

매립가스의 에너지 회수 및 표면발산을 고려한 매립장 온실가스 배출 평가

이용현¹⁾ · 권용재²⁾ · 천승규^{3)*}

Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Landfills Based on Energy Recovery and Surface Emissions of Landfill Gas

Yonghyun Lee¹⁾ · Yongchai Kwon²⁾ · Seung-Kyu Chun^{3)*}

Received 30 May 2020 Revised 25 June 2020 Accepted 3 August 2020 Published online 7 September 2020

ABSTRACT This study involved a total budget analysis on the greenhouse gas (GHGs) emissions of landfills, focusing on surface emissions and the effect on emissions reductions of generating landfill gas (LFG) electricity from March 7, 2007 to December 31, 2018. The GHGs reduction effect from the electricity generation using 536.6×10^3 tCO₂ of CH₄ was only 5.8% of the GHGs from surface emissions of $9,191 \times 10^3$ tCO₂. In the total budget, the collection ratio should be over 95% if the reduction effect is greater than the surface emissions. The correlation coefficient for the relationship between the LFG collection ratio and GHGs reduction was -0.89. An additional effect of lowering CH₄ content may occur if the surface emitting flux of LFG decreased with an increase in the collection ratio. The unit reduction effect of GHGs by suppressing surface emissions was 4174 tCO₂/TJ. This was far greater than that of LFG power generated (54.3 tCO₂/TJ), demonstrating that surface emission control is the most important measure by which to mitigate GHGs emission.

Key words Landfill gas(매립가스), CH₄(메탄), Electricity generation(발전), Surface emission(표면발산), GHGs(온실가스)

1. 서론

50% 내외의 메탄(CH₄)을 함유한 매립가스(LFG)는 최
대한 포집하여 에너지원으로 활용하는 것이 재생에너지의

확보, 온실가스(GHGs) 배출 저감, 매립장의 경제적인 운
영을 위하여 바람직하다. 에너지 회수를 위한 LFG의 포집
량은 매립장별 복토 및 LFG 포집시스템의 설치·운영 방식
에 따라 큰 차이가 나며^[1,2], 포집률이 낮을 경우 다량의
LFG가 매립장의 상부 복토층, 사면 등 매립장 표면을 통해
대기로 발산할 수 있다^[3]. 이러한 LFG의 표면발산량은 구
체적으로는 복토층의 두께, 소재, 그리고 LFG 포집관망의
설치 밀도와 형태, LFG 포집시스템의 부압, 기타 가스 배
제공 및 간이 소각기 수 등의 영향을 받는다.

표면발산 된 LFG 성분중 기후변화 중립물질인 CO₂와 달
리 CH₄는 GWP(Global Warming Potential)가 21인 강

1) Ph.D. Candidate, Graduate School of Energy and Environment,
Seoul National University of Science and Technology

2) Professor, Department of Chemical and Biomolecular
Engineering, Seoul National University of Science and
Technology

3) Professor, Graduate School of Energy and Environment, Seoul
National University of Science and Technology

*Corresponding author: skchun@seoultech.ac.kr

Tel: +82-2-970-6880

Fax: +82-2-970-6800

력한 GHGs로서 소량의 표면발산도 무시할 수 없다^[4]. 이러한 이유로 EU 등 선진 각국에서는 근본적으로 매립장에 생물분해 가능한 폐기물을 묻지 않는 방향으로 폐기물관리 체계를 발전시키고 있다. 그러나 국내의 경우 LFG 발전에 의한 에너지 확보만이 강조되고 있고, 표면발산에 의한 문제에 대해서는 상대적으로 큰 관심을 두고 있지 않다. 이에 따라 폐기물관리법에서도 침출수와는 달리, LFG 부분에 대해서는 관리규정이 명확하지 않은 실정이다. 기후변화측면에서 매립장의 GHGs 배출량은 LFG의 에너지 회수에 의한 감소효과 뿐 아니라 이러한 표면발산에 의한 증가효과도 함께 고려해야 한다. 이는 생분해성 폐기물의 매립이 가지는 근본적인 문제점에 대한 간과를 방지하고, 매립장의 복토와 LFG 포집시스템에 대한 보다 적극적인 관리체계의 확립을 위해서 필요하기 때문이다.

본 연구는 매립장에 생분해성 물질을 매립하여 발생하는 CH₄를 발전 등 에너지원으로 사용함에 따른 GHGs 감소량과 LFG의 표면발산에 의한 GHGs 배출증가량을 계량적으로 비교분석하였다. 이를 통해 폐기물의 매립처분이 가지는 GHGs 순 수지의 평가방법을 제시하고, 향후 매립정책과 LFG 관리방향에 대한 착안점을 제시하고자 하였다. 연구대상 매립장은 수도권 생활 및 사업장폐기물 처리를 위해 조성된 S 매립장으로서, 88,040 × 10³ m³의 폐기물이 2000. 10. 13.~2018. 10. 5. 동안 매립되어 현재 사후관리 중이다. Fig. 1과 같이 S 매립장에서 발생되는 LFG는

699개소의 수직가스포집정을 통해 포집되어 2007년 3월 7일부터 50 MW 규모의 발전소^[5]에서 대부분 활용되고 있다. 2000년 10월 매립이 종료된 인접 S1 매립장의 소량의 LFG가 함께 포집되고 있으나, 전력생산 및 물질수지 계산에 반영하여 S 매립장만을 평가 대상으로 하였다. LFG의 발생과 처리 및 활용에 대한 평가 기간은 2007. 3. 7.~2018. 12. 31.까지 약 142개월이다.

