



이학석사 학위논문

온실가스 모바일 관측 플랫폼 기반 서울 도심 메탄 배출 특징 분석

Characterizing urban methane emissions in Seoul, South Korea using a greenhouse gas monitoring mobile lab

2023년 2월

서울대학교 환경대학원

환경계획학과 환경관리학전공

박 정 민

온실가스 모바일 관측 플랫폼 기반 서울 도심 메탄 배출 특징 분석

지도교수 정 수 종

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함 2023년 2월

> 서울대학교 환경대학원 환경계획학과 환경관리학전공 박 정 민

박정민의 이학석사 학위논문을 인준함 2023년 2월

위 위	원장	오 능 환	(인)
부위	원장	손 석 우	(인)
위	원	정 수 종	(인)

국문초록

2030년 국가 온실가스 배출량 감축 목표 달성을 위한 단기 전략으로 인위적 메탄 배출량을 줄이는 것이 주목받고 있다. 인위적 메탄 배출은 인간 활동이 많은 도시의 다양한 기반시설에 의해 발생하고 있으며, 특 히 천연가스 사용 및 폐기물 관리에 따른 배출이 주요인으로 작용하고 있다. 하지만 아직 국내 도시에서의 메탄 배출 특징에 대한 이해는 부족 한 상황이다. 본 연구는 도시의 복잡한 구조에 적합한 온실가스 모바일 관측 플랫폼을 개발하여 국내 최초로 서울의 예상 메탄 배출원을 중심으 로 관측을 진행하였다. 2022년 1월부터 약 10개월간 서울 전 지역의 4,206km 구간에 대한 메탄 농도 모니터링을 통해 1,707개의 메탄 누출징 후를 탐지하였다. 서울의 배경농도는 약 2,000~2,300ppb의 수준이었으 며, 서울의 주요 배출원은 매립지, 물재생센터와 같은 폐기물 부문과 복 합화력발전소, 천연가스버스와 같은 에너지 부문에서 각각 최대 46,500ppb의 초과농도가 관측되었다. 이외에도 맨홀과 같은 하수관망에 의한 배출 또한 다수 식별하였는데, 이는 국가 온실가스 인벤토리에 반 영되지 않은 부분이었다. 주요 배출원에 대하 에탄 대 메탄 비율 분석 결과, 폐기물 부문은 생물학적 기원의 배출원으로 에너지 부문의 화석연 료 기원 배출원보다 낮은 특징을 보였다. 폐기물 부문의 주요 배출원인 서남물재생센터의 연간 배출률을 가우시안 플룸 모델을 활용하여 49.95±5.92 Gg CO₂ eq/year로 추정하였다. 이는 2019년 온실가스 인벤토 리 기준 서남·탄천·중랑물재생센터를 포함하는 서울시 하수처리부문 배 출량의 약 70%에 해당하는 수치로 통계기반 인벤토리가 실제 배출량을 낮게 모의하고 있음을 의미한다. 이러한 결과는 도시 주요 메탄 배출원 에 대한 배출 및 탈루 관리를 위해 정밀한 온실가스 모니터링이 반드시 필요하며, 이를 위한 모바일 관측이 선행되어야 함을 보여준다.

주요어 : 온실가스, 서울, 메탄, 모바일 관측, 배출률 학 번 : 2021-24014

목 :	카
-----	---

I.	서	론	1
	1.	연구 배경 및 목적	1
	2.	선행 연구	4
		1) 국외 메탄 모바일 관측 연구	4
		2) 국내 메탄 모바일 관측 연구	7
Π	. q	친구 방법	8
	1.	연구 흐름도	8
	2.	연구 범위	10
		1) 관측 대상지	10
		2) 관측 기간	11
		3) 관측 경로	14
	3.	온실가스 모바일 관측 플랫폼	16
		1) 관측 플랫폼 구성	16
		2) 온실가스 관측장비	17
	4.	대형 배출원의 배출률 산출	19
		1) 배경농도 및 초과농도 정의	19
		2) 가우시안 플룸 확산 모델	21
		3) 대형 배출원 플룸 모바일 관측 방법	24
		4) 연간 배출률 추정방법	24
		5) 불확도 산출	25

III. 연구 결과	27
1. 서울 도심 대기 중 메탄 농도 분포	27
2. 폐기물 부문 메탄 배출원	31
1) 수처리시설	31
2) 매립지	32
3. 에너지 부문 메탄 배출원	34
1) 천연가스 기반 발전시설	34
2) 수송 부문	36
3) 대형건물 환기시설	37
4. 에탄 대 메탄 비율 분석	38
5. 서남물재생센터 연간 배출률 산정 예시	41
Ⅳ. 결론 ······	43
참고문헌	45
Abstract	50

표 목 차

[표 1] 모바일 관측 일지	12
[표 2] 온실가스 관측장비 제원	18
[표 3] Pasquill-Gifford stability class	23
[표 4] 폐기물 부문 배출원 탐지결과	29
[표 5] 에너지 부문 배출원 탐지결과	30
[표 6] 기원별 메탄 배출원의 에탄 대 메탄 비율 분석결과	39
[표 7] 서남물재생센터 배출률 산출 변수	42

그림 목차

[그림 1] 연구 흐름도	9
[그림 2] 관측 지역(서울시)	10
[그림 3] 온실가스 모바일 관측 플랫폼	17
[그림 4] 배경농도 및 누출징후 관측사례	20
[그림 5] Gaussian Plume Dispersion Model 모식도	23
[그림 6] 서울 도심 대기 중 메탄 농도 분포 관측결과	28
[그림 7] 서울시 물재생센터 4개소 일대 고농도 메탄 분포	32
[그림 8] 수도권 매립지 일대 고농도 메탄 분포	33
[그림 9] 서울복합화력발전소 일대 고농도 메탄 분포	34
[그림 10] 천연가스버스 고농도 메탄 관측 모습	36
[그림 11] 대형건물 환기시설 일대 고농도 메탄 분포	37
[그림 12] 배출 기원별 에탄 대 메탄 비율 분석 예시	40
[그림 13] 서남물재생센터 풍하측 메탄 플룸 탐지	41

I. 서 론

1. 연구 배경 및 목적

인간 활동으로 인한 대기 중 온실가스 증가로 인하여 지구의 평균 기온은 1880년 이후 10년마다 0.08℃, 1980년 이후에는 0.18℃씩 점진적 으로 상승하고 있다.¹⁾ 메탄은 이러한 온실효과에 2번째로 많은 기여를 하는 온실가스로, 이산화탄소보다 100년 기준 28~34배에 달하는 잠재적 온난화 효과(Global warming potential)를 지니고 있다.²⁾

메탄은 이산화탄소에 비해 상대적으로 짧은 대기 중 체류시간을 지 니고 있어 메탄 배출량 감축은 단기적 온실가스 배출량 감축 전략 중 가 장 효과적인 방법으로 최근 주목을 받고 있다.³⁾⁴⁾ 2021년 11월 개최한 유엔기후변화협약 당사국총회(UNFCCC COP26)는 기후변화 대응의 기 점이라고 부를 수 있을 만큼 전 세계적인 관심을 끌었고, 이산화탄소가 아닌 메탄 감축이 중요한 의제로 언급되었다. 해당 당사국총회에서 한국 은 2030년 온실가스 감축목표를 40%로 상향하였으며, 글로벌 메탄 서약 을 가입하여 2030년까지 2020년 대비 30%의 메탄 배출량 감축과 지속적 인 감축을 위한 노력을 약속하였다.

메탄을 발생시키는 요인은 크게 자연적 배출원(e.g., 습지, 자연발화

¹⁾ NOAA, Global Average Surface Temperature, https://www.climate.gov/news -features/understanding-climate/climate-change-global-temperature

Shindell, D. T., Faluvegi, G., Koch, D. M., Schmidt, G. A., Unger, N., & Bauer, S. E. (2009). "Improved attribution of climate forcing to emission" s. Science, 326(5953), 716–718.

³⁾ Schiermeier, Q. (2020, July 14). Global methane levels soar to record hig h", Nature, https://www.nature.com/articles/d41586-020-02116-8

⁴⁾ Staniaszek, Z., Griffiths, P. T., Folberth, G. A., O'Connor, F. M., Abraham, N. L., & Archibald, A. T. (2022). "The role of future anthropogenic metha ne emissions in air quality and climate". Climate and Atmospheric Scienc e, 5(1), 1–8.

산불, 흰개미)과 인위적 배출원(e.g., 화석연료, 농업, 하·폐수, 매립지 폐기 물)으로 구분된다. 이 중 인위적 메탄 배출은 2017년 세계 메탄 수지 (Global methane budget) 연구에서 세계 메탄 총배출량의 약 51%(상향식 추정법), 62%(하향식 추정법)로 절반 이상을 차지하였다.⁵⁾ 인위적 배출원 의 대부분은 농업 및 폐기물(약 57%)과 화석연료(약 33%) 부문에서 발생 하였다. 폐기물 부문의 메탄 배출은 쓰레기 매립, 하·폐수 처리와 같은 과 정 중에 혐기성 조건에서 미생물에 의해 메탄이 발생하게 된다. 2008~ 2017년 사이 전 지구의 인위적 메탄 배출량의 약 12%가 폐기물 부문에 의해 발생6)하였으며, 국내 또한 2019년 국가 온실가스 인벤토리 기준 총 메탄 배출량의 약 30%를 폐기물 부문에서 배출하고 있다.⁷⁾ 화석연료 부 문의 메탄 배출은 메탄을 주성분으로 하는 천연가스의 사용으로부터 비롯 되고 있다. 한국은 2021년 기준 세계 3위 액화천연가스(LNG) 수입 국가로 복합화력발전소, 지역난방시스템, 도시가스 등 많은 기반시설이 천연가스 를 연료로 운영되고 있다.⁸⁾

천연가스와 폐기물에 의한 메탄 배출은 인구의 활동이 많은 도시의 주된 배출원으로 작용하고 있다. 천연가스는 전력 발전, 온수 및 난방, 교통부문에서 주로 소비되고 있으며, 불완전 연소와 가스 운송과정 중 탈루로 인하여 많은 양이 배출되고 있다. 폐기물 부문의 메탄 배출 또한 도시에 위치하고 있는 매립지와 수처리시설에서 폐기물과 하·폐수 처리 공정 중에 발생하고 있다. 이외에도 주거지역 하수관망과 같이 혐기성 조건이 형성되는 어느 곳이든 메탄이 발생할 수 있다.

⁵⁾ Saunois, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jack son, R. B., ... & Zhuang, Q. (2020). "The global methane budget 2000 - 20 17". Earth system science data, 12(3), 1561–1623.

⁶⁾ Saunois, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jack son, R. B., ... & Zhuang, Q. (2020). "The global methane budget 2000 - 20 17". Earth system science data, 12(3), 1561–1623.

