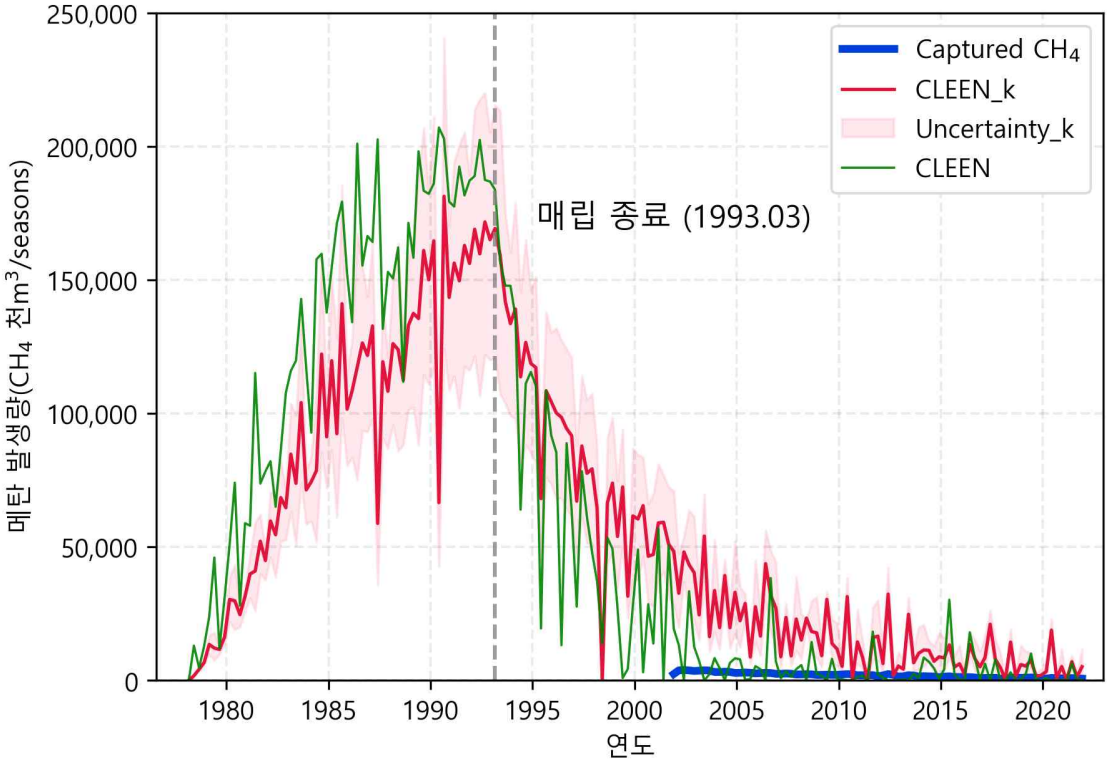
3.4.2 난지도 매립지 적용성 평가

난지도 매립지는 1978년 3월부터 1993년 3월까지 매립이 진행되었다. CLEEN_k 모델에서 산정된 보정 식 $F_{SU,k}$ (식 6)을 이용하여 난지도 매립지 계절별 k_{lab}을 k_{adj}로 보정하여 메탄 발생량을 산정하였다. CLEEN_k 모델로 산정한 메탄 발생량을 현장 실측값과 비교하고자 하였으나, 난지도 매립지에 대한 현장 실측이 이루어지지 않고 있다. 그래서 본 연구에서는 모델 산정량과 한국지역난방공사에서 제공하는 월별 LFG 가스 사용량과 비교하였다. 한국지역난방공사에서는 난지도 매립지에서 포집한 LFG 가스를 연료로 사용하고 있으며, 이는 현장 측정량(강제 포집량, 간이 소각량, 표면배출량) 중 강제 포집량에 해당한다. 난지도 매립지의 폐기물 조성에 대한 불확도는 2006 IPCC 가이드라인에서 제안하는 값을 사용하였다. 메탄 발생량 산정 시 사용한 활동자료의 기간과 출처 및 불확도는 <표 15>과 같다.

<표 15> 난지도 매립지 발생량 산정에 활용된 활동자료와 기간, 자료의 불확도 및 출처

활동자료	단위	기간	불확도	출처
폐기물 매립량	Mg	1978년~1992년	±30%	난지도 매립지 안정화공사 실시설계보고서 (서울시 건설안전본부)
폐기물 성상	%			
매립가스 포집량	Nm^3/min	2004년~2021년	-	한국지역난방공사 LFG 가스 월별 연료 사용량
월 평균 기온	℃	1978년 3월 ~ 2023년 2월	±0.3℃	종관기상관측망(ASOS)
월 누적 강수량	mm		±3%	

CLEEN_k와 CLEEN 모델 모두 매립 종료 이전까지 메탄 발생량이 점차 증가하다, 매립 종료 이후 메탄 발생량이 감소하는 경향을 나타낸다. CLEEN_k와 CLEEN 모델로 산정한 난지도 매립지의 계절별 메탄 발생량은 <그림 15>와 같다.