2. 연구방법

2.1 총괄수지

신·재생에너지 생산과 관련해서는 각각의 특성에 따른 평가방식이 필요하며^[6], 매립가스의 경우도 마찬가지이다. 매립장에서 LFG와 관련한 GHGs 순증 요소는 표면발산된 CH₄, 간이 소각기와 LFG 소각시설의 미연소 배출 CH₄, 감소요소는 LFG 발전량에 해당하는 화력발전소 배출 GHGs와 기타 LFG의 냉난방 등으로의 직접사용 에너지에 해당하는 화석연료 배출 GHGs의 양이다^[7]. 전체 GHGs 순증과 감소량은 최종적으로 온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률 시행령 제23조 제1항에 의거 CH₄은 21, N₂O는 310의 GWP를 적용하여 tCO₂로 전환하게 된다. 이상을 식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$T_G = E_{LSE} + (1 - \eta_1)E_{MI} + (1 - \eta_2)E_{CI} - R_{PG} - R_{OE} \quad (1)$$

T_G : Green House Gas(GHGs) total emission from landfill(tCO₂)

E_{LSE} : Surface emitted CH₄

E_{MI} : Incinerated CH₄ by movable incinerator

E_{CI} : Incinerated CH₄ by combustor

η_1, η_2 : Incineration efficiency

R_{PG} : GHGs production by power plant at the same power generation by LFG power plant

R_{OE} : GHGs production by other fossil fuel at the same energy usage of LFG

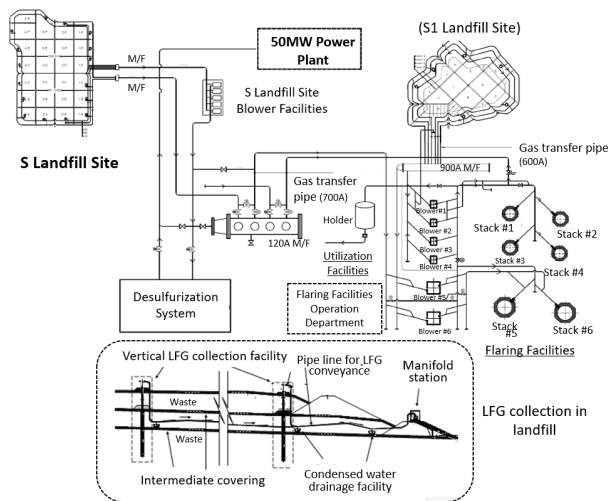


Fig. 1. LFG collecting and treating system of S landfill site

2.2 발전

S 매립장 LFG 발전소의 발전량이 화력발전을 통해 생산되었을 경우 발생할 GHGs의 양(식 (1) R_{FG})은 연료와 발전 방식이 가장 가까운 LNG 발전의 경우로 하였다. LNG 단위 발전량 당 GHGs 배출량은 Table 1과 같이 “공공부문 온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침(환경부고시 제2018-194호)”에서 제시된 값을 적용하였다. 이때 CO₂는 LNG의 경우 화석연료의 사용에 의한 것이므로 LFG 발전 시 감쇄량에 해당한다. 그러나 CH₄와 N₂O는 동 지침에 의하면 LNG 및 LFG 발전 모두 동일한 단위 배출량으로 규정하고 있다. 따라서 LFG 발전량에 따른 CH₄와 N₂O는 GHGs 순증으로 하였다.

Table 1. GHGs emission quantity per unit energy generation of LNG and LFG power plant

(unit: kg GHG/TJ)

Fuel	Domestic energy standard	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
III. Gaseous fuel				
Natural gas	LNG	56,100	30	0.1
V. Biomass				
Gaseous	Landfill gas	54,600	30	0.1

* Extracted from ‘The Guidelines for Management By Objectives of Green House Gas and Energy in Public Sector’

총발전량 중 발전소 내 용도로 사용된 전력량은 GHGs 대체효과가 없으므로 제외하고, 판매된 양만을 대상으로 하였다. 발전소의 발전 자료는 2007. 3. 7.~2018. 12. 31의 발전소 일일 운영 자료를 분석하였다. 동 기간 중 정비 등을 위한 발전정지일은 총 474일이며 실제 발전일은 3,841일이다.

2.3 표면발산량

일반적으로 매립장에서 포집량 외에 가장 많은 LFG 배출은 표면발산^[8]에 의한 것이다(식 (1) E_{LSE}). “온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침” 제11조에는 매립장의 경우 Tier 1만이 존재한다. Tier 1은 표면발산량을 직접 측정하지 못하는 경우 모델에 의하여 추정하는 것이며^[9~11], S 매립장에서는 표면발산량을 열린 Chamber

Table 2. Seasonal surface emission measurement

	Sum	Upper cover	Slope	Dyke
	Area	$1.46 \times 10^6 \text{ m}^2$ ¹⁾	$1.06 \times 10^6 \text{ m}^2$ ²⁾	
Total	494	269	89	136
Spring	125	68	21	36
Summer	127	71	22	34
Autumn	122	66	23	33
Winter	120	64	23	33

1) in spring time $1.50 \times 10^6 \text{ m}^2$, 2) in spring time $1.02 \times 10^6 \text{ m}^2$

방식(dynamic flux chamber)^[12,13]에 의해 2005년부터 15년간 측정하고 있으므로 해당 자료를 사용하였다. 표면발산측정량은 Table 2와 같이 매년 4회 계절별로 측정되고 있으며^[14], 2018년도의 경우 총 494개의 Chamber를 매립장 상부 복토층, 사면, 수직가스포집정 주변 제방에 설치하여 CH₄와 CO₂의 표면발산량을 측정하고 있다. 동 측정자료는 각 chamber의 대표지점 면적을 고려하여 연간 매립장 전체의 표면발산량으로 환산되고 있다.

2.4 기타

S 매립장은 포집압력이 충분히 미치지 못하는 수직가스 포집정 사이에서 발생하는 LFG의 제거를 위하여 가스 배제공 및 간이 소각기를 설치하여 LFG를 소각하고 있다. 간이 소각기는 2004~2007년 한시적으로 운영 후 철거하였으나 2011년부터 재설치하여 운영하고 있고, 설치 대수는 2018년 기준 106개이다. 또한 S 매립장 부대시설로 원통형 내부 연소식 가스 소각로가 있으며, LFG 발전소의 정비 등을 위해 발전중단 시 LFG를 소각처리하고 있다. 간이 소각기와 가스 소각로 의하여 연소 후 배출되는 CO₂는 GHGs 배출량에서 제외되나, 연소효율이 100%는 아니므로 미연소 CH₄가 존재한다. 그러나 이 부분의 기여도가 상대적으로 작고 연소효율에 대한 측정자료가 없어, 완전연소로 가정하여 식 (1)의 η_1, η_2 를 1로 놓고 GHGs 수지계산에서는 제외하였다^[15]. 보다 정확한 기여도 산정을 위해서는 향후 이 부분에 대해서도 추가적인 연구를 통해 감안할 필요가 있다. 아울러, LFG를 냉난방용으로 직접 활용한 부분(식 (1) R_{OE})이 있으나, 전체 CH₄ 사용량에서 차지하는 비중이 매우 미미하여 이 역시 생략하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 경로별 LFG 발생량

Fig. 2에서 보는 바와 같이 S 매립장에서 2007년 3월 7일부터 2018년 말까지 발생한 LFG 총량은 $3,253.5 \times 10^6 \text{ Nm}^3$ 이며, 85.6%는 포집, 12.8% 표면발산, 1.6%가 가스 배제공으로 발생되었다. 연도별로 보면 표면발산율은 2012년 2.6%로 최소 그리고 2007년 26.1%로 최대였으며, 포집률은 2007년 60.1%로 최소 그리고 2012년 96.1%로 최대였다. LFG의 조성은 동기간 평균 CH_4 49.4%, CO_2 39.5%, N_2 10.7%, O_2 0.45%로서, N_2 와 O_2 는 가스 포집 시 외부공기 유입에 의한 것이며, 포집률이 클수록 외부공기 유입증가로 N_2 함량이 높아지고 있다. 외부 유입공기를 제외할 경우 CH_4 평균농도는 55.5%이다.

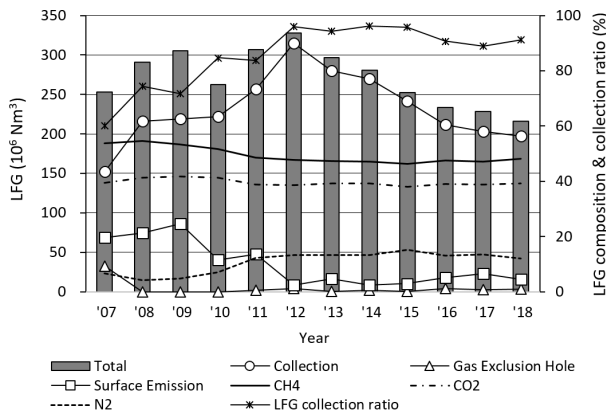


Fig. 2. Major LFG composition and quantity by each generation course

전체 LFG 가운데 CH_4 만을 대상으로 하면 동 기간 중 발생한 CH_4 의 총량은 $1,619.3 \times 10^6 \text{ Nm}^3$ 이다. 표면발산된 CH_4 의 산화로 인해 경로별 비율은 LFG와는 다소 차이가 나며, 포집 84.5%, 표면발산 13.8%, 가스 배제공 1.7% 이었다. 포집된 CH_4 는 총 $1,372 \times 10^6 \text{ Nm}^3$ 이며, 이 가운데 72.9%는 발전에 이용되었고 소각처리된 것은 27.0%이다. 기타 냉난방용으로 직접 사용된 양은 전체의 0.14%로서 매우 미미한 수준이었다.

3.2 LFG 발전에 의한 GHGs 감쇄량

Fig. 3은 연간 발전현황이다. 2007. 3. 7.~2018. 12.

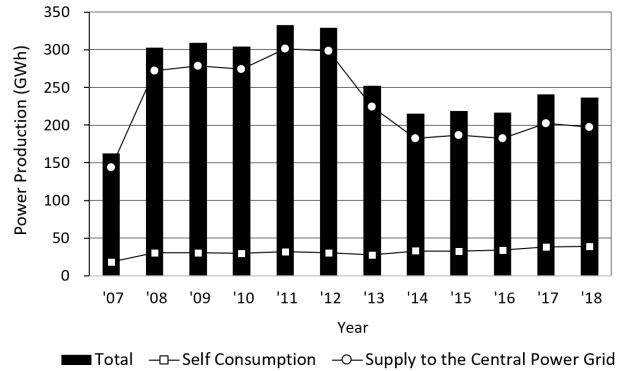


Fig. 3. Annual electricity generation by 50 MWh LFG power plant

31.의 총 발전량은 3,120 GWh로, 이중 87.9%인 2,743 GWh를 한전에 판매하였고, 나머지 12.1%는 자체 소비하였다.

관련고시에 따라 발전량을 LNG 발전시의 GHGs 감쇄량으로 환산하기 위하여 MWh를 TJ로 변환하면 Table 3과 같이 9,876 TJ에 해당하며, 이를 LNG 발전 시 배출되는 CO_2 로 계산하면 554,066 t CO_2 이다. 한편, LFG 발전에 의해 9,876 TJ을 생산할 경우 발생하는 GHGs는 CH_4 17,111 t CO_2 , N_2O 306 t CO_2 이다. 즉, LFG 발전에 의하여 554,066 Mg의 CO_2 를 감소시키고 감쇄량의 약 3.1%인 17,417 t CO_2 를 순증 시키므로 순 감소량은 536,649 t CO_2 이다.

Table 3. CO_2 Reduction by LFG power plant

Generated Energy		9,876 TJ
LFG	Net	536,649 t CO_2
	Sum	17,417 t CO_2
	CH ₄	296 Mg
	N ₂ O	306 t CO_2
	CO ₂	17,111 t CO_2
LNG	CO ₂	554,066 Mg

Fig. 4는 단위 CH_4 포집 및 사용량 대비 CO_2 감쇄량의 연간 추이이다. CH_4 1 Nm^3 을 포집한 후 실제 CO_2 감쇄량은 연도별로 0.28~0.47 kg CO_2/Nm^3 로 평균 0.391 kg이었고, 주 수요처인 LFG 발전소의 가동률에 의한 영향이 가장 크다. 그리고 실제로 발전에 사용된 포집 CH_4 당 CO_2 감쇄율은 0.48~0.59 kg CO_2/Nm^3 이고 평균 0.54 kg CO_2/Nm^3

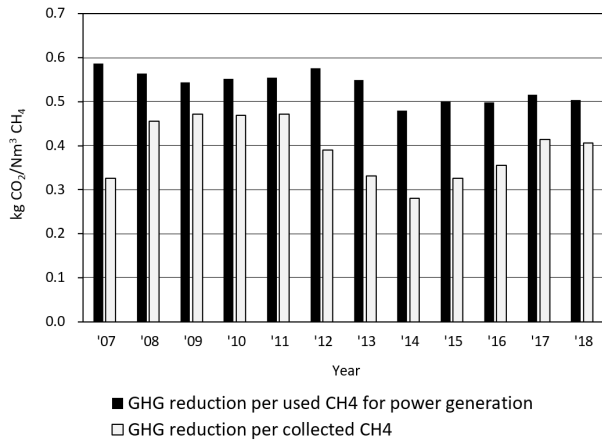


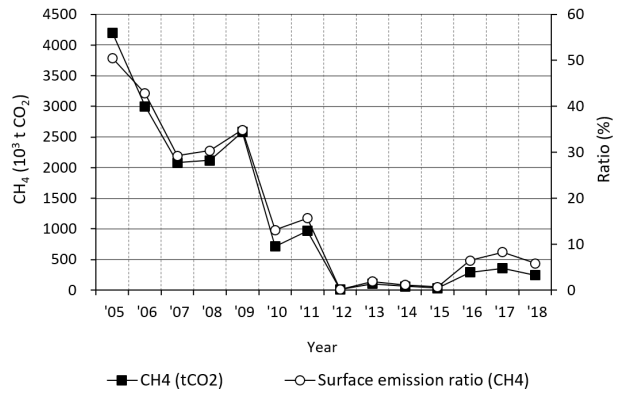
Fig. 4. CO₂ reduction by unit CH₄ utilization of LFG power plant

이다. 여기에는 LFG의 에너지화 시설별 자체 소비율을 포함한 에너지 전환효율이 근본적으로 영향을 주게 된다. 향후 바이오가스 등을 활용한 에너지화 시설의 설치 시 GHGs 감축정도를 파악할 때 이러한 지표의 활용이 유용할 수 있을 것이다.

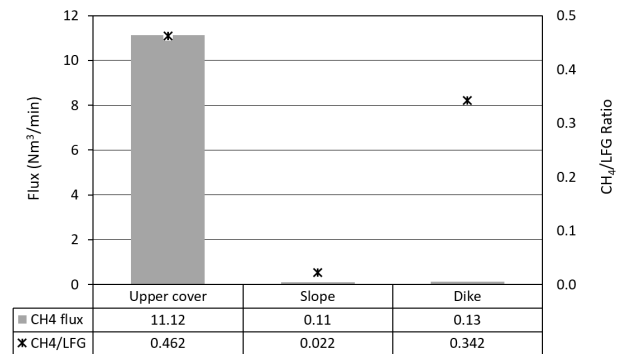
3.3 표면발산량

Fig. 5(a)는 표면발산량이 측정된 2005년 이후 표면발산된 CH₄의 연도별 양과 발산율이다. 2007. 3.~2018.12의 기간 동안 표면발산된 CH₄의 양은 $9,191.4 \times 10^3$ tCO₂로서, 직접 표면발산된 CO₂ 382.2×10^3 Mg은 CH₄ tCO₂의 4.2%에 불과하다. 이는 매립가스의 표면발산을 억제하기 위한 포집률 증대나 복토층에서의 CH₄의 산화 등의 필요성을 보여주고 있다. 표면발산된 CH₄의 양과 표면발산 비율은 일치하지는 않았는데, 이는 매년 각 경로별 배출량과 경로별 배출과정에서의 산화율이 다르기 때문으로 판단된다.

Fig. 5(b)는 2018년의 경우 표면발산 배출경로별 CH₄의 배출량과 배출 LFG 내 CH₄ 함량으로서, 대부분의 표면발산이 상부 중간 복토층을 통해 이루어지고 있다. 또한 CH₄ 함량의 경우 상부 중간 복토층은 약 46.2%인 반면 특히 사면의 경우 불과 2.2%이었다. 이는 사면은 중간 복토층보다 두꺼울 뿐 아니라, 식생층이 조성되어 있기 때문에 CH₄의 산화율이 훨씬 큰 것이 원인으로 판단된다. 매립장의 운영 기간 중 중간 복토층을 통한 표면발산 억제는 중간 복토층



(a) Annual surface emissions of CH₄ and concentration



(b) CH₄ flux and concentration of each surface emission route in 2018

Fig. 5. Surface emission of CH₄ as tCO₂ and its concentration in LFG

의 조성방식과 포집 관리를 통해 그리고 매립종료 후에는 최종 복토층의 물리적 조성과 식생층의 조기형성이 필요할 것으로 판단된다.

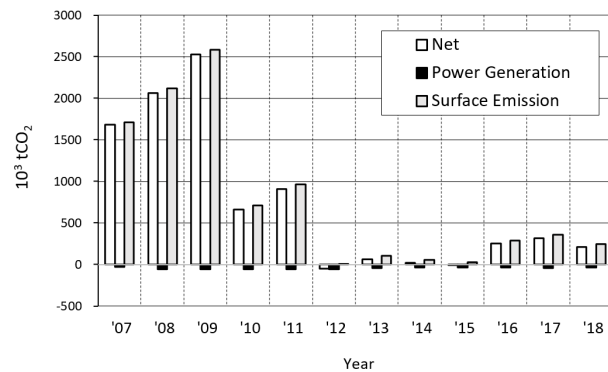
표면발산량은 악취방지를 위한 복토층 관리강화와 함께 2007년도 LFG 발전시설 가동으로 인해 줄어드는 추세를 보이고 있다. 매립장에서의 에너지회수시설 설치는 이러한 측면에서 이중의 효과를 기대할 수 있을 것이다. 특기할 것은 표면발산이 2012년부터 큰 폭으로 감소하였는데, 이는 2011년 여름이후 악취감소를 위해 외기유입에 의한 산소농도의 제한 선까지 포집률을 대폭 증대한 것이 원인이다. 발전용량이 고정되어 있기 때문에 포집률의 증대와 발전량이 같이 비례하지는 않으며, 그 보다는 매립장의 관리차원의 영향을 더 받는다고 볼 수 있다.

3.4 총괄 GHGs 배출수지

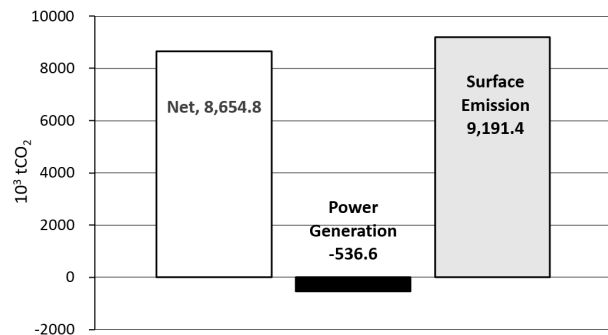
총량적인 GHGs 배출수지 계산에 있어서 발전의 경우는

비교적 LFG 사용량과 발전량 등이 정확하나 표면발산량의 경우는 측정상의 오차가 크다. 또한 본 연구에서는 LFG 소각기의 미연소 CH₄는 고려하지 않았으나 이 부분도 일부 영향이 있을 수 있다. 그럼에도 Fig. 6에서 보는 바와 같이 발전에 의한 GHGs 감축량은 537×10^3 tCO₂로서, 표면발산에 의한 GHGs 배출량 $9,191 \times 10^3$ tCO₂의 불과 5.8% 수준이었다. 다만, 2012-2015년 사이에는 포집률이 상당히 높고 이 기간을 대상으로 보면 표면발산이 206×10^3 tCO₂, 발전에 의한 감쇄량이 174×10^3 tCO₂로서 표면발산의 크기가 1.18배에 그쳐 순 수치면에서도 상당히 개선되었고, 포집률이 96.1%로 가장 높았던 2012년에는 감쇄효과가 4.8×10^3 tCO₂ 더 컸다는 점은 매립장 운영측면에서 참고할 필요가 있다.

그러나 연구기간이 LFG 발전시설 가동이후를 대상으로 하고 있고, Fig. 5(a)에서와 같이 발전시설 가동이전 2005년과 2006년도의 표면발산율은 각각 50.4%, 42.8%로 상당히 컸으며, 매립이 시작된 2000년 10월부터 2004년까지는 50% 이상 되었을 것으로 추정된다. 따라서 만일 2000



(a) Annual net tCO₂ budget



(b) Total net budget of tCO₂

Fig. 6. Total tCO₂ budget analysis of S Landfill site

년 이후 2018년 말까지를 평가대상으로 하였다면, 평균 표면발산율은 2007.3.~2018.12의 평균 13.8% 보다 훨씬 상회할 것이다. 이는 매립장 설치 시 에너지회수시설의 조기 설치운영과 함께 에너지회수시설 설치 전 한시적인 LFG 포집과 소각시스템의 철저한 관리가 요구되는 이유라 할 것이다. 또한 이러한 점은 향후 매립장의 복토, LFG 관리, 에너지화 시설 설치·운영, GHGs 관리라는 일련의 관련 제도에서 보다 구체화된 제도의 마련이 필요한 부분이다.

3.5 GHGs 배출억제를 위한 LFG 관리

Fig. 7은 LFG 포집률과 CH₄의 표면발산율, 표면발산 LFG 내 CH₄ 함량 그리고 CH₄의 복토층을 통한 산화율 관계를 나타내고 있다. LFG의 포집률과 표면발산 CH₄ 양은 직접적 반비례관계로서, 기본적으로 포집률을 높여 GHGs 배출을 억제해야하는 것은 당연하다.

표면발산 되는 LFG 내 CH₄의 함량과 포집 시에 측정된 LFG 내 CH₄의 함량을 비교하면 복토층 통과시의 CH₄의 산화율을 짐작할 수 있다. 분석결과, 포집률이 높아 표면발산속도가 낮아지면 상대적으로 표면발산 CH₄의 함량도 함께 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 단위 복토면당 낮은 flux의 표면발산 시에 CH₄의 산화율이 더 높아지기 때문으로 추정된다. 물론 포집 LFG에 대한 CH₄ 함량 분석과 달리 표면발산 측정은 대표지점의 선정과 측정지점수의 수 등에 있어 오차요인이 크며, 복토층을 통과하는 LFG의 속도 외에도 복토층에서의 CH₄와 CO₂의 용해도와도 관련이 있기 때문에 추후 추가적인 연구가 필요한 부분이다. 그러나 분

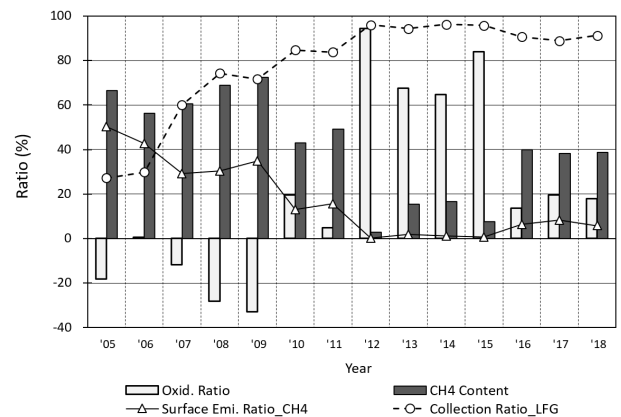


Fig. 7. The relations between collection ratio, surface emission, CH₄ content, and CH₄ oxidation ratio of LFG

명한 것은 포집률을 높일 경우 LFG 전체 표면발산 총량의 감소와 함께 표면발산 되는 LFG 내 CH₄의 함량이 줄어드는 경향을 보인다는 점이다^[16].

Fig. 8은 총괄 tCO₂ 수지와 포집률 및 전력생산량과의 관계이다. 포집률과는 상관계수가 -0.89로서 역의 상관성이 뚜렷하였다. 2012년도 점검 등을 위한 발전중단일은 36일이었으며 발전소 내 소비량을 제외한 순 전력생산은 34.1 MWh이었다. 가동률 등이 이와 유사한 경우 최소한 총괄수지가 - 즉, 기후변화측면에서 감쇄효과가 있으려면 포집률은 약 95% 이상이어야 할 것으로 판단되었다. 반면 발전량 자체와의 상관계수는 0.22로서 상관성이 낮았다. 이는 발전량은 발전소의 가동률, LFG의 발생량과 관련이 있고, LFG 발생량이 높을 때 포집률이 낮으면 오히려 발전에 따른 감쇄보다는 표면발산에 의한 부정적 효과가 크기 때문이다.

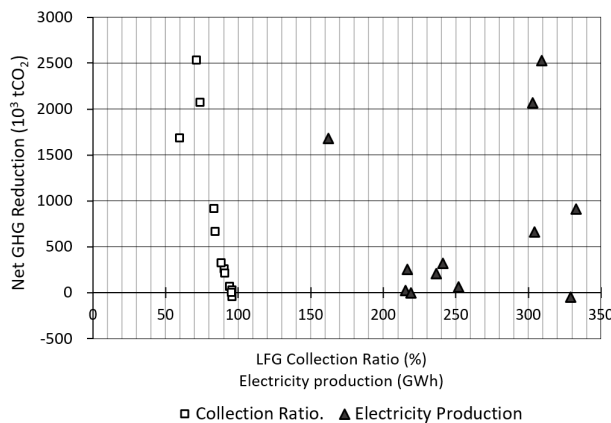


Fig. 8. The relations of LFG collection ratio and electricity generation to Net tCO₂ reduction

S 매립장의 2007.3.~2018.12. 동안 전력생산에 의한 감쇄량 54.3×10^3 tCO₂/TJ에 비하여 999.4×10^6 Nm³의 CH₄를 발전에 사용함에 따른 표면발산 억제에 의한 효과가 $41,227 \times 10^3$ tCO₂으로 약 76.8배에 해당한다. 즉, 대체 에너지의 확보차원이 아닌 GHGs 수지와 관련하면 거의 대부분 발전에 의한 효과가 아닌 포집 LFG의 표면발산량 억제에 의한 효과이다. 자체소비를 제외한 총 9,876 TJ의 생산전력을 위해 사용한 CH₄ 양은 표면발산에 의한 CO₂ 저감 측면에서 보면 4,174 kg CO₂/TJ에 해당한다. “공공부문 온실가스-에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침” 별표4의 기본 배출계수에서 제시된 연료별 에너지시설에서의 단위

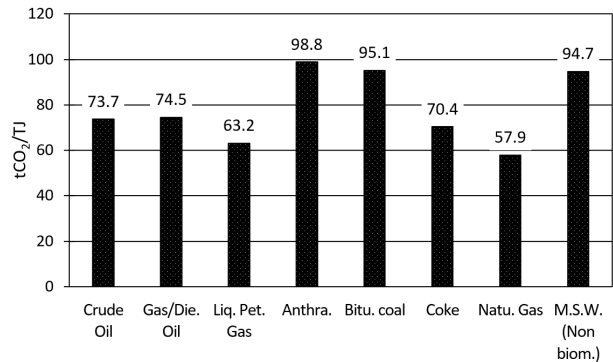


Fig. 9. The CO₂ reduction effect of each major fossil fuel energy by unit TJ production

에너지 생산 당 GHGs 배출량을 tCO₂로 전환하면 Fig. 9와 같으며, 다른 1차 에너지의 경우와 비교해도 큰 차이는 없다. 이는 LFG 발전뿐만 아니라 바이오가스 생산 시 CH₄ 누출 관리가 제대로 되지 않는다면 생산된 바이오가스의 화석연료 대체에 의한 GHGs 감쇄효과는 크게 감소될 수밖에 없을 것이다. 이 경우 액상 폐기물은 혐기성 소화기 아닌 호기적 처리방식, 고형폐기물의 경우 매립이 아닌 직접 열회수 보다 기후변화 측면에서는 유리하지 않을 것이다.

4. 결론

매립장에서의 표면발산과 LFG 발전에 의한 GHGs 감쇄효과를 포함한 총괄 수지계산을 수도권 소재 S 매립장을 대상으로 수행하였으며 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다.

2007. 3.~2018. 12. 31 기간 중 자체소비를 제외한 순 발전량은 2,743 GWh로서 GHGs 감쇄효과는 537×10^3 tCO₂이었다.
- 표면발산 된 LFG 중에서 CH₄는 $9,191 \times 10^3$ tCO₂로서 발전에 의한 감쇄량은 이의 5.8% 수준에 불과하였다.
- 표면발산량과 발전량은 상관성이 없는 반면 포집률과는 상관계수가 -0.89로서 역의 상관성이 뚜렷하였고, GHGs 감쇄효과가 있으려면 포집률이 약 95% 이상이어야 하는 것으로 나타났다.
- CH₄ 표면발산에 의한 CO₂ 저감량은 4,174 tCO₂/TJ

에 해당하여 LFG 발전에 의한 GHGs 저감효과 54.3 tCO₂/TJ에 비하여 월등하였다.

연구결과, 폐기물분야에서의 GHGs 배출 억제를 위해서는 생분해성 폐기물의 매립은 억제되어야 하며, 매립 시에는 LFG에 대한 표면발산관리라 무엇보다 중요함을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Zheng, Q.T., Kerry Rowe, R., and Feng, S.J., 2018, "Design of vertical landfill gas collection wells considering non-homogeneity with depth", *Waste Manag.*, **82**, 26-36.
- [2] Spokas, K., Bogner, J., Chanton, J.P., Morcet, M., Aran, C., Graff, C., Moreau-Le Golvan, Y., and Hebe, I., 2006, "Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems?", *Waste Manag.*, **26**(5), 516-525.
- [3] Di Trapani, D., Di Bella, G., and Viviani, G., 2013, "Uncontrolled methane emissions from a MSW landfill surface: Influence of landfill features and side slopes", *Waste Manag.*, **33**(10), 2108-2115.
- [4] Lee, U., Han, J.W., and Wang, M., 2017, "Evaluation of landfill gas emissions from municipal solid waste landfills for the life-cycle analysis of waste-to-energy pathways", *J. Clean. Prod.*, **166**, 335-342.
- [5] Khim, Y.M., Song, H.S., Ahn, H.S., and Chun, S.K., 2020, "Application of the microbial process for hydrogen sulfide removal and bio-sulfur production from landfill gas", *New. Renew. Energy*, **16**(1), 69-76.
- [6] Jung, J.H., and Kim, K.M., 2017, "Life cycle assessment of molten carbonate fuel cell system: A case study of 2.5 MW fuel cell system in Korea", *New. Renew. Energy*, **13**(1), 45-53.
- [7] Wanichpongpan, W., and Gheewala, S.H., 2007, "Life cycle assessment as a decision support tool for landfill gas-to energy projects", *J. Clean. Prod.*, **15**(18), 1819-1826.
- [8] Mønster, J., Kjeldsen, P., and Scheutz, C., 2019, "Methodologies for measuring fugitive methane emissions from landfills - A review", *Waste Manag.*, **87**, 835-859.
- [9] Amini, H.R., Reinhart, D.R., and Mackie, K.R., 2012, "Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties", *Waste Manag.*, **32**(2), 305-316.
- [10] Faour, A.A., Reinhart, D.R., and You, H., 2007, "First-order kinetic gas generation model parameters for wet landfills", *Waste Manag.*, **27**(7), 946-953.
- [11] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006, "2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories-Volume 5 waste", <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>
- [12] Jeong, S.J., Park, J.Y., Kim, Y.M., Park, M.H., and Kim, J.Y., 2019, "Innovation of flux chamber network design for surface methane emission from landfills using spatial interpolation models", *Sci. Total Environ.*, **688**, 18-25.
- [13] United States Environmental Protection Agency (US EPA), 1986, "Measurement of gaseous emission rates from Land Surfaces Using an Emission Isolation Flux Chamber: User's Guide", https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_Report.cfm?Lab=ORD&dirEntryID=51253
- [14] Maurice, C., and Lagerkvist, A., 2003, "LFG emission measurements in cold climatic conditions: seasonal variations and methane emissions mitigation", *Cold Reg. Sci. Technol.*, **36**(1-3), 37-46.
- [15] Sauve, G., and Van Acker, K., 2020, "The environmental impacts of municipal solid waste landfills in Europe: A life cycle assessment of proper reference cases to support decision making", *J. Environ. Manag.*, **261**, 110216.
- [16] Yang, N., Zhang, H., Shao, L.M., Lü, F., and He, P.J., 2013, "Greenhouse gas emissions during MSW landfilling in China: Influence of waste characteristics and LFG treatment measures", *J. Environ. Manag.*, **129**, 510-521.