⁷⁾ 온실가스종합정보센터(2021), 「2021년 국가 온실가스 인벤토리(1990~2019) 보고서(NIR)」

⁸⁾ 국정모니터링지표, https://www.index.go.kr/

도시는 서로 다른 인위적 메탄 배출원들이 다양한 공간에 분포하고 있으며, 이로 인해 많은 양의 메탄이 배출되고 있다. 이러한 도시의 메탄 배출 특징으로 인해 많은 연구에서 기존 모델이나 인벤토리에서 추정한 배출량이 실제 메탄 배출량과 농도를 낮게 추정하고 있음을 시사하였 다.9)10) 현재 국내에서 공개된 자료 중 가장 많이 메탄 배출량 추정에 사 용되는 온실가스 인벤토리는 통계자료를 기반으로 연간 배출 총량을 추 정하는데 유용하지만, 실제 대기 중 메탄 농도의 분포와 개별 배출원의 배출 특징을 파악하기에 제한적이다.

국외의 많은 연구에서 인간의 활동이 많은 도시를 중심으로 메탄 배 출에 대한 관측 및 정량화를 위한 노력이 이루어지고 있지만, 관측 기반 의 부문별 배출 특성을 정규화한 연구는 미비하다.¹¹⁾ 또한, 각 국가별 특 성과 기반시설 종류에 따라 서로 다른 메탄 배출 특징을 가지고 있기 때 문에, 국가의 특성을 고려한 관측 또한 필요한 상황이다.

우리나라 수도 서울은 2019년 국가 온실가스 인벤토리 기준 메탄 총 배출량의 약 10%를 차지하고 있으며, 인간의 활동이 국내에서 가장 많 은 대표적인 도시이다. 본 연구는 메탄의 배출 및 탈루 식별에 유리한 온실가스 모바일 관측 플랫폼을 개발하여 서울의 다양한 배출원 탐지와 대형 배출원에 대한 배출량 산정을 통해 도시의 메탄 배출 특징을 분석 하고자 한다.

⁹⁾ Wunch, D., Wennberg, P. O., Toon, G. C., Keppel Aleks, G., & Yavin, Y. G. (2009). "Emissions of greenhouse gases from a North American megaci ty". Geophysical research letters, 36(15).

Hsu, Y. K., VanCuren, T., Park, S., Jakober, C., Herner, J., FitzGibbon, M., ... & Parrish, D. D. (2010). "Methane emissions inventory verification in southern California". Atmospheric Environment, 44(1), 1–7.

Defratyka, S. M., Paris, J. D., Yver-Kwok, C., Fernandez, J. M., Korben, P., & Bousquet, P. (2021). "Mapping urban methane sources in Paris, Fr ance". Environmental Science & Technology, 55(13), 8583–8591.

2. 선행 연구

1) 국외 메탄 모바일 관측 연구

국외에서 모바일 플랫폼을 기반으로 도시의 대기 중 메탄 관측은 2010년 이후 미국, 유럽, 중국, 일본과 같은 선진국 위주로 활발하게 이 루어졌다. 선행 연구에서는 주로 도시의 천연가스 관망 및 폐기물 부문 의 메탄 배출을 탐지하는데 집중하였다. 하지만, 도시의 메탄 배출 특징 은 각 국가별 기반시설의 구조와 노후 정도 등 도시 환경에 따라 달라지 기 때문에 세계 각국의 주요 도시에 대한 모바일 관측 연구는 지속적으 로 이루어지고 있다.

선행 연구의 모바일 관측은 크게 두 가지 목적을 가지고 진행되었 다. 첫 번째는 도로 수준에서 관측 가능한 대기 중 메탄 농도의 공간 분 포와 배출원의 발생기원을 파악하는 것이다.

Hopkins et al.(2016)의 연구¹²⁾에서는 미국 Los Angeles Basin의 도 시를 동-서, 남-북으로 가로지르는 약 1,900km 도로상에서 모바일 관측 을 진행하였다. GPS 좌표 데이터와 메탄 농도 측정 결과를 동기화시켜 지도상에 나타내는 맵핑(mapping)을 통해 대기 중 메탄의 공간 분포를 보여주었다. 메탄 관측농도에서 배경농도를 뺀 초과농도 개념을 사용하 여 당일 관측의 95th percentile를 초과하는 핫스팟(hot-spot)을 구분하였 다. 또한 핫스팟의 에탄 대 메탄 비율을 통해 생물학적 기원과 화석연료 기원의 배출원을 분류하였다. 에탄 대 메탄 비율 분석은 화석연료 기원 의 메탄 배출원을 구분할 수 있는 방법으로, 화석연료 기원의 배출원 내 의 에탄 비율이 생물학적 기원 배출원의 에탄 비율보다 높다는 특징을

¹²⁾ Hopkins, F. M., Kort, E. A., Bush, S. E., Ehleringer, J. R., Lai, C. T., Bl ake, D. R., & Randerson, J. T. (2016). "Spatial patterns and source attribution of urban methane in the Los Angeles Basin". Journal of Geophysic al Research: Atmospheres, 121(5), 2490–2507.

활용한 개념이다. 생물학적 기원의 메탄 배출원의 경우 에탄의 비율이 0 에 가깝다. 연구에서 식별한 핫스팟은 생물학적 기원 배출원인 매립지, 축사, 하수처리시설이 있었으며, 화석연료 기원의 경우 발전소, 압축천연 가스(CNG) 충전소, 천연가스 관망 누출이 있었다. 또한 유정이 분포하고 있는 LA에서의 지질학적 근원의 메탄 배출에 대한 특징도 제시하였다.

Defratyka et al.(2021)의 연구¹³⁾에서는 프랑스 파리 도심에 대해 약 720km의 관측을 진행하여 메탄 배출원을 탐지하고 특징을 분석하였다. 특정 지점의 메탄 초과농도가 배경농도의 10%가 넘는 지점은 누출징후 (leak indication)으로 정의하였고, 초과농도가 500ppb 이상인 지점에 대해 서는 50m 길이의 AirCore sampler를 설치하여 불확도를 줄인 δ¹³CH₄ 분 석을 진행했다. 동위원소 분석은 화석연료 기반의 배출원을 구분할 수 있 는 다른 방법으로 화석연료에 포함된 ¹³C 비율이 일반 대기 중의 ¹³C 비 율보다 작다는 점을 활용한 개념이다. 관측 데이터 분석 결과, 연구 지역 에서 확인된 총 90개의 누출징후 중에서 63%는 천연가스 관망, 33%는 하수관망, 4%는 건물의 보일러 및 환기시설에서의 배출임을 확인하였다.

두 번째 목적은 메탄 배출에 대한 정량화를 통해 기존에 보고된 온 실가스 인벤토리 배출량과 비교·검증하는 것이다. 다음 연구에서는 미국 과 유럽 도시의 대형 배출원에 대하여 가우시안 플룸 확산모델 (Gaussian Plume Dispersion Model)을 적용하여 배출률을 산출하였다.

Lan et al.(2015)¹⁴⁾의 연구는 미국 텍사스 지역의 4개의 매립지로부 터 풍하측의 플룸(plume)을 탐지한 뒤 관측된 플룸의 중심에 정차하여 10분 이상의 고정 관측을 통해 농도, 기상 데이터를 수집하였다. 수집한 데이터의 평균값을 기준으로 모델에 산입하였고 결과는 매립지별로 86~

¹³⁾ Defratyka, S. M., Paris, J. D., Yver-Kwok, C., Fernandez, J. M., Korben, P., & Bousquet, P. (2021). "Mapping urban methane sources in Paris", Fr ance. Environmental Science & Technology, 55(13), 8583–8591.

¹⁴⁾ Lan, X., Talbot, R., Laine, P., & Torres, A. (2015). "Characterizing fugiti ve methane emissions in the Barnett Shale area using a mobile laborator y". Environmental Science & Technology, 49(13), 8139–8146.

2,087kg/h의 배출률을 보여주었다. 배출률의 불확도는 60% 이내의 범위 를 보였으며, 민감도 분석을 통해 모델 결과에 가장 영향을 많이 끼치는 요소인 풍향, 풍속, 배출원의 높이의 오차에 대해 정규분포를 가정하고, 몬테 카를로 방법(Monte Carlo probabilistic uncertainty method)을 통해 신뢰구간을 부여하는 방식으로 계산하였다. 모델 결과값이 2013년 인벤 토리(2013 GHGRP) 결과에 비해 0.3~2배 모의한다는 것을 확인하였다.

Maazallahi et al.(2020)¹⁵⁾의 연구에서는 네덜란드의 Utrecht와 독일의 Hamburg 도심에서 모바일 관측을 통해 초과농도가 배경농도의 약 10%가 넘는 누출징후를 탐지하였다. 누출징후의 기원은 δ¹³CH₄ 동위원소와 에탄 대 메탄 비율 분석을 통해 구분하였다. Utrecht에서는 확인된 누출징후 중 69%가 화석연료 기원, 10%가 생물학적 기원, 21%가 식별되지 않은 배출 원으로 분류되었다. Hamburg는 확인된 누출징후 중 38%가 화석연료 기 원, 54%가 생물학적 기원, 8%가 식별되지 않은 배출원으로 분류되었다. 식별된 배출원 중 Utrecht의 하수처리장에 대해서 풍하측 식별된 플룸을 바탕으로 가우시안 플룸 확산 모델을 적용하여 배출률을 산출하였다. 위 연구에서는 하수처리장에서 주로 메탄을 생산 및 탈루한다고 알려진 소화 조를 배출원점으로 특정하였다. 풍향 및 풍속에 대해서는 측정 데이터의 표준편차를 오차로 하여 모델에 적용하였다. 그 결과 연간 배출률이 160±90t/yr로 약 56.25%의 불확도를 보였으며, 이는 2010년부터 2017년까 지 기존에 보고되었던 배출량인 130±50t/yr과 잘 일치하는 것으로 보였다.

두 연구의 모델 결과 모두 기존에 보고된 배출률과 비교하였을 때 유사한 결과를 보였다는 점에서 관측을 통한 배출률 산출로서 의의를 가 지고 있지만, 가우시안 플룸 확산 모델이 가지고 있는 높은 불확도로 인 한 한계는 존재하였다.

¹⁵⁾ Maazallahi, H., Fernandez, J. M., Menoud, M., Zavala-Araiza, D., Weller, Z. D., Schwietzke, S., ... & Röckmann, T. (2020). "Methane mapping, emission quantification, and attribution in two European cities: Utrecht (NL) and Ha mburg (DE)". Atmospheric Chemistry and Physics, 20(23), 14717–14740.

2) 국내 메탄 모바일 관측 연구

국내에서 모바일 플랫폼을 기반으로 온실가스를 측정한 연구는 국외 에 비하여 늦은 2021년부터 진행되었으며, 데이터가 많이 축적되지 않았 다. Chang et al.(2022)의 연구¹⁶⁾에서는 2021년 2~3월에 수도권 외곽 지 역인 경기 남부~충청권에 대해서 항공 및 모바일 관측을 통해 국가 온 실가스 인벤토리에서 식별하지 못했던 산업 폐기물, 매립지, 산업단지 등 에서의 고농도 메탄 배출 사례를 소개하였다. 본 연구와 같은 장비인 LICOR사의 미량 기체 농도 분석 장비 LI-7810을 사용하여 대기 중 메 탄의 농도를 측정하였으며, 입자 분산 모델을 통하여 배출원의 위치를 추정하였다. 온실가스 모바일 관측 플랫폼을 국내에서 최초로 적용한 연 구로의 의의를 가지고 있으나, 교외지역에 대한 적은 모바일 관측 횟수 와 배출원 탐지 수준에 그쳤다는 한계가 있었다.

서울에 대한 대기 중 메탄 모바일 관측 연구는 진행된 것이 없었으 나, Park et al.(2022)의 연구¹⁷⁾에서 2021년 서울 도심을 대상으로 항공 및 지상관측을 통해 대기 중 메탄 농도를 측정하였다. 2021년 2월에 2번 의 항공관측을 통해 메탄 농도를 측정하여, 서울 도심의 대형 메탄 배출 원인 물재생센터, 복합화력발전소뿐만 아니라 대형 쇼핑몰인 코엑스에서 도 고농도의 대기 중 메탄 분포를 관측하였다.

아직 국내 도시에 대한 세부적인 대기 중 메탄 배출의 특징을 분석한 연구는 매우 부족하며, 이에 맞는 최적화된 모바일 관측 플랫폼의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 온실가스 모바일 관측 플 랫폼을 개발 및 발전시켜 서울의 메탄 배출 특징을 파악하고자 하였다.

¹⁶⁾ Chang, D. Y., Jeong, S., Oh, E., Sim, S., Kim, Y., Park, C., ... & Choi, J. S. (2022). "Finding the Missing Link in Methane Emission Inventories U sing Aircraft and Mobile Observations". Asia-Pacific Journal of Atmosph eric Sciences, 58(2), 293–297.

Park, H., Jeong, S., Park, H., Kim, Y., Park, C., Sim, S., ... & Choi, J. (2 022). "Unexpected Urban Methane Hotspots Captured from Aircraft Obse rvations". ACS Earth and Space Chemistry, 6(3), 755–765.

Ⅱ. 연구 방법

1. 연구 흐름도

본 연구는 그림 1과 같이 크게 3가지 순서로 진행되었다. 가장 먼저, 온실가스 모바일 관측 플랫폼을 활용하여 서울 전 지역에 대한 메탄 농 도 모니터링을 통해 배출원을 탐지하고 맵핑하였다. 이를 위해 예상 메 탄 배출원을 선정하여 각 구별 관측 경로를 선정하여 모바일 관측을 진 행하였다. 수집된 데이터는 장비의 공기 흡입 지연시간 등을 고려하여 전처리 과정을 거쳐 품질을 조정하였고, 모든 관측지점의 배경농도와 초 과농도를 산출하여 메탄 배출이 의심되는 누출징후를 도출하였다.

다음은 탐지된 모든 메탄 배출원을 국가 온실가스 인벤토리의 부문 별 구분 기준과 에탄 대 메탄 비율을 통한 기원 분석을 통해 폐기물 부 문과 에너지 부문으로 분류하였다. 분류된 배출원 중 규모가 크거나 상 대적으로 높은 메탄 초과농도가 식별된 주요 배출원들의 경우 반복 관측 을 진행하여 에탄 대 메탄 비율과 연간 배출률과 같은 세부적인 특징을 분석하기 위해 추가적인 데이터를 수집하였다.

마지막으로 반복 관측을 통해 수집된 데이터는 에탄 대 메탄 비율 분석을 통하여 주요 배출원의 기원별 특징을 정리하였고, 일부 대형 배 출원은 가우시안 플룸 모델을 적용하여 연간 배출률 산정을 시도하였다. 매 관측간 기록된 메탄 배출원의 관측 최대 초과농도 등의 결과를 정리 하여 배출 기원별 서울 메탄 배출의 특징을 정리하였다. 각 절차의 자세 한 설명과 용어 설명은 이어지는 연구 방법에 자세히 기술하였다.



<그림 1> 연구 흐름도

2. 연구 범위

1) 관측 대상지

관측 대상지는 서울시 행정구역에 포함되는 25개 자치구와 서울 인 근에 위치한 수도권 매립지, 인천광역시 청라 공업단지와 같은 각 지역 의 예상 메탄 배출원을 위주로 선정하였으며, 모바일 플랫폼의 접근이 가능한 도로상에서 관측을 진행하였다.



<그림 2> 관측 지역(서울시)

서울은 대한민국의 북서부(북위 37도, 동경 126도)에 위치하며, 605.2km²의 면적에 2022년 1월 기준 약 950만명의 인구가 거주하고 있는 높은 밀도를 가진 도시이다.¹⁸⁾ 많은 인구가 거주함에 따른 대형 상업시

18) 서울특별시, 서울 열린데이터 광장, https://data.seoul.go.kr/

설, 주거단지(아파트·주택 등), 지하철·버스와 같은 각종 대중 교통시설, 전력을 생산 및 공급하는 발전시설 등 다양한 기반시설들이 구축되어 있 으며 그 속에서 수많은 인간의 활동이 이루어지고 있다. 도시 내 기반시 설은 메탄의 인위적 배출원에 해당하는 도시가스 시스템, 각종 하·폐수 처리시설, 매립지, 압축천연가스를 연료로 하는 버스 등 다양한 메탄 배 출원을 포함하고 있다. 본 연구는 이러한 인위적 배출원에 집중하여 진 행하였으며, 자연적 배출원으로 추정할 수 있는 한강, 습지 등은 고려 대 상에서 제외하였다.

2) 관측 기간

2022년 1월 4일부터 2022년 11월3일까지 약 10개월간 총 54회, 약 4,200km의 모바일 관측을 진행하였다. 2022년 7월까지는 서울의 각 자치 구별 배출원 탐지 및 특징 파악에 중점을 두어 진행하였고, 이후에는 개 별 배출원에 대한 배출량 산정 및 대기 중 에탄 농도 관측을 통한 배출 요인 파악에 중점을 두었다. 비가 오지 않는 맑은 날을 위주로 주 1~2 회 관측을 진행하였으며, 관측 시간은 오전 10시 30분부터 오후 5시까지 낮 시간대(daytime)에 진행되었다. 세부적인 관측 일지는 표 1과 같다.

<표 1> 모바일 관측 일지

순번	관측 일자	관측 장소	관측 거리	관측 시간대
1	22.01.04	강동구	98.0km	
2	22.01.06	마포구	72.3km	-
3	22.01.11	성동구	58.2km	-
4	22.01.13	강남구(COEX 일대)	42.1km	
5	22.01.18	수도권 매립지	89.8km	-
6	22.01.20	강남구	45.0km	
7	22.01.25	종로구 서측	69.9km	-
8	22.01.27	종로구 동측	52.6km	-
9	22.02.03	강서구	93.0km	
10	22.02.15		67.9km	-
11	22.02.16		84.5km	
12	22.02.17		70.6km	
13	22.02.18		80.6km	doutimo
14	22.02.19	서울-도쿄 온실가스	71.9km	(10.20 - 17.00)
15	22.02.20	모니터링 캠페인(강남구)	88.3km	$(10.50 \sim 17.00)$
16	22.02.22		73.9km	
17	22.02.23		80.2km	
18	22.02.24		72.9km	
19	22.02.25		67.5km	
20	22.03.02	동대문구	65.8km	-
21	22.03.17	양천구	101.7km	-
22	22.03.23	성북구	84.0km	
23	22.04.01	종로구, 코엑스	74.9km	
24	22.04.06	송파구	35.0km	-
25	22.04.13	은평구	86.0km	
26	22.04.14	서울복합화력발전소 등	71.6km	
27	22.04.20	서대문구	60.0km	

<표 1> 모바일 관측 일지

순번	관측 일자	관측 장소	관측 거리	관측 시간대	
28	22.05.12	노원구	96.2km		
29	22.05.18	수도권 매립지	124.0km		
30	22.05.20	인천 LNG터미널, 시흥공업단지	112.6km	-	
31	22.05.25	금천구, 구로구	56.2km	-	
32	22.06.02	금천구	64.2km		
33	22.06.08	도봉구, 강북구	107.6km		
34	22.06.17	한강 일대(서쪽)	81.8km		
35	22.06.24	송파구	76.2km		
36	22.07.04	광진구	63.2km		
37	22.07.12	경기 여주	176.8km		
38	22.07.25	경기 여주	174.2km		
39	22.08.09	전북 전주	213.8km		
40	22.08.17	서남·탄천 물재생센터	74.1km	doutime	
41	22.08.22	2.08.22 서남 물재생센터		$(10.30 \sim 17.00)$	
42	22.09.06	관악구 일대 맨홀 관측	14.0km	(10.30**17.00)	
43	22.09.07	서남·탄천 물재생센터	72.4km		
44	22.09.08	서울복합화력발전소	66.5km		
45	22.09.15	서남·탄천 물재생센터	67.5km		
46	22.09.20	마포구 일대	60.7km		
47	22.09.22	중랑구	83.2km	_	
48	22.09.29	서울복합화력발전소	61.8km		
49	22.10.07	탄천 물재생센터	42.8km		
50	22.10.17	서남 물재생센터	82.8km		
51	22.10.24	탄천 물재생센터	37.7km		
52	22.10.26	서남 물재생센터	37.9km		
53	22.11.01	서남 물재생센터	77.9km		
54	22.11.03	서남 물재생센터	51.3km		
Į.	총 54회	_	누적 4	4200.6km	

3) 관측 경로

관측 경로는 서울의 각 구별, 수도권 일대의 기반시설 중 주요 예상 메탄 배출원을 중심으로 계획하였다. 모든 관측의 시작과 종료 지점은 서울시 관악구 소재의 서울대학교(Seoul National University)로 설정하 였고, 매 관측마다 다른 행정구역을 대상으로 관측을 진행하였다. 예상 메탄 배출원은 선행 연구에서 탐지했던 종류의 배출원에 대한 정보와 대 기오염물질 배출시설과 관련된 법적 근거를 바탕으로 노후주거단지, 교 통부문, 대형복합건물, 매립지, 수처리시설, 화석연료 기반시설 총 6가지 로 분류하여 선정하였다.

노후주거단지는 준공 후 30년 이상 경과된 아파트 및 주택단지를 의 미하며, 이런 노후단지는 오래된 가스 관망의 부식에 의한 누출과 합류 식 하수관망 시스템에 의한 잠재적 배출요인을 가지고 있다. 노후주거단 지 분포는 통계지리정보서비스¹⁹⁾에서 동 단위까지 확인할 수 있으며, 각 구별 관측간 가장 높은 노후주거밀도를 포함하는 동을 위주로 관측 경로 에 포함시켰다.

교통부문은 도로상 화석연료를 기반으로 한 교통수단을 대상으로 도 로상 관측을 진행하였다. 국가 온실가스 인벤토리에서는 차량 유종별 배 출계수를 통해 배출량을 산정하고 있으며, 특히 천연가스버스에서 이미 다량의 메탄이 배출되는 것은 선행 연구에서도 밝혀진 바 있다.²⁰⁾ 차량 의 제조사별, 엔진 등 세부적인 차이에 따른 메탄 배출량 산정보다는 메 탄 배출이 식별 가능한지 여부와 배출원의 분포 파악에 대해 집중하였 다.

대형복합건물은 국내 서울 도심 메탄 관측 선행 연구에서 기존에 식

¹⁹⁾ 통계청, 통계지리서비스, https://sgis.kostat.go.kr/view/thematicMap/

²⁰⁾ Pan, D., Tao, L., Sun, K., Golston, L. M., Miller, D. J., Zhu, T., ... & Zon dlo, M. A. (2020). "Methane emissions from natural gas vehicles in Chin a". Nature communications, 11(1), 1–10.

별하였던 코엑스(COEX), 대형마트와 같은 대형건물의 옥상 환기시설을 선정하였다. 대형복합건물의 경우 대부분 대기환경보전법 제 25조에 근 거한 '대기오염물질 배출시설'에 해당하며, 대기오염물질의 온실가스 중 중 하나로 메탄이 포함되어 있다.²¹⁾ 프랑스 파리의 메탄 배출원 탐지와 관련된 연구²²⁾에서도 건물의 보일러 환기시설에서의 메탄 배출이 이루 어지고 있음을 언급하였다.

국가 온실가스 인벤토리 중 폐기물 부문 배출에 해당되는 매립지와 수처리시설은 생물학적 기원의 메탄 발생원으로 이미 알려져 있다. 매립 지의 경우, 현재 가동 중인 매립지인 인천 청라 소재 수도권 매립지와 관리형 매립지인 마포구 소재 난지도(구 난지도 매립지)를 선정하였다. 수처리시설은 서울시의 하수를 처리하는 4개소의 권역별 물재생센터와 생활용수 처리시설인 아리수 정수센터를 중점으로 관측 계획을 수립하였 다. 그 밖에도 관측 진행간 식별하였던 맨홀, 우수관 등 또한 노후 주거 단지와 연계하여 경로에 반영하였다.

화석연료 기반시설은 천연가스, 석유, 석탄 기반의 발전시설을 위주 로 선정하였다. 많은 선행 연구에서 화석연료 기반시설에서의 메탄 배출 에 대한 사례는 국외에서 많이 확인되었다. 서울 내에 위치하고 있는 복 합화력발전소, 열병합발전소, 지역난방시설에 대해서 집중적으로 관측을 계획하였다.

²¹⁾ 법제처, 국가법령정보센터, http://www.law.go.kr/

²²⁾ Defratyka, S. M., Paris, J. D., Yver-Kwok, C., Fernandez, J. M., Korben, P., & Bousquet, P. (2021). "Mapping urban methane sources in Paris, Fr ance". Environmental Science & Technology, 55(13), 8583-8591.

3. 온실가스 모바일 관측 플랫폼

1) 관측 플랫폼 구성

본 연구에서는 높은 시공간 해상도를 갖는 대기 중 메탄 농도 분포 와 시설의 배출 특징을 파악하기 위해 온실가스 모바일 관측 플랫폼을 개발하였다. 온실가스 모바일 관측 플랫폼이란 무공해 전기차를 기반으 로 대기 중 온실가스의 농도, 풍향·풍속과 같은 간단한 기상제원, 위치 데이터 등을 실시간으로 측정할 수 있는 능력을 갖춘 체계이다. 플랫폼 은 크게 전기차, 온실가스 관측장비, 공기흡입관(inlet), 풍향풍속계, 좌표 측정장비(GPS), 실시간 모니터링 장비로 구성된다.

전기차는 기아자동차(KIA)의 전기차 모델인 EV6를 관측 차량으로 사용하였다. 전기차는 연료의 연소 과정이 없기 때문에 차량 자체에서 발생하는 온실가스로 인한 데이터의 오차 발생 위험이 없다. 차량 상단 에는 루프랙을 설치하여 풍향풍속계와 공기흡입관을 고정할 수 있도록 하였다. 차량 적재공간은 관측장비와 휴대용 배터리를 탑재할 수 있도록 틀을 설치하였다.

공기흡입관은 지표면 기준 2.1m 높이의 차량 상단 루프랙에 설치하 여 지표 인근의 공기를 흡입할 수 있도록 하였다. 풍향풍속계는 2022년 8월에 독일의 EOLOS-IND 장비를 탑재하여 운용되었으며, 공기흡입관 과 같은 높이에 설치하여 1초 간격으로 풍향·풍속 데이터를 측정하였다. 풍향풍속계의 측정되는 풍향 데이터의 오차범위는 ±3°이고, 풍속의 경우 는 ±0.5m/s이다. 좌표 측정장비(GPS)는 ASCEN KOREA의 AK770 장 비를 사용하여, 위·경도 좌표데이터를 1초 간격으로 측정하였다.

온실가스(CH4, CO₂), 에탄(C₂H₆)의 농도 데이터와 풍향·풍속 데이터 는 실시간으로 모니터링이 가능하도록 연동 프로그램과 데이터 로거를 사용하였다. 플랫폼의 주요 구성 장비와 모습은 아래 그림 3과 같다.



<그림 3> 온실가스 모바일 관측 플랫폼

2) 온실가스 관측장비

본 연구에서 활용한 장비는 Optical feedback cavity enhanced absorption spectroscopy(OF-CEAS) 원리를 사용한 LICOR사의 LI-7810, LI-7815 모델과 Off-axis integrated-cavity output spectroscopy(OA-ICOS) 원리의 ABB사의 Microportable analyzer인 GLA131-MEA이다.

LI-7810은 대기 중 메탄(CH₄), 이산화탄소(CO₂), 수증기(H₂O)의 각 각의 농도(mixing ratio)를 1초 간격으로 측정한다. 관측 전 약 30분 정 도의 초기 예열 이후 별도 전원 연결 없이 배터리를 통해 약 8시간 정도 운용할 수 있었다. 1.5m 길이의 흡입관(inlet)을 기준으로 약 10초의 지 연시간이 있어 데이터 전처리간 이를 고려하였다. LI-7815는 이산화탄소 와 수증기의 농도를 1초 간격으로 측정할 수 있으며, 다른 세부사항은 LI-7810과 동일하다.

GLA131-MEA는 대기 중 메탄(CH₄), 에탄(C₂H₆), 수증기(H₂O)의 각 각의 농도를 1초 간격으로 측정한다. 초기 예열은 5분 이하로 짧으나, 휴 대용 배터리 지속 시간이 짧아 차량 내부에 설치한 별도 배터리 전원장 치를 활용하여 운용하였다. 1.5m 길이의 흡입관을 기준으로 약 5초의 지 연시간이 있다. 본 장비를 활용하여 에탄 대 메탄 비율을 측정하여 식별 한 메탄 고농도 메탄 발생 요인이 화석연료 기원인지 생물학적 기원의 배출인지 확인하였다. 2022년 9월에 새로 탑재한 장비로 9회의 관측 간 에만 사용되었다.

온실가스 관측장비의 보정은 2주 간격으로 한국 표준 과학원에서 보 증하는 표준 가스를 2개 농도 이상 사용하여 진행하였다. 메탄의 경우 Oppb, 2,030ppb의 표준 가스를 활용하였고, 이산화탄소의 경우 0.019ppm, 422.53ppm, 1081.3ppm의 표준 가스를 활용하였다. 에탄의 경우는 대기 중 배경농도가 매우 작아 0ppb 가스만 사용하여 보정하였다.

장비명	관측 기체	정확도	관측 범위	측정 간격
LI-7810	CH ₄ , CO ₂ , H ₂ O	CII : 0 Carab	\cdot CO ₂ : 0 ~ 10,000ppm	
LI-7815	CO ₂ , H ₂ O	· CH4. 0.0ppb	· CH_4 : 0 ~ 50ppm · H_2O : 0 ~ 60,000ppm	1초
GLA131 -MEA	CH4, C ₂ H ₆	· CH ₄ : 0.9ppb · C ₂ H ₆ : 20ppb	· CH ₄ : 0 ~ 10,000ppm · C ₂ H ₆ : 0 ~ 500ppm	

<표 2> 온실가스 관측장비 제원

측정된 관측 기체의 농도와 GPS 데이터는 Python을 통해 시간 동 기화 등의 데이터 전처리 과정을 거친 후에 QGIS 프로그램을 통해서 위 성지도 상에 관측된 메탄 농도 분포를 맵핑(mapping)하였다. 맵핑한 결 과와 관측간 기록한 사항을 통해 대기 중 고농도 메탄에 대해 관측 일자 별로 정리하였다.

4. 대형 배출원의 배출률 산출

1) 배경농도 및 초과농도 정의

본 연구에서는 관측 지역의 기상조건과 지형 등에 의한 농도의 영향 을 최소화하고자 배경농도와 초과농도의 개념을 사용하였다. 초과농도는 관측농도에서 배경농도를 뺀 값으로 농도 증가분(enhancement)으로도 표현된다. 각 관측지점에서의 초과농도 값을 통하여 도시의 메탄 배출원 을 탐지하고, 배출률을 산정하였다.

모바일 관측간 배경농도를 정의하는 방법은 다양하지만, 그 중에서 관측 시 실시간으로 계속 변화되는 공간을 고려하여 배경농도를 정의한 선행 연구의 정의를 참조하였다. 서울 도심 내에서 다른 공간으로의 이 동 간에 메탄 농도 변동성이 심한 것을 고려하여 Weller et al.(2019)의 연구²³⁾와 Lowry et al.(2019)의 연구²⁴⁾에서는 모바일 관측간 특정 시점 에서의 배경농도를 해당 시점의 전후 2.5분 데이터의 중앙값(median)을 사용하였다. 배경농도는 주위 배출원과 차량에 의한 영향을 최소화하기 위해, 차량이 정차했을 때인 0km/h인 데이터는 제외하고 산정하였다.

메탄 배출원을 탐지하기 위해 초과농도가 배경농도의 10%(약 200~

²³⁾ Weller, Z. D., Yang, D. K., & von Fischer, J. C. (2019). "An open source algorithm to detect natural gas leaks from mobile methane survey data. PLoS One", 14(2), e0212287.

²⁴⁾ Lowry, D., Fisher, R. E., France, J. L., Coleman, M., Lanoisellé, M., Zazz eri, G., ... & Ward, R. S. (2020). "Environmental baseline monitoring for shale gas development in the UK: Identification and geochemical charact erisation of local source emissions of methane to atmosphere". Science of the Total Environment, 708, 134600.

300ppb) 이상에 해당되는 경우를 누출징후으로 활용하였다. 누출징후는 초과농도가 배경농도의 10% 이상이 시작된 지점과 끝난 지점을 기준으 로 버퍼(buffer) 구간을 양끝 지점에서 10초를 부여하여 같은 누출징후으 로 설정하였다. 그림 4는 2022년 9월 20일 마포구 일대 일부 관측 구간 의 메탄 관측농도, 배경농도, 누출징후를 도식한 것이다. 약 5분의 관측 동안 2개의 누출징후를 식별하였다.



Mobile Observation in Mapo-gu, Seoul (20 Sep 2022)

<그림 4> 배경농도 및 누출징후 관측사례

대형 배출원의 배출률 산출을 위한 플룸 고정 관측을 진행할 때는 고농도의 메탄이 지속적으로 관측되기 때문에 배경농도가 매우 높게 산 출된다. 이렇게 되면 초과농도가 낮게 산정되어 고정 관측의 효과가 떨 어지게 된다. 이런 영향을 최소화하기 위해 플룸 고정 관측 간 배경농도 는 고정 관측을 진행한 모든 배경농도 중 최소값을 사용하여 초과농도를 계산하였다. 2) 가우시안 플룸 확산 모델(Gaussian Plume Dispersion Model)

가우시안 플룸 확산 모델은 많은 해외 선행 연구에서 점 배출원 (point source)의 배출률을 산출하기 위해 사용되었다. 모델은 스칼라 값 인 기체의 농도값을 추정하기 위해서 정규분포를 따르는 확산 모형을 가 정하고 지표 근처의 입자들의 반사와 퇴적의 조건을 고려하여 만든 모델 이다.²⁵⁾

모델은 크게 네 가지의 가정을 가진다. 첫 번째는 단위 시간당 오염 물질 배출이 연속적이고 배출량이 시간과 관계없이 일정하다는 것이다. 따라서 모델 적용 간에 정차 관측 시간의 농도 관측값의 평균값을 농도 값을 사용하였다. 두 번째는 오염원에서 수용자까지 오염물질이 이동하 는 동안에는 오염물질이 화학반응 등에 의한 영향으로 제거되지 않고 질 량이 보전된다는 것이다. 세 번째는 오염물질이 이동하는 동안에는 기상 조건이 일정하게 유지된다는 것이다. 네 번째는 풍하측의 어떤 지점이든 수평·수직 방향으로 오염물질의 평균농도 분포는 가우시안 분포 (Gaussian Distribution)를 가진다는 것이다.

Gaussian Plume Dispersion Model은 Turner(1971)에서 사용한 다음 의 식을 사용하였다.²⁶⁾

$$c = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right]$$

²⁵⁾ Caulton, D. R., Li, Q., Bou-Zeid, E., Fitts, J. P., Golston, L. M., Pan, D., ... & Zondlo, M. A. (2018). "Quantifying uncertainties from mobile-labora tory-derived emissions of well pads using inverse Gaussian methods". A tmospheric Chemistry and Physics, 18(20), 15145-15168.

²⁶⁾ Turner, D. B. (2020). "Workbook of atmospheric dispersion estimates: an introduction to dispersion modeling". CRC press: 8-31

 $c = CH_4$ enhancement of plume (g/m^3)

x = Downwind distance (m)

y = Crosswind distance (m)

z = Measurement height above ground (m)

H = Source height (m)

q = Emission rate (g/s)

 σ_{v} = Horizontal dispersion coefficient (m)

 σ_z = Vertical dispersion coefficient (m)

u = Horizontal wind speed (m/s)

c(x, y, z, H)는 (x, y, z)지점에서 측정된 메탄의 초과농도, z는 차량 의 공기흡입관(inlet)의 설치 높이, H는 배출원점의 높이, σ는 플룸의 수 평·수직 방향의 확산 계수, q는 배출원점의 배출률, μ는 관측지점에서의 풍속을 의미한다. 수평·수직 방향의 확산계수 σ는 파스퀼 안정도 (Pasquill-Gifford stability class)²⁷⁾를 통해 값을 추정하고, 풍속은 모바 일 플랫폼에 설치 예정인 풍향풍속계 데이터를 사용한다. 관측을 통한 가우시안 플룸 확산 모델을 적용하는 모식도는 그림 5와 같으며, 파스퀼 안정도 도표는 표 3과 같다.

배출률을 산출을 위해 가장 먼저 대형 배출원의 배출중심을 설정해 야 한다. 이는 수차례 관측을 통해 풍하측 풍향과 플룸 중심을 활용하여 배출중심이 되는 시설을 추정할 수 있다. 추정한 배출중심과 플룸 중심 사이의 거리가 풍하측 거리(x)가 된다. 식별된 배출원점의 시설의 높이 를 공개된 데이터를 통해 확인하였고, 풍속(u)과 농도값(c)은 관측 데이 터의 평균값을 사용하였다. 각 변수를 가우시안 플룸 확산 모델에 적용 하여 역추정하면 배출률(q)을 산출할 수 있다.

²⁷⁾ Hanna, S. R., Briggs, G. A., & Hosker Jr, R. P. (1982). Handbook on at mospheric diffusion (No. DOE/TIC-11223). National Oceanic and Atmosp heric Administration, Oak Ridge, TN (USA). Atmospheric Turbulence an d Diffusion Lab: 27-30



<그림 5> Gaussian Plume Dispersion Model 모식도

구 분	주 간(일사량) 야 간(운량)						
지면풍속 (m/s)	strong	strong moderate slight		> 4/8	< 3/8		
< 2	А	A~B	В	_	_		
2~3	A~B	В	С	Е	F		
3~5	В	B~C	D	D	Е		
5~6 C		C~D	D	D	D		
> 6	С	D	D	D	D		
A: 매우 불	A: 매우 불안정, B: 불안정, C: 약간 불안정, D: 중립, E: 약간 안정, F: 안정						

<표 3> Pasquill-Gifford stability class

3) 대형 배출원 플룸 관측 방법

배출률 산출을 위한 배출원 선정 시 서울 내 식별된 고농도 메탄 배 출원 중에서 차량의 이동과 고정 관측의 가능 여부를 고려하였다. 또한 다른 메탄 배출원의 영향을 최소화하기 위해 차량 이동이 적고 다른 대 형 메탄 배출원이 반경 1km 내 없는 곳을 위주로 정하였다.

선정된 점 배출원에 대해서 관측 당일 풍향과 풍속을 고려하여 풍하 측 도로상에 관측 경로를 설정하였고, 차량을 20km/h 이하의 속도로 이 동하여 플룸을 탐지하였다. 차량 이동 중 식별된 플룸의 가장 고농도인 중심선(Centerline of plume)에서 5분 이상 정차하여 대기 중 메탄의 농 도와 풍향·풍속 데이터를 측정하였다. 플룸의 중심선이 풍향의 변화로 인하여 변동될 수 있으나 추후 데이터 분석간 풍향의 오차범위 내 농도 값만을 사용하기 때문에 차량의 위치를 조정하지 않았다.

이번 연구에서는 수 개의 배출원에 대해서 플룸 탐지 및 배출률 산 출을 시도하였지만, 고정 관측이 어려운 도로 여건과 낮은 풍속 등의 이 유로 서울 내 1개소의 물재생센터에 대한 플룸 탐지 및 배출률 산출 과 정만을 포함하였다.

4) 연간 배출률 추정 방법

모델을 통해 산출한 배출률의 경우 1초당 질량값으로 인벤토리에서 연간 총량으로 산정하고 있는 데이터와는 비교가 제한된다. 이를 비교하 기 위해서는 배출원점이 어떠한 패턴으로 메탄을 배출하는지 배출원점의 특성을 확인한 후 연간 패턴을 적용하여 배출률을 산출해야 한다.

본 연구의 배출률 산출 대상인 서울 서남물재생센터의 경우 24시간 365일 가동되고 있다. 메탄 배출 패턴에 대한 정보는 접근이 제한되어 국가 온실가스 인벤토리에서 하수처리로 인한 메탄 배출량을 산출하는 입력 변수인 하수 유입량을 프록시(proxy)로 사용하였다. 관측 시간의 평균 하수 유입량과 연간 하수 유입량 데이터를 확인하여 연간 배출률으 로 확대하였다.

5) 불확도 산출

현재까지 메탄 배출률 산출을 위한 가우시안 플룸 분산 모델의 경우 불확실성 평가에 대한 세부적인 과정을 대부분의 선행 연구에서 언급하 지 않았으며, 불확도 산출에 대한 각기 다른 새로운 방안 적용하였다.²⁸⁾ 본 연구에서는 가우시안 플룸 모델의 입력변수인 배출원점의 높이, 풍속 과 풍향 데이터, 배출원점과 수용자와의 거리(x)의 오차를 바탕으로 몬 테카를로 방법(Monte Carlo probabilistic uncertainty method)을 통해 95% 신뢰구간을 가진 배출률을 산출하였다. 언급한 4가지 변수의 오차 만을 고려한 이유는 배출률 산출에 있어 가장 큰 영향을 끼치는 요소이 기 때문이다.²⁹⁾

각 변수의 오차(2ơ)는 Lan et al.(2015)의 연구³⁰⁾를 참고하였다. 배출 원의 높이의 경우 정확히 어떤 부분이 메탄 배출요소인지 특정하기 어렵 기 때문에 최대 높이의 ±30%의 오차를 부여하였다. 풍속, 풍향은 관측 데이터의 대략적인 분포를 고려하였을 때 풍속의 경우에는 ±20%, 풍향 의 경우는 ±10°의 오차를 가정하였다. 배출원점과 수용자와의 거리(x)의

²⁸⁾ Caulton, D. R., Li, Q., Bou-Zeid, E., Fitts, J. P., Golston, L. M., Pan, D., ... & Zondlo, M. A. (2018). "Quantifying uncertainties from mobile-labora tory-derived emissions of well pads using inverse Gaussian methods". A tmospheric Chemistry and Physics, 18(20), 15145-15168.

Neumann, G., & Halbritter, G. (1980). "Sensitivity analysis of the Gaussi an plume model". In Studies in Environmental Science (Vol. 8, pp. 57–6 2). Elsevier.

³⁰⁾ Lan, X., Talbot, R., Laine, P., & Torres, A. (2015). "Characterizing fugiti ve methane emissions in the Barnett Shale area using a mobile laborator y". Environmental Science & Technology, 49(13), 8139–8146.

경우에도 건물의 크기를 고려하여 ±10%의 오차를 가정하였다. 위 모든 4가지 변수 모두 정규분포를 따르는 데이터로 표현되었다.

이후 모델에 적용하기 위해 각 변수들은 모델에 대한 입력 세트(set of inputs)로서 무작위 샘플링을 통해 10000번의 몬테 카를로 런을 실행 하였다. 이렇게 산출된 배출률은 신뢰구간 95%의 정규분포를 따르는 값 의 범위로 표현할 수 있게 된다.

Ⅲ. 연구 결과

1. 서울 도심 대기 중 메탄 농도 분포

그림 6은 약 10개월간 진행한 54번의 모바일 관측을 통해 수집한 서 울 내 25개 자치구 및 수도권 일대의 대기 중 메탄 농도 분포를 나타낸 것이다. 관측기간 동안 대기 중 메탄은 약 2,000~2,300ppb의 배경농도 분포를 보였으며, 최대 46,500ppb의 초과농도를 측정하였다. 4,206km 관 측거리에서 총 1,707개의 누출징후를 식별하였으며, 이를 바탕으로 예상 메탄 배출원으로 선정하였던 하수처리시설, 매립지, LNG 연료 기반 복합 화력발전소, 지역난방공사 등에서의 메탄 배출을 확인할 수 있었다. 각 배출원들을 국가 온실가스 인벤토리에서 분류하는 기준에 맞추어 생물학 적 기원의 폐기물 부문과 화석연료 기원의 에너지 부문 배출원으로 구분 하였으며, 부문별 배출원 탐지 결과는 표 4와 표 5에 정리하였다. 같은 배출원이라도 관측한 도로와 배출원 사이의 거리, 풍향·풍속과 같은 기상 조건의 영향을 받아 관측되는 농도 분포(최대 초과농도 등)가 다르게 나 타났다.

서울 내 자치구별로 기반시설 분포에 따라서 메탄 배출 특징 차이가 있었다. 노후주택단지가 밀집되어있는 관악구와 금천구 일대에서는 맨홀 과 같은 하수관망으로 추정되는 고농도 메탄 배출이 다수 식별되었다. 인 구의 이동이 많고 교통 운행량이 많은 강남구에서는 천연가스버스에 의 한 메탄 배출이 도로상 식별된 누출징후의 대부분을 차지하였다. 마포구 는 발전소, 매립지, 지역난방공사와 같은 대형 메탄 배출 기반시설이 밀 집되어있어 배출원 인근에서 고농도의 메탄 배출이 다수 식별되었다.



<그림 6> 서울 도심 대기 중 메탄 농도 분포 관측결과. 지도상 파란색 과 보라색으로 표시된 시설은 관측을 통해 확인된 각각 폐기물, 에너지 부문의 대표적인 메탄 배출원임. 배경농도의 10% 이상의 메탄 초과농도 를 나타내는 노란색·주황색·빨간색 지점은 누출징후가 식별된 장소임.

4/ 페시콜 ㅜ님 베콜먼 급시결~	<표	4>	폐기물	부문	배출원	탐지결고
--------------------	----	----	-----	----	-----	------

구 분	배출원	관측일시	경도 (WGS84)	위도 (WGS84)	최대 초과농도	C ₂ H ₆ /CH ₄ 비율(%)	표본수	r-value	p-value		
수처리 시설	서남물재생센터	22.09.29	126.827977	37.576944	12,917ppb	0.39(0.06)	70	0.61	< 0.05		
		22.11.03	126.8332939	37.5762668	46,500ppb	0.34(0.02)	84	0.85	< 0.05		
	난지물재생센터	22.04.13	126.848363	37.588161	9,967ppb	_	-	_	_		
	중랑물재생센터	22.03.02	127.060427	37.556645	4,212ppb	_	-	_	_		
	탄천물재생센터	22.01.20	127.0860554	37.4961748	6,752ppb	_	_	_	_		
		22.10.07	127.0860713	37.4957509	3,920ppb	0.76(0.39)	131	0.17	0.051		
매립지	난지도 매립지	22.09.15	126.875756	37.573927	7,191ppb	_	-	-	-		
	수도권 매립지	22.05.18	126.622637	37.574061	6,342ppb	_	-	_	-		
하수관망	은평구 맨홀	22.04.13	126.927907	37.624028	3,060ppb	_	-	_	_		
	서대문구 맨홀	22.04.20	126.950143	37.594513	3,588ppb	_	-	_	_		
(맨홀 등)	고아그 매호	22.00.06	126.9489974	37.4803761	3,912ppb	_	-	_	_		
	쏸악ᅷ 맨올 	光악구 맨홀 	관악구 맨홀	22.09.00	126.9500502	37.48085755	3,128ppb	_	-	_	-

* C₂H₆/CH₄ 비율은 에탄 관측장비 도입(22.09.20) 이후 결과만 반영

<표 5> 에너시 무둔 배술원 탐시 설	크과	
-----------------------	----	--

구 분	배출원	관측일시	경도 (WGS84)	위도 (WGS84)	최대 초과농도	C ₂ H ₆ /CH ₄ 비율(%)	표본 수	r-value	p-value
천연가스 기반 발전시설	서울복합화력발전소	22.04.01	126.922765	37.544337	15,464ppb	-	-	-	-
		22.09.29	126.922293	37.544145	4,740ppb	2.66(0.95)	28	0.49	< 0.05
	지역난방공사(난지)	22.02.03	126.881042	37.570032	2,702ppb	-	_	-	_
	지역난방공사(동부)	22.06.08	127.060807	37.635662	8,248ppb	-	-	-	-
	LNG터미널	22.05.20	126.605335	37.354777	2,839ppb	-	-	-	-
산업단지	시흥 제지공장	22.05.20	126.717502	37.328747	4,806ppb	-	-	-	-
가스관망 누출	영등포구 일대	22.04.14	126.8899936	37.5467064	12,531ppb	-	-	-	-
	마포구 일대	22.09.29	126.91079	37.544232	3,540ppb	3.06(1.21)	99	0/25	< 0.05
	강서구 일대	22.11.03	126.841542	37.570032	5,070ppb	5.27(0.45)	36	0.90	< 0.05
대형건물 환기시설	COEX	22.01.13	127.058077	37.511485	3,637ppb	-	-	_	_
	홈플러스	22.03.17	126.896122	37.517942	5,789ppb	-4.63(1.11)	48	-0.53	< 0.05
교통 부문	천연가스버스	22.09.22	127.095925	37.614412	8,584ppb	4.98(0.27)	33	0.96	< 0.05
		22.10.07	127.087872	37.490718	12,351ppb	3.44(0.47)	84	0.63	< 0.05
	미세먼지제거차량	22.02.03	126.836212	37.571128	2,756ppb	_	_	_	-
	경유차량	22.11.01	126.823653	37.573182	2,900ppb	9.67(0.97)	47	0.83	< 0.05

*C₂H₆/CH₄ 비율은 에탄 관측장비 도입(22.09.20) 이후 결과만 반영

2. 폐기물 부문 메탄 배출원

1) 수처리시설

일반적으로 물의 재이용은 물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률에 따라 하수처리시설, 폐수처리시설, 빗물이용시설 등으로 나뉘게 된다.³¹⁾ 서울 내에는 공공폐수처리시설은 없으며, 수돗물 사용을 위한 정수처리과 정을 담당하는 아리수 정수센터와 하수처리장인 물재생센터, 빗물이용시 설 등이 있다. 아리수 정수센터와 빗물이용시설에서는 수차례 관측 간 고 농도 메탄이 식별되지 않았다. 아리수 정수센터와 빗물이용시설의 처리과 정에는 메탄을 주로 발생시킨다고 알려져있는 슬러지의 소화과정이 없으 며, 하수가 아닌 한강 물과 빗물을 처리하는 과정이기 때문에 메탄 발생 요소가 적다. 이에 반해, 하수를 처리하는 물재생센터의 경우는 4개소 모 두 인근 도로를 관측할 때 고농도 메탄이 식별되었으며, 각각의 사례는 그림 7과 같다.

물재생센터에서는 물리화학적, 생물학적 처리 등을 통해 하수를 처 리하며, 이 중 특히 혐기성 소화 과정 중에 다량의 메탄이 발생하게 된 다.³²⁾ 하지만, 처리과정 중 모든 메탄이 회수되지 못하고 일부가 대기 중 으로 탈루가 되고 있으며, 바이오가스 생산 및 운송간 탈루의 발생 가능 성도 존재하고 있다. 4개소 모두 소화조, 가스 보관소가 위치하고 있는 지점 인근에서 가장 높은 메탄 농도가 탐지되었다. 관측 최대 초과농도 는 수처리시설 별로 4,212~46,500ppb의 분포를 보였다.

³¹⁾ 법제처, 국가법령정보센터, http://www.law.go.kr/

³²⁾ Henze, M., & Harremoës, P. (1983). "Anaerobic treatment of wastewater in fixed film reactors - a literature review". Water science and technolog y, 15(8-9), 1-101.



<그림 7> 서울시 물재생센터 4개소 일대 고농도 메탄 분포

2) 매립지

2021년 광역지자체 기준 지역별 온실가스 인벤토리에 따르면, 서울시 2019년 메탄 배출 총량의 50% 이상이 관리형 매립지인 난지도 매립지에 서 1,473.51Gg CO₂eq 발생하고 있다.³³⁾ 인천 청라에 위치한 수도권 매립 지 또한 인천광역시 메탄 배출량에서 가장 많은 부분을 차지하고 있다. 매립지는 폐기물의 유기물질이 혐기성 상태에서 단계적으로 분해되는 과 정에서 메탄을 발생하게 된다. 발생하는 메탄의 일부는 회수가 되지만, 그렇지 못한 경우에는 대기 중으로 배출되게 된다.

 ³³⁾ 온실가스종합정보센터, 「광역지자체 기준 지역별 온실가스 인벤토리(1990-2019) 공표」, 2021



<그림 8> 수도권 매립지 일대 고농도 메탄 분포

그림 8은 2022년 5월 18일에 관측한 수도권 매립지 일대의 메탄 초 과농도 분포이다. 제 1매립지의 경우는 매립이 완료되어 골프장으로 활용 되고 있고, 제 2매립지는 매립이 종료되어 제 3매립지에 폐기물을 매립 중이다. 제 3매립지의 경우는 접근이 제한되어, 제 2매립지와 침출수 처 리장 일대에 대해 집중적으로 관측하였다. 고농도 메탄은 주로 제 2매립 지 북쪽 도로와 침출수 처리장 일대에서 식별이 되었으며, 관측 최대 초 과농도는 6,342ppb였다.

3. 에너지 부문 메탄 배출원

1) 천연가스 기반 발전시설

도시의 천연가스 기반 발전시설은 도시가스사업법 시행령³⁴⁾에 따라 발 전용, 산업용, 열병합용, 열전용 목적으로 복합화력발전소, 열병합발전소, 지역난방시설 등으로 운영되고 있다. 인간 활동에 있어 필수적인 전력과 난방을 제공하는 이러한 시설들은 서울 내에 다수 위치하며, 이에 따른 메 탄 배출 가능성이 존재하고 있다.



<그림 9> 서울복합화력발전소 일대 고농도 메탄 분포

그림 9는 서울의 370만 가구의 절반가량이 사용할 수 있는 규모의 800MW의 용량을 생산하는 액화천연가스(LNG) 연료를 기반으로 발전하

³⁴⁾ 법제처, 국가법령정보센터, http://www.law.go.kr/

는 서울복합화력발전소³⁵⁾ 일대의 고농도 메탄 분포를 식별한 사례이다. 발전시설은 모두 지하화되어 있으며, 고농도가 식별된 해당 위치는 LNG 연료가 유입되어 가스터빈이 운용되는 지점과 가깝다. 5회 이상의 관측 간 동일한 위치에서 고농도 메탄이 탐지되었으며, 발전소로 유입되는 LNG 수송관에서의 누출 또는 발전소 환기시설을 통해 배출되는 천연가 스 기원의 메탄으로 추정된다. 관측 최대 초과농도는 15,464ppb로 탐지되 었다.

서울 인접 도시에서 식별한 배출원으로는 인천 송도 LNG 터미널과 경기 시흥의 제지공장이 있었다. LNG 터미널의 경우에는 해외로부터 배 를 통해 운송되는 천연가스를 항구에서 최초로 저장 및 전국으로 운송하 기 시작하는 시설로 국가 온실가스 인벤토리에서도 이미 탈루 부문에서 배출량을 산정하고 있다. 하지만 실제로 탈루가 어디서 발생하는지에 대 한 정보는 확인하기 어려워 탈루원을 확인하고자 관측 대상에 추가로 반 영하였다. 관측 결과, 접근 가능한 도로가 한정되었지만 북쪽 도로상에서 메탄 누출징후를 일부 식별하였다. 관측 최대 초과농도는 2,839ppb로 다 른 시설에 비해 높지 않은 수치였다. 경기 시흥 소재 제지공장에서도 고 농도의 메탄 배출을 식별하였다. 제지공장은 종이를 건조시키는 과정 중 에 LNG를 연료로 하여 점화하는 과정이 있는데, 이 때 대기 중으로 많 은 양의 메탄이 탈루되는 것으로 확인되었다. 제지공장 인근의 관측 최대 초과농도는 4,806ppb였으며 이는 대상지에 대한 2회 반복 관측간 모두 탈루가 확인되었다.

³⁵⁾ 한국중부발전, 서울발전본부, https://www.komipo.co.kr/

2) 수송 부문

국가 온실가스 인벤토리 수송부문 배출량 산정기준에서는 화석연료 기반의 교통수단일 경우 메탄 배출계수를 부여하여 배출량을 산정하였 다.³⁶⁾ 일반 휘발유 및 경유차량에서는 일관적인 특징의 고농도 메탄이 식별되지 않았다. 하지만 압축천연가스(CNG)를 연료로 하는 천연가스버 스와 공공기관에서 운영하는 미세먼지 제거차량, 노후 경유차에서는 고농 도 메탄이 식별되었다. 아래 그림 10은 버스를 앞에 두고 주행하며 관측 한 고농도 메탄 모니터링 장면이다. 약 3,100ppb의 메탄 농도 수치를 보 이며 관측 거리에 따라 최대 20,000ppb의 메탄 농도 또한 관측되었다.



<그림 10> 천연가스버스 고농도 메탄 관측 모습

는 2,088대로 전체 시내버스의 대부분인 90.12%를 차지하고 있다.³⁷⁾ 이는 천연가스버스의 메탄 배출이 적지 않으며 이에 대한 관리의 필요가 있음 을 의미한다.

3) 대형건물 환기시설

대형건물은 LNG를 연료로 하는 난방 시스템, 도시가스를 연료로 하는 조리 시스템, 화장실 환기시설 등의 요인에 의하여 환기시설을 통해 메탄 배출 가능성을 지니고 있다. 서울 내의 가장 큰 복합 대형건물인 코엑스(COEX) 옥상주차장 환기구, 대형마트인 홈플러스 옥상주차장 환 기구에서 지속적인 메탄 배출이 이루어지고 있다. 그림 11과 같이 각 건물은 다른 형태의 환기 시스템을 갖추고 있으며 24시간 가동되고 있다. 관측간 최대 초과농도는 3,664~5,789ppb의 분포를 보였다.



<그림 11> 대형건물 환기시설 일대 고농도 메탄 분포

³⁷⁾ 국가통계포털, https://kosis.kr/

4. 에탄 대 메탄 비율 분석

화석연료에 포함된 에탄은 생산 및 운송, 사용과정에서 배출되지만, 생물학적 기원의 메탄 배출원은 에탄을 거의 포함하지 않는 특징이 있 다.³⁸⁾ 이를 통해 대기 중 에탄 대 메탄의 비율을 분석하여 메탄 배출원 이 화석연료로부터 기원되었는지 여부를 알 수 있다.³⁹⁾ 에탄 대 메탄 비 율은 GLA131-MEA에 의해 관측된 데이터를 바탕으로 누출징후가 식별 된 곳을 위주로 계산하였다. Hopkins et al.(2016)⁴⁰⁾에서 사용한 방법과 같이 관측 간 식별된 누출징후 데이터의 에탄 초과농도 대 메탄 초과농 도의 선형 회귀를 통해 얻어진 기울기 값을 계산하여 장비의 오차를 최 소화하였다.

그림 12는 2022년 9월 20일 모바일 관측간 모든 지점에 대한 에탄 대 메탄 비율 분석의 예시를 나타낸 그림이다. 관측한 모든 에탄과 메탄 농도 데이터를 산점도로 나타내었고, 그 중 누출징후에 해당하는 데이터 를 초록색 원으로 표시하였다. 누출징후 데이터 중 에탄 초과농도가 높 거나 낮은 지점에 대해서는 데이터의 위치를 확인하여 배출요인을 분석 하였고, 그 중 배출원점을 알고 있는 지점은 점을 찍어 별도로 표시하였 다. 파란색 점은 화석연료 기원의 서울복합화력발전소 일대 관측값으로 에탄 대 메탄 비율이 3.16% 값을 보였고, 빨간색 점은 생물학적 기원의 서남물재생센터 일대의 관측값으로 0.22%의 비율을 보였다. 이 밖에도

- 38) Ramsden, A. E., Ganesan, A. L., Western, L. M., Rigby, M., Manning, A. J., Foulds, A., ... & O'Doherty, S. (2022). "Quantifying fossil fuel methan e emissions using observations of atmospheric ethane and an uncertain e mission ratio". Atmospheric Chemistry and Physics, 22(6), 3911–3929.
- 39) Plant, G., Kort, E. A., Floerchinger, C., Gvakharia, A., Vimont, I., & Swe eney, C. (2019). "Large fugitive methane emissions from urban centers al ong the US East Coast". Geophysical research letters, 46(14), 8500–8507.
- 40) Hopkins, F. M., Kort, E. A., Bush, S. E., Ehleringer, J. R., Lai, C. T., Bl ake, D. R., & Randerson, J. T. (2016). "Spatial patterns and source attribution of urban methane in the Los Angeles Basin". Journal of Geophysic al Research: Atmospheres, 121(5), 2490–2507.

추정할 수 있는 다른 배출원은 표 6에 결과를 반영하였다.

표 6은 에탄 측정장비 GLA131-MEA를 2022년 9월 20일 도입이후 관측한 배출원에 대한 에탄 대 메탄 비율을 분석한 결과이다. 생물학적 기원 배출원의 에탄 대 메탄 비율은 탄천물재생센터에서 최대 0.76%를 나타내었으며, 화석연료 기원의 경우 가스관망 누출로 추정되는 지점에 서 최대 5.27%의 비율을 보였다. 화석연료 기원의 배출원이 생물학적 기 원의 배출원보다 에탄 대 메탄 비율이 높은 경향을 가지고 있었다. 2022 년 9월 20일 대형건물 환기구에서 관측된 메탄 배출의 경우 국가 온실가 스 인벤토리에서 에너지 부문의 천연가스 사용에 따른 건물 환기로 인해 배출이 발생된다고 했지만, 에탄 대 메탄 비율 분석 결과 생물학적 기원 에 가까운 수치를 보여주었다. 이는 천연가스 사용뿐만 아니라 건물 내 생물학적 기원의 다른 메탄 배출원에 의한 영향이 더 지배적일 수 있다 는 가능성을 보여주었다. 에탄 대 메탄 비율이 음수값이 도출된 이유는 환기구 내 공기 속 에탄 농도가 대기 중 에탄 농도보다 낮기 때문이다.

구 분	배출원	관측일시	C ₂ H ₆ /CH ₄ 비율(%)	표본 수	r-value	p-value
생물학적 기원		22.09.29	0.39(0.06)	70	0.61	< 0.05
	서남물재생센터	22.11.03	0.34(0.02)	84	0.85	< 0.05
		22.11.03	0.44(0.02)	55	0.95	< 0.05
	탄천물재생센터	22.10.07	0.76(0.39)	131	0.17	0.051
	대형건물 환기구	22.09.20	-4.63(1.11)	48	-0.53	< 0.05
화석연료 기원	거이보하치러바거ㅅ	22.09.20	3.16(0.71)	127	0.58	< 0.05
	시굴속업와덕월신도	22.09.29	2.66(0.95)	28	0.49	< 0.05
	친여기ㅅ비ㅅ	22.09.22	4.98(0.27)	33	0.96	< 0.05
	전연가스머스	22.10.07	3.44(0.47)	84	0.63	< 0.05
	가스관망 누출	22.09.20	4.81(1.34)	50	0.46	< 0.05
		22.09.20	1.71(0.44)	101	0.37	< 0.05
		22.09.29	3.06(1.21)	99	0.25	< 0.05
		22.11.03	5.27(0.45)	36	0.90	< 0.05

<표 6> 기원별 메탄 배출원의 에탄 대 메탄 비율 분석결과



<그림 12> 배출 기원별 에탄 대 메탄 비율 분석 예시. 2022년 9월 20일 진행한 모바일 관측을 통해 얻은 모든 지점의 메탄과 에탄 농도의 관계 를 나타낸 그래프임. 초록색 원은 누출징후지점의 관측결과이며, 빨간색 점과 파란색 점은 각각 이미 알고 있는 생물학적, 화석연료 기원의 배출 원 일대의 누출징후지점 관측결과임.

Mobile Observation, 20 Sep 2022

5. 서남물재생센터 연간 배출률 산정 예시

서남물재생센터의 풍하측 도로상 메탄 플룸 관측은 4번(9월 15일, 10 월 26일, 11월 1일, 11월 3일)에 걸쳐 진행되었다. 관측을 통해 식별한 플룸과 플룸 중심에서 측정한 풍향 데이터를 기반으로 물재생센터의 배 출중심(Effective Release Location)을 추정하였다. 서남물재생센터의 배 출중심은 슬러지 처리시설의 하나인 슬러지 농축동이었다.

그림 13은 2022년 11월 3일에 관측한 서남물재생센터의 풍하측에서 식별한 플룸 농도를 맵핑한 것이다. 물재생센터의 동측 도로에서 2개의 플룸을 식별하였고 각각에 대한 배출률을 산정하였다. 각 플룸의 중심에 5분 이상 정차하여 관측한 데이터는 표 7과 같으며, 해당 변수를 모델에 입력하여 연간 배출률을 산정하였다.



<그림 13> 서남물재생센터 풍하측 메탄 플룸 탐지

<표 7> 서남물재생센터 배출률 산출 변수

플룸 구분	측정 장비	데이터 종류	데이터 수치	불확도(2σ)
	LI-7810	CH ₄ enhancement	26,076 [ppb]	-
		평균 풍향	283.26 [°]	±10°
북쪽 플룸	EOLOS-IND	평균 풍속	1.23 [m/s]	±20%
	Google Map	배출원과의 거리	177 [m]	±10%
	시설 문의	배출원 높이	6 [m]	±30%
	LI-7810	CH ₄ enhancement	4,248 [ppb]	_
	EOLOS-IND	평균 풍향	270.36 [°]	±10°
남쪽 플룸		평균 풍속	1.98 [m/s]	±20%
	Google Map	배출원과의 거리	146 [m]	±10%
	시설 문의	배출원 높이	6 [m]	±30%

산출한 서남물재생센터의 추정 연간 배출률은 49.95±5.92 Gg CO₂ eq/year로 2019년 기준 국가 온실가스 인벤토리에서 서남·중랑·탄천물재 생센터 3개소를 포함하는 서울의 하수처리부문 메탄 배출량인 72.17 Gg CO₂ eq의 약 70%에 해당하는 결과였다.⁴¹⁾

⁴¹⁾ 온실가스종합정보센터, 「광역지자체 기준 지역별 온실가스 인벤토리(1990-2019) 공표」, 2021

Ⅳ. 결 론

본 연구는 국내 최초로 온실가스 모바일 관측 플랫폼을 적용하여 서 울의 대기 중 메탄 농도 분포와 배출 특징을 파악하였다. 이를 통해 서 울 전역에 대한 시공간적 고해상도의 농도 데이터를 수집하여 기존 원격 탐사 방법(e.g., 위성, 항공 관측 등)으로는 제한되는 세부적인 관측을 통 해 개별 배출원과 그 기원을 추정하고 배출 정량화를 시도하였다.

총 4,206km의 모바일 관측결과 누출징후는 1,707개가 탐지되었으며, 에탄 대 메탄 비율 분석 결과 생물학적 기원(-4.63~0.76%)의 비율이 화석연료 기원(1.71~5.27%)의 배출원보다 낮은 특징을 보였다. 식별된 도시의 주요 배출원들은 대부분 국가 온실가스 인벤토리에서도 산정하고 있는 폐기물·에너지 부문의 배출원이었다. 폐기물 부문 주요 배출원은 난지도 매립지, 수도권 매립지와 4개소의 수처리시설이 있었으며, 기존에 보고되지 않았던 맨홀을 포함한 하수관망에서의 메탄 배출 또한 탐지되 었다. 에너지 부문 주요 배출원은 복합화력발전소, 지역난방공사, 천연가 스 관망 누출, 천연가스버스 등이 있었다.⁴²⁾

서남물재생센터의 모델 기반 연간 배출률 산정 결과, 연간 배출률을 49.95±5.92 Gg CO₂ eq/year로 추정하였다. 이 수치는 2019년 기준 국가 온실가스 인벤토리에서 서남·중랑·탄천물재생센터 3개소를 포함하는 서 울의 하수처리부문 메탄 배출량인 72.17 Gg CO₂ eq의 약 70%에 해당된 다. 이는 인벤토리 기반 배출량이 실제 배출량을 보다 낮게 추정하고 있 을 수 있으며, 도시의 주요 메탄 배출시설에 대하여 메탄 배출 및 탈루 관리를 위한 정밀한 온실가스 관측이 필요함을 의미한다.

서울을 대상으로 진행한 온실가스 모바일 관측은 인력, 비용, 시간이 적게 들고 짧은 기간에 넓은 지역에 대한 측정의 가능성 또한 확인하였

⁴²⁾ 온실가스종합정보센터, 「2021년 국가 온실가스 인벤토리 보고서(NIR)」, 2021

다. 에탄 측정 장비 도입으로 배출원의 기원에 대한 확인이 가능해졌으 며, 더 많은 데이터를 구축하여 천연가스 관망 및 하수관망 탈루의 정량 화 연구도 가능할 것으로 보인다. 이제는 모바일 관측을 통해 다른 도시 에 대하여 메탄 배출 특징 분석을 확대할 수 있으며, 이는 부문별·지역 별 메탄 배출원에 대한 정확한 정보를 줄 수 있을 것이라 기대한다.

■ 참고문헌

국립기상과학원, 「2021년 지구대기감시보고서」, 2021 온실가스종합정보센터, 「2021년 국가 온실가스 인벤토리 보고서(NIR)」, 2021 온실가스종합정보센터, 「광역지자체 기준 지역별 온실가스 인벤토리(1990-201 9) 공표」, 2021

- Hanna, S. R., Briggs, G. A., & Hosker Jr, R. P. (1982). Handbook on atmosp heric diffusion (No. DOE/TIC-11223). National Oceanic and Atmospheri c Administration, Oak Ridge, TN (USA). Atmospheric Turbulence and Diffusion Lab: 27–30
- Turner, D. B. (2020). "Workbook of atmospheric dispersion estimates: an intr oduction to dispersion modeling". CRC press: 8–31
- Bamberger, I., Stieger, J., Buchmann, N., & Eugster, W. (2014). "Spatial vari ability of methane: Attributing atmospheric concentrations to emission s". Environmental Pollution, 190: 65–74.
- Brantley, H. L., Thoma, E. D., Squier, W. C., Guven, B. B., & Lyon, D. (201
 4). "Assessment of methane emissions from oil and gas production pad s using mobile measurements". Environmental science & technology, 4 8(24): 14508–14515.
- Caulton, D. R., Li, Q., Bou-Zeid, E., Fitts, J. P., Golston, L. M., Pan, D., ... & Zondlo, M. A. (2018). "Quantifying uncertainties from mobile-laborator y-derived emissions of well pads using inverse Gaussian methods". At mospheric Chemistry and Physics, 18(20), 15145–15168.
- Chang, D. Y., Jeong, S., Oh, E., Sim, S., Kim, Y., Park, C., ... & Choi, J. S. (2022). "Finding the Missing Link in Methane Emission Inventories Us ing Aircraft and Mobile Observations". Asia–Pacific Journal of Atmosp heric Sciences, 58(2): 293–297.

Defratyka, S. M., Paris, J. D., Yver-Kwok, C., Fernandez, J. M., Korben, P.,

& Bousquet, P. (2021). "Mapping urban methane sources in Paris, Fra nce". Environmental Science & Technology, 55(13): 8583-8591.

- Farrell, P., Culling, D., & Leifer, I. (2013). "Transcontinental methane measur ements: Part 1. A mobile surface platform for source investigations". Atmospheric Environment, 74: 422–431.
- Henze, M., & Harremoes, P. (1983). "Anaerobic treatment of wastewater in fi xed film reactors–a literature review". Water science and technol ogy, 15(8–9), 1–101.
- Hopkins, F. M., Kort, E. A., Bush, S. E., Ehleringer, J. R., Lai, C. T., Blake, D. R., & Randerson, J. T. (2016). "Spatial patterns and source attributi on of urban methane in the Los Angeles Basin". Journal of Geophysic al Research: Atmospheres, 121(5), 2490–2507.
- Hsu, Y. K., VanCuren, T., Park, S., Jakober, C., Herner, J., FitzGibbon, M., ...& Parrish, D. D. (2010). "Methane emissions inventory verification in s outhern California". Atmospheric Environment, 44(1), 1–7.
- Lan, X., Talbot, R., Laine, P., & Torres, A. (2015). "Characterizing fugitive methane emissions in the Barnett Shale area using a mobile laborator y". Environmental Science & Technology, 49(13): 8139–8146.
- Lowry, D., Fisher, R. E., France, J. L., Coleman, M., Lanoiselle, M., Zazzeri, G., ... & Ward, R. S. (2020). "Environmental baseline monitoring for sh ale gas development in the UK: Identification and geochemical characte risation of local source emissions of methane to atmosphere". Science of the Total Environment, 708, 134600.
- Maazallahi, H., Fernandez, J. M., Menoud, M., Zavala-Araiza, D., Weller, Z. D., Schwietzke, S., ... & Rockmann, T. (2020). "Methane mapping, emis sion quantification, and attribution in two European cities: Utrecht (N L) and Hamburg (DE)". Atmospheric Chemistry and Physics, 20(23), 1 4717–14740.

- Neumann, G., & Halbritter, G. (1980). "Sensitivity analysis of the Gaussian pl ume model". In Studies in Environmental Science (Vol. 8, pp. 57–62). Elsevier.
- Phillips, N. G., Ackley, R., Crosson, E. R., Down, A., Hutyra, L. R., Brondfiel d, M., ... & Jackson, R. B. (2013). "Mapping urban pipeline leaks: Meth ane leaks across Boston". Environmental pollution, 173, 1–4.
- Park, H., Jeong, S., Park, H., Kim, Y., Park, C., Sim, S., ... & Choi, J. (2022)."Unexpected Urban Methane Hotspots Captured from Aircraft Observat ions". ACS Earth and Space Chemistry, 6(3): 755–765.
- Pan, D., Tao, L., Sun, K., Golston, L. M., Miller, D. J., Zhu, T., ... & Zondlo, M. A. (2020). "Methane emissions from natural gas vehicles in China". Nature communications, 11(1), 1–10.
- Plant, G., Kort, E. A., Floerchinger, C., Gvakharia, A., Vimont, I., & Sweene y, C. (2019). "Large fugitive methane emissions from urban centers alo ng the US East Coast". Geophysical research letters, 46(14), 8500–8507.
- Ramsden, A. E., Ganesan, A. L., Western, L. M., Rigby, M., Manning, A. J., Foulds, A., ... & O'Doherty, S. (2022). "Quantifying fossil fuel methane emissions using observations of atmospheric ethane and an uncertain e mission ratio". Atmospheric Chemistry and Physics, 22(6), 3911–3929.
- Saunois, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jackso n, R. B., ... & Zhuang, Q. (2020). "The global methane budget 2000 - 2 017". Earth system science data, 12(3), 1561–1623.
- Shindell, D. T., Faluvegi, G., Koch, D. M., Schmidt, G. A., Unger, N., & Bau er, S. E. (2009). "Improved attribution of climate forcing to emission"s. Science, 326(5953), 716–718.
- Shorter, J. H., Mcmanus, J. B., Kolb, C. E., Allwine, E. J., Lamb, B. K., Mos her, B. W., ... & Karbach, H. J. (1996). "Methane emission measureme nts in urban areas in eastern Germany". Journal of Atmospheric Chem

istry, 24(2): 121–140.

- Staniaszek, Z., Griffiths, P. T., Folberth, G. A., O'Connor, F. M., Abraham, N. L., & Archibald, A. T. (2022). "The role of future anthropogenic metha ne emissions in air quality and climate". Climate and Atmospheric Scie nce, 5(1), 1–8.
- Takano, T., & Ueyama, M. (2021). "Spatial variations in daytime methane an d carbon dioxide emissions in two urban landscapes, Sakai, Japan". Ur ban Climate, 36: 100798.
- Von Fischer, J. C., Cooley, D., Chamberlain, S., Gaylord, A., Griebenow, C. J., Hamburg, S. P., ... & Ham, J. (2017). "Rapid, vehicle-based identific ation of location and magnitude of urban natural gas pipeline leaks". E nvironmental Science & Technology, 51(7): 4091–4099.
- Weller, Z. D., Yang, D. K., & von Fischer, J. C. (2019). "An open source alg orithm to detect natural gas leaks from mobile methane survey data. P LoS One", 14(2), e0212287.
- Weller, Z. D., Roscioli, J. R., Daube, W. C., