ORIGINAL PAPER
http://dx.doi.org/10.17137/korrae.2015.23.3.078
원저
ISSN 1225-6498

레이저메탄검지기를 활용한 폐기물매립지 표면발생량 산정에 관한 연구

강종윤, 박진규, 이남훈*†
(주)에코윌플러스, 안양대학교 환경에너지공학과*
(2015년 8월 25일 접수, 2015년 9월 7일 수정, 2015년 9월 10일 채택)

Estimation of Methane Emission Flux Using a Laser Methane Detector at a Solid Waste Landfill

Jong-Yun Kang, Jin-Kyu Park, Nam-Hoon Lee*†
Ecowillplus Co, Ltd., Department of Environmental and Energy Engineering, Anyang University*

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate methane emission flux based on spatial methane concentration using laser methane detector, and geospatial methodology (Inverse distance weighting) at a landfill. The obtained results showed that the spatial methane concentrations were in good agreement with the methane emission fluxes. Thus, it was concluded that the methane emission flux could be derived from spatial methane concentrations. In addition, the results of the geospatial calculations showed that 12.85% of the total area contributed more than 42.21% of total flux. This suggested that the geospatial methodology might be essential in chamber method to determine accurate methane emission fluxes from landfills.

Keywords : Landfill, Methane emission flux, Methane concentration, Laser methane detector, Inverse distance weighting

초 록

본 연구에서는 표면 메탄농도와 지구통계기법(거리역산가중기법)을 기초로 표면 메탄발산량을 평가하고자 하였다. 실험결과 표면 메탄농도는 표면 메탄발산량과 높은 상관성이 있는 것으로 나타나, 표면 메탄농도를 기초로 표면 메탄발산량을 산정하는 것이 가능한 것으로 나타났다. 또한 지구통계기법 적용 결과 측정 면적의 12.85%가 총 메탄발산량의 42.21%를 나타내어 챔버 방법으로 메탄발산량을 정

†Corresponding author(nhlee@anyang.ac.kr)

확하게 평가하기 위해서는 지구통계기법을 반드시 적용해야 하는 것으로 사료된다.

주제어 : 폐기물매립지, 메탄발산량, 메탄농도, 레이저메탄검지기, 거리역산가중기법

1. 서론

대기 중에 지구온난화에 영향을 미치는 온실가스의 농도가 점차 증가함에 따라 지구의 평균기온과 해수면이 상승하는 등 전 세계적으로 다양한 문제에 직면하고 있는 실정에서, 세계 각국은 지구온난화현상을 유발하는 온실가스의 대기 중 농도를 안정화시키기 위해 국제적으로 기후변화협약 및 교토의정서를 채택하는 등 다각적인 대응을 하고 있다.

폐기물매립지에서 발생하는 메탄가스는 주요 온실가스 중 하나로 이산화탄소에 비해 온난화지수가 약 21배 정도 크지만 메탄가스의 발전을 통한 에너지화가 가능하여 다른 부문에 비하여 온실가스 저감 잠재력이 높은 것으로 평가되고 있다[1]. 그러나 가스 자원화를 진행하기 위해서는 폐기물매립지에서의 메탄가스 배출량이 정확하게 평가되어야 한다[2].

폐기물매립지에서의 메탄가스 배출량 측정 방법으로는 플럭스 챔버(Flux chamber)를 이용하여 점 방식으로 배출량을 측정하거나, 추적자 방법(Tracer method), 미세기상법(Micrometeorological method), 미국 EPA의 OTM10(Other test method 10) 그리고 DIAL(Differential absorption laser detection and ranging)과 같은 물질수지 방법 등을 통해 배출량을 산정하는 방법이 있다[3-6].

그러나 이들 측정방법에는 장단점이 존재하고 있어 물질수지 방법은 측정방법 및 배출량 산정이 매우 복잡하며, 풍속과 풍향을 고려해야 하는 문제점이 있다. 특히, 국내 폐기물매립지의 경우 상당수가 계곡형 매립지로서 풍속과 풍향의 변화가 매우 심해 이러한 물질수지 방법을 국내에 적용하기에는 어려운 문제점이 있다[3]. 플럭스 챔버의 경우에는 점 측정 방식으로 측정에 시간이 많이 소요되고 노동집약적인 문제점을 가지고 있다[4]. 특히 격자형태로 구분 후 점 측정 방식으로 측정이 진행됨에 따라 폐기물매립지 표면에서 메탄 발산량이 높게 나타나는 'Hot spot' 지점을 배제할 가능성이 매우 높아 산정된 메탄배출량이 과소평가될 우려가 있다.

따라서 본 연구에서는 플럭스 챔버 방식의 측정시간을 단축하고 Hot spot 지점의 배제가능성을 최소화하기 위하여 레이저메탄검지기(Laser methane detector)를 이용한 표면메탄농도와 표면 메탄발산량과의 상관성 평가 및 거리역산가중기법(Inverse distance weighting)을 통한 폐기물매립지 표면 메탄발산량 산정 기법을 제안하고자 한다.

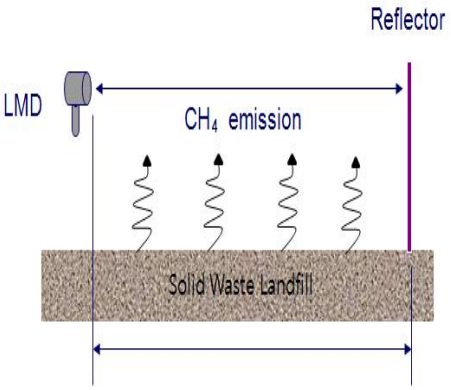
2. 연구내용 및 방법

2.1 대상매립지 및 실험방법

본 연구 대상매립지인 A매립지는 경기도에 위치한 계곡형 매립지(매립면적 38,280m² 매립용량 568,225 m³)로 생활폐기물과 사업장폐기물을 대상으로 2003년부터 매립을 진행하여 왔다. 매립이 진행 중인 구역을 제외하고는 약 1m 두께로 중간복토가 되어 있으며, 매립가스는 총 17개의 가스 배제공을 통해 대기로 배출되고 있다.

본 연구에서는 표면 메탄농도와 표면 메탄발산량을 평가하기 위하여 레이저메탄검지기를 이용하였다. 레이저메탄검지기(Tokyo gas engineering)는 휴대용 메탄검지기로 **[Fig. 1]**과 같이 적외선 흡수 분광법을 이용하여 레이저메탄검지기와 대상지점간의 평균 메탄농도를 측정할 수 있다. 방출된 레이저 빔(1653.7nm)은 메탄을 제외한 다른 기체의 간섭을 최소화하여 대상지점으로부터 되돌아오는 적외선의 흡수율을 측정한다. 최대 150m까지 메탄 농도 측정이 가능하며, 측정 가능 농도

는 10~10,000 ppm이다.



[Fig. 1] The principle of laser methane detector.

표면 메탄농도를 이용한 표면 메탄발산량 평가 및 Hot spot 지점의 배제를 최소화하기 위한 본 연구에서 제안한 방법을 평가하기 위해 폐기물매립지 상부면적 70m×70m 구간을 대상으로 실험을 진행하였다. 우선 육안으로 매립지 상부 복토면에 균열이 있는지를 확인한 후 임의의 지점을 대상으로 지표면으로부터 상부 1m 높이에서 복토면까지의 표면 메탄농도를 측정하였다. 표면 메탄농도 데이터를 기초로 최소 및 최대 표면 메탄농도를 포함하여 11개 지점을 선정하여 표면 메탄발산량을 측정한 후 표면 메탄농도와 표면 메탄발산량의 상관성을 평가하였다.

표면 메탄농도는 1회 측정 시 약 30지점 내외로 분석하였으며, 1회 측정 소요시간은 약 10~15 초가 소요되었다. 측정 시기는 2013년 4월30일, 7월 30일, 10월 14일로 총 3회에 걸쳐 실시하였다.

2.2 메탄표면발산량 산정방법

레이저메탄검지기를 활용하여 폐기물매립지에서 발생하는 표면 메탄발산량을 측정하기 위해 **[Fig. 2]**와 같이 외경 200 mm, 높이 1000 mm인 PVC 재질의 챔버를 제작하였다. 챔버 상부는 유리 재질로 제작하여 레이저메탄검지기를 이용해 챔버 내부의 시간대별 메탄 농도를 측정할 수 있게 하였다. 표면 메탄발산량은 식(1)을 이용하여 산정하였다.

$$Q = \frac{V}{A} \times \frac{dC}{dt} \quad \cdots\cdots (1)$$

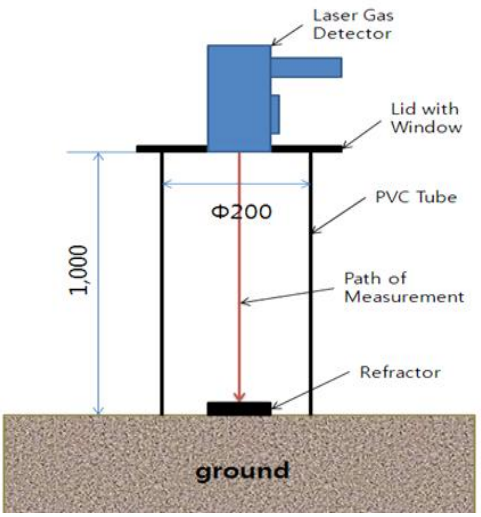
여기서,

Q : Methane emission flux (mg/m²/min)

V : Chamber volume (m³)

A : Aera covered by the chamber (m²)

dC/dt : Change in headspace methane concentration with time

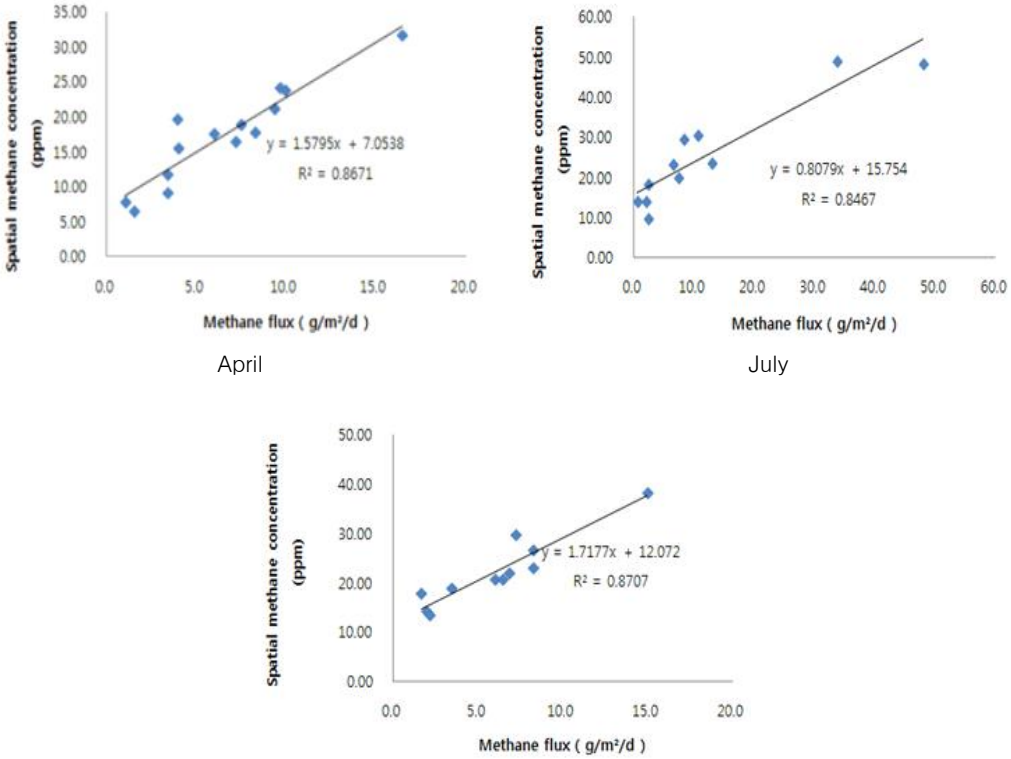


[Fig. 2] Schematic of static chamber method using laser methane detector.

3. 결과 및 고찰

3.1 표면 메탄농도와 표면 메탄발산량 상관관계

[Fig. 3]은 표면 메탄농도와 메탄발산량간의 상관성을 나타낸 것이다. 4월, 7월, 10월 총 3회에 걸쳐 측정 결과 표면농도는 6.55 ppm~49.50 ppm의 분포를 나타내었으며, 측정 지점의 표면 발산량은 0.7 g/m²/d~48.0 g/m²/d으로 나타났다. 표면 메탄농도와 메탄발산량은 측정지점에 따라 편차가 큰 것으로 나타났다. 특히 사면부와



[Fig. 3] Relationship between spatial methane concentration and methane flux.

가스배제공 주위에서 표면 메탄농도와 메탄발산량이 비교적 높게 나타났으며, 이는 평지에 비하여 다짐이 잘 되어 있지 않아 폐기물매립지 내부의 가스들이 사면부와 가스배제공 주변부를 통해 배출되는 것으로 판단되었다.

표면 메탄농도와 표면 메탄발산량간의 상관성을 살펴보면 3회 측정결과 결정계수(R^2)가 0.84~0.87로 모두 선형적 관계를 나타내었다. 이를 통해 표면 메탄농도 측정이 이루어질 경우 상관식을 통해 표면 메탄 발산량을 산정할 수 있을 것으로 사료된다. 다만, 3회 측정 결과에서 나타난 것처럼 시기가 다를 경우 표면 메탄농도와 표면 메탄발산량은 상관성이 없어 단순히 표면 메탄농도만 측정하여서는 의미가 없는 것으로 판단되며, 이는 측정 시기의 대기압 등의 기상조건이 달랐기 때문으로 사료된다[7].

따라서 우선적으로 복토 및 매립 구획 특성을 고려하여 폐기물매립지 상부의 다수 지점에 대하여 표면 메탄농도를 측정 후 최소와 최대 표면 메탄농도를 포함한 일부 지점의 표면 메탄발산량을 측정하여 상관식을 도출하도록 하여야 할 것이다. 그리고 상관식과 다수의 지점에서 측정한 표면 메탄농도를 기초로 표면 메탄발산량을 산정하면 상당 시간이 소요되는 표면 메탄발산량의 측정 횟수 및 소요 시간을 단축시키면서 다량의 표면 메탄농도로 인해 Hot spot 지점의 배제 가능성을 최소화시켜 표면 메탄 발산량 데이터의 신뢰성을 향상 시킬 수 있을 것이다.

3.2 거리역산가중기법

표면 메탄농도를 이용하여 Hot spot 지점의 배제가능성을 최소화하고자 하였으나 그럼에도 불

구하고 폐기물매립지의 면적은 매우 넓어 점 측정의 한계를 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 상기에서 나타낸 방법과 더불어 Hot spot 지점의 배제 가능성을 더욱 낮추기 위하여 지리 정보통계 기법을 이용하였다. 본 연구에서 이용한 지리 정보통계 기법은 거리역산가중기법으로 등고선 간격의 전체영역을 추출하는 표면적 알고리즘을 통해 공간 구조를 모델링하여 측정이 이루어지지 않은 매립지 표면의 표면 메탄농도를 추정할 수 있는 기법이다. 이 방법은 폐기물매립지 메탄 농도 추정을 위해 한정된 지점의 측정에서 간격간의 메탄 농도를 예측해 전체 구역의 메탄 농도 분포를 계산 할 수 있다[8].

거리역산가중기법은 Sufer 11(Golden software, Inc.) 소프트웨어로 다음의 식(2)를 사용하였다. 변수값은 측정 지점에 대한 예상 값을 구하는데 필요한 측정지점사이의 거리 및 측정지점에서의 데이터 값 등이 있다. 평활인자(s)는 기존연구에서 나타낸 바와 같이 0으로 하였으며[8], 이는 폐기물매립지의 불균질성으로 인하여 Hot spot과 같은 특정 지점이 있어도 주변의 표면 메탄발산량에 미치는 영향은 거의 없기 때문이다. 공식에 따라서 측정 지점 이외의 표면 메탄농도를 예측하였고 메탄 표면발산량은 상관식 및 메탄농도 데이터를 사용하여 계산하였다.

$$Z^{j}_{est} = \frac{\Sigma(\frac{z_i}{(h_{i,j}+s)^2})}{\Sigma(\frac{1}{(h_{i,j}+s)^2})} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

여기서,

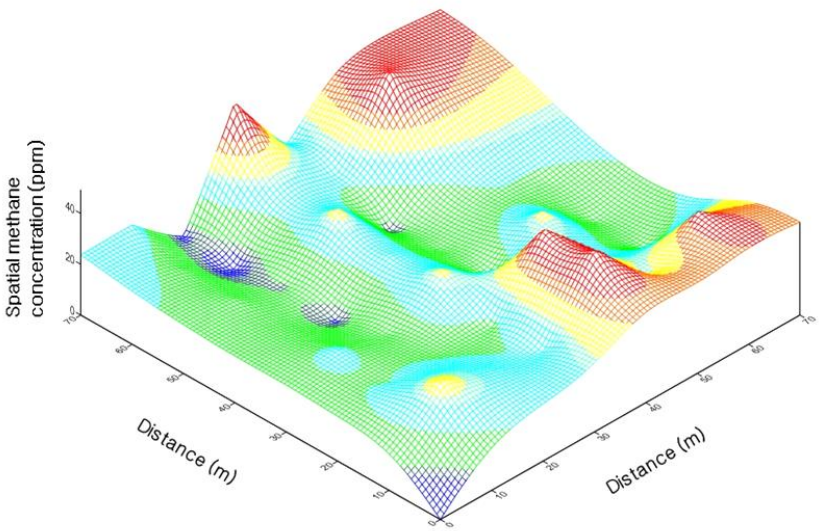
z^{j}_{est} : 예측지점에서의 예상 값

z_i : i지점에서의 측정 값

h_{ij} : z^{j}_{est} 와 z_i 의 거리

s : 평활인자(Smoothing factor, 0 was used)

A매립지 표면에서 발생하는 메탄 발생량을 산정하기 위해 사용한 상관식은 10월 측정결과(y = 1.7177x - 12.072)를 사용하여 산정하였다. **[Fig. 4]**는 거리역산가중기법을 통해 측정 구역의 표면 메탄농도을 산정하여 3D 공간 분포를 나타낸 것이며, **[Table 1]**은 공간분포를 통해 도출된 표면 메탄농도를 상관식에 대입하여 도출된 표면 메탄발산량을 나타낸 것이다[9]. 거리역산가중기법을 통해 산정된 표면 메탄발산량은 19.58 g/m^2/d이나 상기 11지점의 측정데이터를



[Fig. 4] Spatial distribution of methane concentrations using inverse distance weighting contouring.

산술평균하였을 경우에는 7.04 g/m^2/d으로 단순 산술평균 시 상당히 표면 메탄발생량이 과소평가 되고 있는 것으로 나타났다. 또한 표면 메탄농도가 41~50 ppm을 나타내고 있는 면적은 측정지점의 12.85%에 불과하나 표면 메탄발산량은 전체 메탄발산량 중 42.21%를 나타내고 있어 단순 격자 방식을 통한 표면 메탄발산량 측정 및 산정은 전체 폐기물매립지의 메탄발산량이 과소평가될 수 있는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서 제안한 레이저메탄검지기를 활용한 다수의 표면 메탄농도의 측정과 지리정보통계 기법을 조합하면 기존의 챔버를 통한 점 측정방식의 한계 극복 및 데이터의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것이다.

4. 결론

폐기물매립지에서 발생하는 메탄가스 측정을 위해 기존에 사용한 챔버방법은 점 측정 방식으로 측정지점 선정에 있어 격자방식으로 hot spot 구역의 측정이 배제 될 수 있고 노동집약적이며 시간이 많이 소요 된다는 단점을 가지고 있다. 그래서 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 표면 메탄농도와 거리역산가중기법을 조합한 측정방법을 제안하였다.

레이저메탄검지기로 측정한 표면 메탄농도와 표면 메탄발산량의 상관성 실험을 통해 상관성이 높은 특성을 나타내었다. 따라서 표면 메탄농도를 이용하여 표면 메탄발산량을 산정하는 것이 가능한 것으로 나타났다. 특히, 상관식과 거리역산가중기법을 통해 폐기물매립지 표면발산량 산정결과 기존의 단순 격자 방식을 통한 표면 메탄발산량은 과소평가될 수 있는 것으로 나타났다. 마지막으로 본 연구에서 제안한 방법은 소요되는 조사시간과 인력을 절감 할 수 있으며 다수 지점의 반복 측정을 통해 데이터의 정확도를 높임으로써 기존 측정방법의 한계를 극복 할 수 있는 것으로 판단된다.

References

1. El-Fadel, M., Abi-Esber, L. and Salhab, S., "Emission assessment at the Burj Hammoud inactive municipal landfill: Viability of landfill gas recovery under the clean development mechanism", Waste Manage., Vol. 32, No. 11, pp. 2106-2114. (2012).
2. Park, J.-K., Lee, W.-J., Kim, Y.-J., Yoo, M.-H. and Lee, N.-H., "Assessment of greenhouse gas emission factors for wood wastes in a solid waste landfill", J. of Korea Society of Waste Management, Vol. 31, No. 8, pp. 811-819. (2014).
3. Park, J.-K., Kang, J.-Y., Kang, J.-H. and Lee, N.-H., "Method development for measurement of methane emissions fromvalley-type landfills", in Proceedings of Fourteenth International Waste Management

[Table 1] Results of Inverse Distance Weighting Analysis

contour interval (ppm)	Area (m^2)	Area of total (%)	Number of measurements	Flux average (g/m^2 /d)	Flux of total (%)	Flux of total (kg/day)
0 – 10	505	10.30	4	5.83	5.95	2.94
11 – 20	1,755	35.81	7	7.56	7.72	13.26
21 – 30	1,630	33.26	8	15.06	15.38	24.55
31 – 40	380	7.75	3	28.12	28.72	10.68
41 – 50	630	12.85	5	41.33	42.21	26.04
Totals	4,900	100	27	19.58	100	77.50

and Landfill Symposium. (2013).

4. Scheutz, C., Samuelsson, J., Fredenslund, A.M. and Kjeldsen, P., “Quantification of multiple methane emission sources at landfills using a double tracer technique”, Waste Manage., Vol. 31, No. 5, pp. 1009−1017. (2011).
5. Bella, G. D., Trapani, D. D. and Viviani, G., “Evaluation of methane emission from Palermo municipal landfill: Comparison between field measurements and models”, Waste Manage., Vol. 31, No. 8, pp. 1820−1826. (2011).
6. Wang, J. M., Murphy, J. G., Geddes, J. A., Winsborough, C. L., Basiliko, N., and Thomas, S. C., "Methane fluxes measured by eddy covariance and static chamber techniques at a temperate forest in central Ontario, Canada", Biogeosciences, Vol. 10, pp. 4371−4382. (2013).
7. Park, J.−K., Lee, W.−J, Ban, J.−K., Kim, E.−C. and Lee, N.−H., “Estimation of CH4 oxidation efficiency in an interim landfill cover soil using CO_2/CH_4 ratios”, Environ. Eng. Res., Vol. 20, No. 2, pp. 191−197. (2015).
8. Spokas K, Graff C, Morcet M, Aran C, “Implications of the spatial variability of landfill emission rates on geospatial analyses”, Waste Manage., Vol. 23, No. 7 pp. 599−607. (2003).