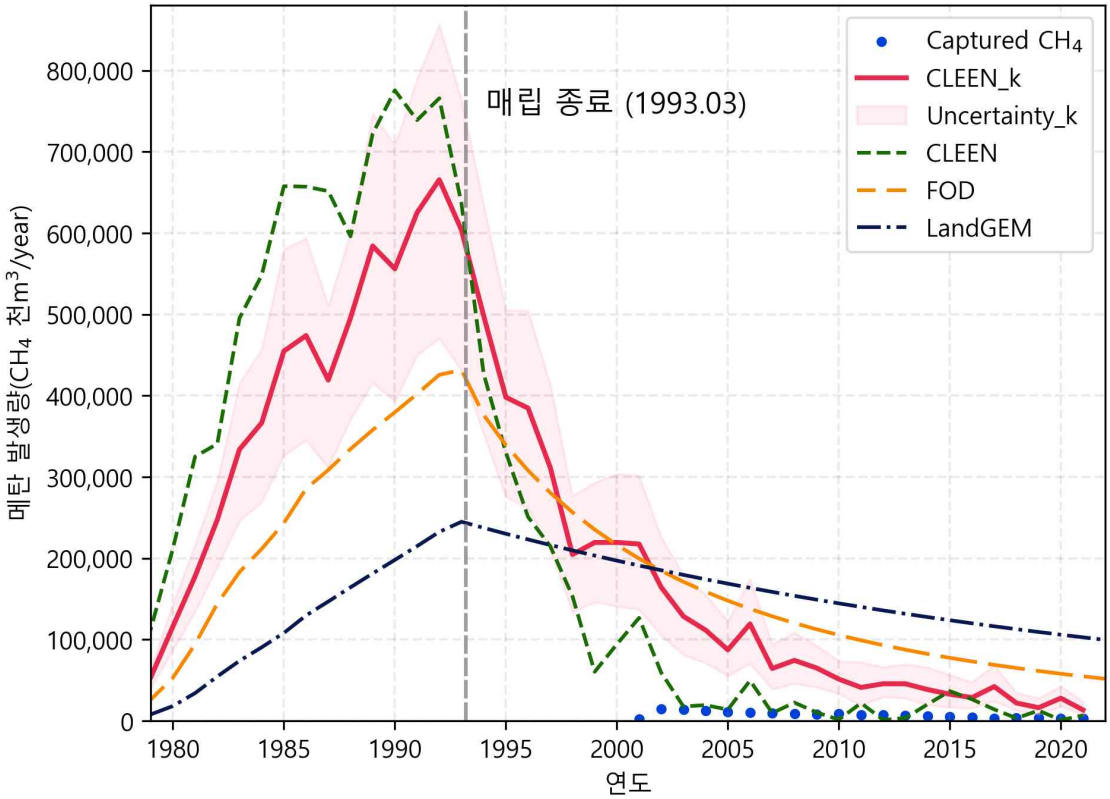
<그림 15> 난지도 매립지 가스 포집량과 계절별 모델별 메탄 발생량 비교
1978년 봄부터 2022년 겨울까지 모델별로 산정된 메탄 발생량을 현장 측정량과 비교하였다. 파란 선은 현장 측정량, 빨간 선은 CLEEN_k로 산정한 메탄 발생량, 분홍색 범위는 CLEEN_k의 불확도 범위, 녹색 선은 CLEEN으로 산정한 메탄 발생량이다. 세로 점선은 난지도 매립지의 매립이 종료된 시점인 1993년 3월을 표시하였다.

전체 기간인 1978년 겨울부터 2022년 겨울까지 CLEEN_k의 총 메탄 발생량은 9,862,550 천 m^3이고 CLEEN의 총 메탄 발생량이 10,277,685 천 m^3이다. 매립이 진행되었던 1978년 겨울부터 1992년 겨울까지 산정된 CLEEN_k의 총 메탄 발생량은 6,052,952 천 m^3, CLEEN 모델이 8,118,648 천 m^3로 CLEEN 모델이 CLEEN_k 모델보다 약 34% 크게 산정되었다. 매립이 종료된 이후 1993년 봄부터 2022년 겨울까지는 CLEEN_k의 메탄 발생량이 3,809,598 천 m^3이고, CLEEN의 메탄 발생량이 2,159,037 천 m^3로 CLEEN_k 모델이 약 43% 더 크게 산정되었다. 모델별 최대 메탄 발생량은 CLEEN_k 모델에서는 1990년 가을 181,354 천 m^3를 모의하였고, CLEEN 모델에서는 1990년 여름 207,140 천 m^3만큼 모의하였다. CLEEN 모델의 최대 발생량이 CLEEN_k 모델보다 약 14% 더 크게 모의 되었으며, 이는 수도권매립지 제1 매립장에서 산정된 결과에서도 비슷한 추세를 확인할 수 있었다. CLEEN_k와 CLEEN 모델로 산정한 난지도 매립지의 기간별 메탄 발생량과 최대 메탄 발생량은 <표 16>와 같다.

<표 16> 난지도 매립지 CLEEN_k와 CLEEN 모델 산정량 비교(단위: 천 m^3)

구분		CLEEN_k	CLEEN
기간	전 기간 (1978년 겨울~2022년 겨울)	9,862,550	10,277,685
	매립 종료 이전 (1978년 겨울~1992년 겨울)	5,582,732	7,629,930
	매립 종료 이후 (1993년 봄~2022년 겨울)	4,279,818	2,647,756
최대 메탄 발생량 (시점)		181,354 (1990년 가을)	207,140 (1990년 여름)

난지도 매립지의 연간 메탄 발생량을 산정하여 FOD 모델과 LandGEM 모델에 대하여 비교하였다. 난지도 매립지가 운영이 시작된 1978년부터 2022년 겨울까지 모델별 총 메탄 발생량은 CLEEN 모델이 10,247,171 천 m^3, CLEEN_k 모델이 9,960,381 천 m^3, FOD 모델이 8,183,636 천 m^3, LandGEM 모델 6,414,595 천 m^3 순으로 컸다. 모델별 산정된 난지도 매립지의 연간 메탄 발생량은 <그림 16>과 같다.



<그림 16> 난지도 매립지 가스 포집량과 연간 모델별 메탄 발생량 비교
1978년 봄부터 2022년 겨울까지 모델별로 산정된 메탄 발생량을 현장 측정량과 비교하였다. 파란 선은 현장 측정량, 빨간 선은 CLEEN_k로 산정한 메탄 발생량, 분홍색 범위는 CLEEN_k의 불확도 범위이다. 남색 점선은 CLEEN, 노란 점선은 FOD, 초록 점선은 LandGEM으로 산정한 메탄 발생량이다. 세로 점선은 수도권매립지 수도권매립지의 매립이 종료된 시점인 1993년 3월을 표시하였다.

난지도 매립지에서 1978년 매립이 시작되고 2000년 매립이 종료될 동안의 모델별 총 메탄 발생량은 CLEEN 모델이 8,123,366 천 m^3, CLEEN_k 모델이 6,174,031 천 m^3, FOD 3,881,661 천 m^3, LandGEM 모델이 1,900,636 천 m^3 순으로 컸다. 매립이 종료된 이후 2001년부터 2022년까지 모델별 총 메탄 발생량은 LandGEM 모델이 4,513,959 천 m^3, FOD 모델이 4,301,975 천 m^3, CLEEN_k 모델이 3,675,950 천 m^3, CLEEN 모델이 2,011,200 천 m^3 순으로 컸다. 매립이 진행되는 동안은 CLEEN 모델이 가장 많은 양의 메탄 발생량을 모의하였으나, 매립 종료 이후에는 가장 적은 양의 메탄 발생량을 모의하였다. 이는 1차 분해 식이 폐기물 매립량에 크게 의존하는 모델이기 때문으로 추정된다. 난지도 매립지 모델 산정량과 비교한 현장 실측값은 매립가스 포집량으로, 실제 메탄 발생량의 일부이기 때문에, 모델 산정량이 포집량에 비해 크게 산정된 것으로 보인다. 모델별 난지도 매립지 연간 메탄 발생량은 <표 17>과 같다.

<표 17> 난지도 매립지 모델별 산정량 비교(단위: 천 m^3)

구분		CLEEN_k	CLEEN	FOD	LandGEM
기간	전 기간 (1978년 ~2022년)	9,849,981	10,247,171	8,183,636	6,414,595
	매립 종료 이전 (1992년 ~2000년)	6,174,031	8,123,366	3,881,662	1,900,636
	매립 종료 이후 (2001년 ~2022년)	3,675,950	2,011,200	4,301,975	4,513,959
	현장 측정 기간 (2005년 ~2019년)	1,221,836	353,219	2,089,191	2,805,187

3.5 국가 온실가스 인벤토리와 비교

CLEEN_k 모델의 메탄 산정량이 어느 정도인지 확인하기 위해 현장 측정량과 국가 온실가스 인벤토리, 인천연구원 폐기물 부문 온실가스 산정량을 비교하였다. 온실가스 인벤토리는 폐기물 매립 부문 메탄 배출량을 메탄 발생량에서 수직가스 포집정에서 회수되거나 산화되는 양을 제외하여 산정한다(Eggleston et al., 2006). 메탄 배출량 산정 식은 (식 16)과 같다.

$CH_4 Emissions = [CH_4 generated_T - R_T] \times (1 - OX)$ (식 16)

$CH_4 Emissions$: 메탄 배출량, T 년도에 배출되는 CH_4, tCH_4/yr

$CH_4 generate_T$: 메탄 발생량, T 년도에 발생한 CH_4, tCH_4/yr

T : 배출량 산정년도

R_T : T 년도에 회수되는 CH_4, tCH_4/yr

OX : 산화율, Fraction

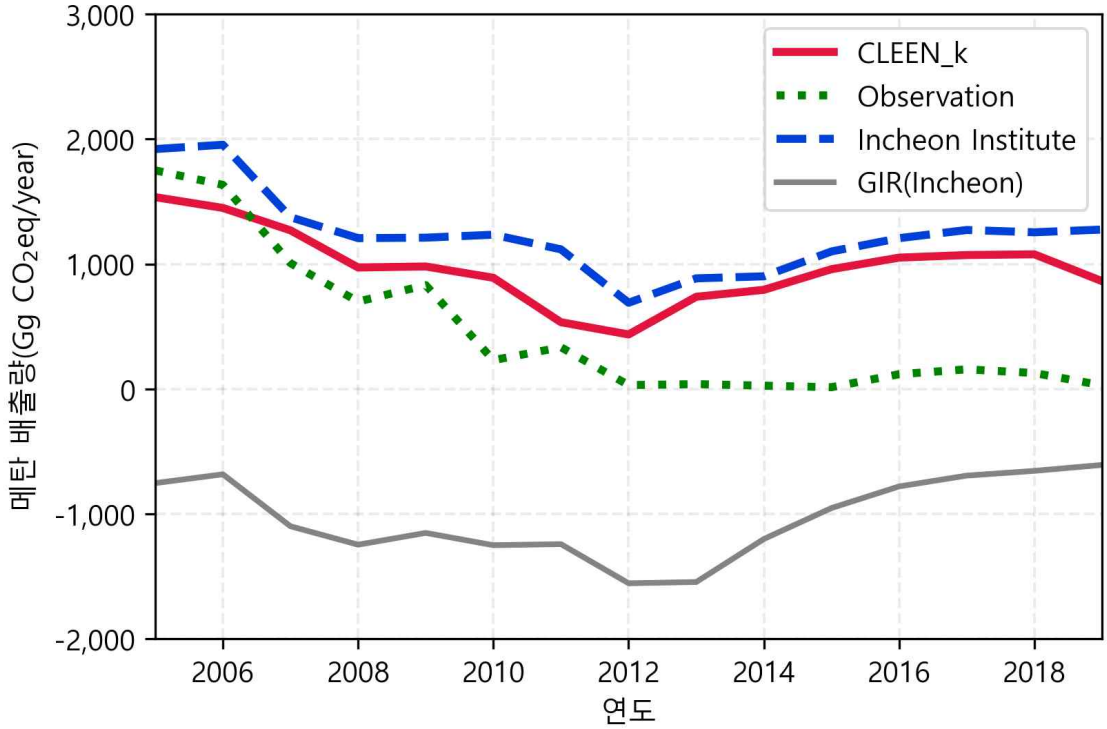
CLEEN_k로 산정된 메탄 발생량을 배출량으로 변환하기 위해 메탄 회수량(R_T)은 수도권매립지 관리공사에서 제공하는 1998년부터 2019년까지 연도별 메탄 회수량을 사용하였으며, 산화율(OX)은 국가 온실가스 인벤토리에서 제안하는 값 (OX = 0.1)을 사용하였다.

현장 측정량은 2005년부터 2019년까지 수도권매립지에서 수행된 배출경로별 매립지 현장 측정량을 사용하였다. 수직 가스 포집정, 간이소각기, 표면발산에서 측정된 메탄 중 수직 가스 포집정에서 회수되는 양을 제외하고 산화율을 적용하여 현장 측정량을 메탄 배출량으로 계산하였다.

국가 온실가스 인벤토리(GIR, Greenhouse gas Inventor Report)는 1990년부터 2019년까지 광역지자체별 부문별 온실가스 배출량을 산정하고 있다. 그 중, 인천광역시 폐기물 매립 부문 온실가스 배출량은 2006 IPCC GL을 기준으로 인천시에서 발생하는 폐기물량에 대해 산정하고 있다.

국가 온실가스 인벤토리와 함께 인천연구원(Incheon Institute)에서

자체적으로 산정하는 인천광역시 폐기물 부문 온실가스 산정량과 비교하였다. 인천연구원에서는 2005년부터 2019년까지 수도권매립지 전체 반입량 기준 폐기물 매립에 의한 온실가스 배출량을 산정하였다. 온실가스 배출량은 '지자체 온실가스 배출량 산정지침'에 따라 IPCC 2006 GL의 Tier 2 방법인 FOD(First Order Decay) 방식을 적용하여 산정하였다. 1992년부터 2019년까지 인천시 고형 폐기물 매립 부문에 대하여 계산한 CLEEN_k 메탄 배출량과 인벤토리 및 관측량을 비교한 결과는 <그림 17>과 같다.



<그림 17> CLEEN_k 모델로 산정한 배출량과 국가 온실가스 인벤토리, 현장 실측값 비교
1992년부터 2019년까지 국가 온실가스 인벤토리 인천시 폐기물 매립 부문 메탄 배출량과 CLEEN_k 모델 산정량과 비교함. 빨간색 실선은 CLEEN_k 모델로 산정한 메탄 배출량, 초록색 점선은 현장 측정량을 기반으로 산정한 배출량, 파란색 점선은 인천연구원에서 산정한 수도권매립지 배출량, 회색 실선은 국가 온실가스 인벤토리 인천지역 배출량을 나타냄.

CLEEN_k로 산정한 메탄 배출량은 제2 매립장에서 매립이 시작된 2000년부터 배출량이 증가하다 2006년 12월 50MW 매립가스 발전시설이 준공되며 메탄 회수량이 증가하며 메탄 배출량도 감소하는 추세를 보인다. 2013년부터 메탄 회수량이 지속적으로 감소하며 메탄 배출량도 증가하는 추세를 보인다.

산정 방법별 메탄 배출량은 인천연구원, CLEEN_k, 현장 측정량, 국가 온실가스 인벤토리 순으로 컸다. 인천연구원은 매립지 메탄 배출량 산정 시 FOD 방법을 사용하여 CLEEN_k 배출량보다 크게 산정된 것으로 보인다. CLEEN_k와 인천연구원 메탄 배출량이 현장 측정량에 비해 과대 추정하고 있는 것으로 보인다. 이는 선행연구에서 모델 산정량이 현장 측정량보다 크게 산정되는 것과 비슷한 추세로 보인다(Karanjekar et al., 2015; Amini et al., 2013). 국가 온실가스 인벤토리에서 산정한 인천시 메탄 배출량은 음수값을 보이는데, 이는 인천광역시에서 발생한 폐기물량 기준 메탄 발생량에서 수도권매립지 메탄 회수량 전량을 적용하였기 때문이다(인천연구원, 2021). 수도권매립지는 인천, 서울, 경기지역에서 배출된 폐기물을 모두 매립하고 있어 인천광역시 폐기물에 의한 메탄 발생량에서 수도권매립지 전체 메탄 회수량을 제외하여 음의 배출량이 산정된 것으로 보인다. 이는 선행연구에서도 인벤토리 배출량이 모델 산정량과 현장 측정량보다 작게 산정되는 경향을 확인할 수 있다(Yeşiller et al., 2022; Gollapalli et al., 2018). 인천시 폐기물 부문 메탄 배출량에 대하여 CLEEN_k 모델 산정량과 국가 온실가스 인벤토리 산정량, 현장 측정량은 <표 18>과 같다.

<표 18> 연도별 CLEEN_k 산정량, 인벤토리, 현장 실측량 비교(단위: Gg CO_2eq)

연도	CLEEN_k	현장 측정량	인천연구원	온실가스 인벤토리
2005	1,535.118	1,749.462	1,920.012	-753.85
2006	1,448.9045	1,633.687	1,954.54	-683.225
2007	1,269.5892	1,006.926	1,374.434	-1,099.29
2008	972.03014	699.0981	1,207.158	-1,246.67
2009	980.17776	830.7706	1,210.819	-1,152.37
2010	889.7169	230.6447	1,234.585	-1,250.86
2011	533.83755	333.5563	1,117.057	-1,242.28
2012	436.0305	30.71311	689.74	-1,555.51
2013	737.64543	38.27809	885.154	-1,545.51
2014	793.5397	26.02422	901.475	-1,201.17
2015	958.449	14.01438	1,100.594	-953.327
2016	1,051.1331	118.0415	1,206.788	-780.257
2017	1,071.6907	156.86	1,272.203	-693.755
2018	1,077.4351	127.3496	1,253.965	-655.834
2019	862.7918	28.9648	1,275.734	-608.308

Ⅳ. 결론 및 토의

본 연구에서는 폐기물 매립지에서 발생하는 메탄 발생량 추정 모델의 정확도를 개선하고자 기존의 CLEEN 모델에 계절별 매립지 메탄 현장 측정량과 기상 데이터를 반영하여 수도권매립지에 최적화된 CLEEN_k 모델로 개선하였다. CLEEN_k 모델은 실험실에서 폐기물 분해 실험을 기반으로 산정된 메탄 발생 속도 상수를 현장 측정량에 대해 보정한 k_{adj}를 사용하여 수도권매립지 제1 매립장의 메탄 발생량을 산정한다. 다중 선형 회귀를 통해 온도와 강수량에 대한 k_{adj}를 결정하는 보정 식 $F_{su,k}$ (R^2=0.83)를 산정하였으며, 이를 적용해 수도권매립지 제1 매립장의 메탄 발생량을 추정하였다.

CLEEN_k 모델은 매립지 현장의 계절별 온도와 강수량을 반영하여 메탄 발생량을 산정하기 때문에 기존의 FOD와 LandGEM 모델과 달리 계절별로 메탄 발생량을 산정할 수 있어 매립지에서 발생하는 메탄의 계절적 특성을 파악할 수 있다. 또한 CLEEN_k는 매립지 현장의 기상 특성과 현장 측정량을 반영하여 최적화하였기 때문에, 다른 모델들에 비해 매립지의 메탄 발생 특성을 더 잘 모의하는 것으로 보인다.

매립지 메탄 현장 측정량은 수도권매립지 관리공사에서 계절별로 데이터를 확보할 수 있어 CLEEN_k 모델은 수도권매립지 제1 매립장의 계절별 메탄 발생량을 산정할 수 있었다. 월별 현장 측정량과 같이 고해상도의 매립지 메탄 현장 측정량 활동자료를 활용한다면 시간 해상도가 더 높은 매립지 메탄 발생량 산정이 가능하다. 또한 현장 측정 데이터 수와 관측 횟수가 더 증가한다면 모델의 현장 측정량 모의 성능과 모델이 모의할 수 있는 대상지가 더 증가할 것이다. 따라서 추후에 매립지 메탄 발생량 산정모델을 개선하기 위하여 더 많은 양의 관측 횟수와 현장 실측이 필요할 것으로 보인다.

매립지에서 미생물에 의한 폐기물 분해에 따른 메탄 발생량은 온도와 강수량에 영향을 받는다. 기후변화로 인해 평균 기온과 강수량이 증가할 것으로 예상되며 이는 매립지 메탄 발생 조건에도 영향을 준다. 따라서 효과적인 미래 메탄 저감 정책 수립 및 계획 설정에 있어 미래 기상 변화를 고려하여 미래 메탄

발생량을 산정할 필요가 있다. 본 연구에서는 RCP 미래 기후 시나리오에 따라 CLEEN_k 모델에 한반도 미래 예상 기후를 반영하여 21세기 매립지 메탄 발생량을 예측하였다. 그 결과 기후변화로 인해 미래에 평균 기온과 강수량이 증가하게 된다면 매립지에서의 메탄 발생량도 더 증가하는 것으로 모의 되었다. 특히 가장 많은 기온과 강수량의 증가가 있을 것으로 예상되는 RCP 8.5 시나리오에서 가장 많은 양의 메탄이 발생할 것으로 예상되었다. 반면에, 시나리오 중 2100년까지 가장 적은 양의 메탄이 발생할 것으로 예상되는 RCP 6.0 시나리오는 21세기 중반기까지 기온 상승률이 낮다, 후반기에 급증한다. 이는 기상 조건에 따라 매립지에서의 미래 메탄 발생량이 영향받을 수 있으며, 특히 21세기 후반기보다 초중반 기온과 강수량이 매립지 메탄에 큰 영향을 줄 것으로 보인다. 이는 매립량에 상당히 의존하는 폐기물 1차 분해 식이 수도권매립지 제1 매립장과 같이 매립이 종료된 매립지에 대해 후반기로 갈수록 폐기물량 자체가 줄어들어 메탄 발생량이 감소하여 기온과 강수량에 대한 영향을 적게 받기 때문이다. 따라서 효과적인 메탄 감축을 위해 미래 기후와 매립지 특성을 고려하여 매립지 메탄 발생량 산정할 필요가 있으며, 2050년 이전까지 빠르게 지구 온난화를 완화해야 매립지에서 발생하는 메탄 배출량을 효과적으로 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

수도권매립지 제1 매립장 현장 측정량에 대해 산정한 보정 계수를 수도권매립지 제2 매립장과 난지도 매립지에 사용하여 모델의 적용성 평가를 진행하였다. 수도권매립지 제2 매립장에 대하여 적용성 평가를 진행한 결과 CLEEN_k 모델이 국내 매립지 현장 측정량과의 RMSE가 가장 작았지만, 2011년 이후로 현장 측정량과의 차이가 점차 증가한다. 이는 CLEEN_k 모델이 수도권매립지 제1 매립장에 최적화되어 다른 매립지에 적용하였을 때 약간의 오차가 발생하는 것으로 보인다. 따라서 각 매립지에 최적화된 메탄 발생량 산정을 위해서는 각 매립지의 현장 특성이 반영된 모델이 필요하다.

CLEEN_k 모델은 기후변화를 고려하여 미래 메탄 발생량을 추정할 수 있어 추후 국내 메탄 배출량을 관리하고, 폐기물 관련 정책과 계획을 수립할 때 활용될 수 있다. 또한 세계적으로 상당한 규모의 수도권매립지에서 발생하는 메탄을 정확히 파악하고 관리한다면 국내뿐만 아니라 전 지구 메탄 관리 및 감축에도 크게

기여할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

Allen, D. T. (2014). Methane emissions from natural gas production and use: reconciling bottom-up and top-down measurements. Current Opinion in Chemical Engineering, 5, 78-83.

Amini, H. R., Reinhart, D. R., & Niskanen, A. (2013). Comparison of first-order-decay modeled and actual field measured municipal solid waste landfill methane data. Waste management, 33(12), 2720-2728.

Barlaz, M. A., Ham, R. K., Schaefer, D. M., & Isaacson, R. (1990). Methane production from municipal refuse: a review of enhancement techniques and microbial dynamics. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 19(6), 557-584.

Barlaz, M.A., (2006). Forest products decomposition in municipal solid waste landfills.Waste Manage. 26 (4), 321 - 333.

Chakma, S., & Mathur, S. (2007). Settlement of MSW landfills due to biodegradation. In Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management, Chennai, India (pp. 234-238). Centre for Environmental Studies, Anna University, Chennai, India.

Coelho, L. C., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2014). Thirty years of inventory routing. Transportation Science, 48(1), 1-19.

Collins, W. J., Webber, C. P., Cox, P. M., Huntingford, C., Lowe, J., Sitch, S., ... & Powell, T. (2018). Increased importance of methane reduction for a 1.5 degree target. Environmental Research Letters, 13(5), 054003.

Delkash, M., Chow, F. K., & Imhoff, P. T. (2022). Diurnal landfill methane flux patterns across different seasons at a landfill in Southeastern US. Waste Management, 144, 76-86.

Dias, D., Amorim, J. H., Sá, E., Borrego, C., Fontes, T., Fernandes, P., ... & Tchepel, O. (2018). Assessing the importance of transportation activity data for urban emission inventories. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 62, 27-35.

Dlugokencky, E. J., Nisbet, E. G., Fisher, R., & Lowry, D. (2011). Global atmospheric methane: budget, changes and dangers. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 369(1943), 2058-2072.

Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.

Eklund, B., Anderson, E. P., Walker, B. L., & Burrows, D. B. (1998). Characterization of landfill gas composition at the fresh kills municipal solid-waste landfill. Environmental Science & Technology, 32(15), 2233-2237.

EPA, (2020). Agriculture and Aquaculture: Food for Thought, Southeast New England Program.

Gebert, J., Rachor, I., Gröngröft, A., & Pfeiffer, E. M. (2011). Temporal variability of soil gas composition in landfill covers. Waste Management, 31(5), 935-945.

Gollapalli, M., & Kota, S. H. (2018). Methane emissions from a landfill in north-east India: Performance of various landfill gas emission models. Environmental Pollution, 234, 174-180.

Hijioka, Y., Y. Matsuoka, H. Nishimoto, M. Masui, and M. Kainuma (2008). Global GHG

emissions scenarios under GHG concentration stabilization targets. J. Global Environ. Eng., 13, 97-108.

Huber-Humer, M., Gebert, J., & Hilger, H. (2008). Biotic systems to mitigate landfill methane emissions. Waste Management & Research, 26(1), 33-46.

Huber-Humer, M., Röder, S., & Lechner, P. (2009). Approaches to assess biocover performance on landfills. Waste management, 29(7), 2092-2104.

IPCC. (1997). Revised 1996 IPCC Guideline for national greenhouse gas inventories.

IPCC, (2014) "AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014", Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Eds. Pachauri RK, Meyer LA. Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC, (2021) Sixth Assessment Report, Climate Change 2021: The Physical Science Basis, the Working Group I

Karanjekar, R. V., Bhatt, A., Altouqui, S., Jangikhatoonabad, N., Durai, V., Sattler, M. L., ... & Chen, V. (2015). Estimating methane emissions from landfills based on rainfall, ambient temperature, and waste composition: The CLEEN model. Waste Management, 46, 389-398.

Kumar, S., Mondal, A. N., Gaikwad, S. A., Devotta, S., & Singh, R. N. (2004). Qualitative assessment of methane emission inventory from municipal solid waste disposal sites: a case study. Atmospheric environment, 38(29), 4921-4929.

Lan, X., K.W. Thoning, and E.J. Dlugokencky:(2023) Trends in globally-averaged CH4, N2O, and SF6 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2023-03, https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10

Machado, S.L., Carvalho, M.F., Gourc, J.P., Vilar, O.M., Do Nascimento, J.C.F., (2009). Methane generation in tropical landfills: simplified methods and field results.Waste Manage. 29 (1), 153 - 161.

Mata Alvarez, J., & Martinez Viturtia, A. (1986). Laboratory simulation of municipal solid waste fermentation with leachate recycle. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 36(12), 547-556.

Mehta, R., Barlaz, M. A., Yazdani, R., Augenstein, D., Bryars, M., & Sinderson, L. (2002). Refuse decomposition in the presence and absence of leachate recirculation. Journal of Environmental Engineering, 128(3), 228-236.

Nisbet, E., & Weiss, R. (2010). Top-down versus bottom-up. Science, 328(5983), 1241-1243.

Oonk, J., & Boom, A. (1995). Landfill gas formation, recovery and emissions.

Park, J. K., Chong, Y. G., Tameda, K., & Lee, N. H. (2018). Methods for determining the methane generation potential and methane generation rate constant for the FOD model: a review. Waste Management & Research, 36(3), 200-220.

Qin, Y., Xi, B., Sun, X., Zhang, H., Xue, C., & Wu, B. (2022). Methane emission reduction and biological characteristics of landfill cover soil amended with hydrophobic biochar. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 10.

Rachor, I. M., Gebert, J., Gröngröft, A., & Pfeiffer, E. M. (2013). Variability of methane emissions from an old landfill over different time scales. European Journal of Soil Science, 64(1), 16-26.

Ress, B.B., Calvert, P.P., Pettigrew, C.A., Barlaz, M.A., (1998). Testing anaerobic biodegradability of polymers in a laboratory-scale simulated landfill. Environ.Sci. Technol. 32 (6), 821 - 827.

Riahi, K., A. Gruebler, and N. Nakicenovic, (2007): Scenarios of longterm socio-economic and environmental development under climate stabilization. Technol.Forecasting

Soc. Change, 74, 887-935.

Robertson, J. (2017). Methane Reducing Technologies: Efficiency, Effectiveness, and Reception.

Saunois, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., ... & Zhuang, Q. (2020). The global methane budget 2000‐2017. Earth system science data, 12(3), 1561-1623.

Schroth, M. H., Eugster, W., Gómez, K. E., Gonzalez-Gil, G., Niklaus, P. A., & Oester, P. (2012). Above-and below-ground methane fluxes and methanotrophic activity in a landfill-cover soil. Waste management, 32(5), 879-889.

Statista Search Department (2023a), Daily volume of waste dumped at the largest landfills worldwide as of 2022, Statista, https://www.statista.com/statistics/1252697/largest-dump-sites-by-daily-volume-worldwide/

Statista Search Department (2023b), Size of some of the largest landfills globally as of 2019, Statista, https://www.statista.com/statistics/530481/largest-dump-sites-worldwide/

Tchepel, O., Dias, D., Ferreira, J., Tavares, R., Isabel Miranda, A., & Borrego, C. (2012). Emission modelling of hazardous air pollutants from road transport at urban scale. Transport, 27(3), 299-306.

Tecle, D., Lee, J., & Hasan, S. (2009). Quantitative analysis of physical and geotechnical factors affecting methane emission in municipal solid waste landfill. Environmental Geology, 56, 1135-1143.

Thorneloe, S.A., Reisdorph, A., Laur, M., Pelt, R., Bass, R.L., Burklin, C. (1999). The US Environmental Protection Agency's landfill gas emissions model (LandGEM). 4, 11‐18.

US EPA. (2005). "Landfill Gas Emiossions Model(LandGEM) Version 2.02 User's Guide", EPA-600/R-05/047

US EPA. (2022). Importance of Methane, https://www.epa.gov/gmi/importance-methane

Van Vuuren, D. P., M. G. J. den Elzen, P. L. Lucas, B. Eickhout, B. J. Strengers, B. van Ruijven, S. Wonink, and R. van Houdt, (2007): Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels : an assessment of reduction strategies and costs. Climatic Change, 81, 119-159, doi:10.1007/s10584-006-9172-9

Yeşiller, N., Hanson, J. L., Manheim, D. C., Newman, S., & Guha, A. (2022). Assessment of methane emissions from a California landfill using concurrent experimental, inventory, and modeling approaches. Waste Management, 154, 146-159.

기상청. (2018) 한반도 기후변화 전망분석서. 발간번호 11-1360000-001555-01

박진규, 강정희, 반종기, & 이남훈. (2012). 폐기물매립지에서의 온실가스 발생량 예측 모델 및 변수 산정방법 개발. 대한토목학회논문집 B, 32(6B), 399-406.

수도권매립지관리공사. (2021). 매립지 온실가스 배출량 산정방법

수도권매립지관리공사. (2022). 2021 수도권매립지관리공사 통계연감 제20호

온실가스종합정보센터. (2022). 2021 국가 온실가스 인벤토리 보고서, 환경부

이남훈 등(2009) 매립가스 발생량 산정 및 CDM 사업연계방향연구, 연구보고서, (주)건화 부설기술연구소

이남훈. (2019). 폐기물매립지 온실가스 배출특성 분석을 통한 한국형 인벤토리 모델 개발, 안양대학교

이우원, 류돈식, 김문정. (2020). 2019 수도권매립지 매립가스 발생량 현장 모니터링 및 발생특성 분석, 수도권매립지관리공사

이철, 부경온, 홍진규, 성현민, 허태경, 설경희, ... & 조천호. (2014). RCP 시나리오에 따른 미래 전지구 육상탄소순환 변화 전망. 대기, 24(3), 303-315.

한국환경공단. (2017). 지자체 온실가스 배출량 산정지침 (Ver.4.1)

Abstract

Improving the estimation of landfill methane generations based on meteorological characteristics

Donghee Kim

Department of Environmental Planning
Graduate School of Environmental Studies
Seoul National University

Waste landfills are one of the major sources of anthropogenic methane emissions. For effective methane management to mitigate climate change, accurate estimation of methane emissions from waste landfills should be a priority. The methane produced by the decomposition of waste in landfills is highly dependent on the amount and composition of the waste, as well as the weather conditions including ambient temperature and precipitation. However, the existing numerical estimating landfill methane generation model FOD (First order decay) and LandGEM(Landfill generation emission model), which consider annual emissions based on waste composition by simplifying the weather conditions. The CLEEN(Capturing Landfill Emissions for Energy Needs) model incorporates temperature and precipitation but may not be suitable for domestic landfills as it

was calibrated by the data from some foreign landfills.

In this study, we improved the CLEEN model to a domestic-optimized model, 'CLEEN_k', by reflecting the characteristics of the Sudokwon landfill. One of the essential coefficients in calculating landfill methane emissions is the methane generation rate constant 'k'. We calculated 'k_{actual}' based on waste decomposition experiments and on-site measurements at the Sudokwon landfill site. In addition, in order to determine the coefficient for the period without on-site measurements, the methane generation was calculated with 'k_{adj}' corrected by the correction formula '$F_{su,k}$'(R^2=0.84) calculated by multiple linear regression.

The research results showed that the total methane generation estimated by CLEEN_k during the field measurement period was 294 million m^3, with only about 6% difference from the total methane generation, which was considerably small compared to 32% to 198% in other models. Moreover, the Root Mean Square Error (RMSE) between CLEEN_k and on-site measurements was much lower (ranging from 6.5% to 560%) than other models, indicating that CLEEN_k provided the best simulation of on-site measurements. When applied to other domestic landfills, CLEEN_k was the most similar to the on-site measurements. Comparing with the national inventory, CLEEN_k also simulated the highest similarity to on-site measurements. When the methane generation calculated based on RCP scenarios, the highest methane generation was expected in the RCP 8.5, which is expected to have the highest temperature and precipitation changes. This underscores the importance of considering temperature and precipitation variations due to climate change in landfill methane estimation model.

keywords : Landfill, Methane, Waste, Model
Student Number : 2021-27213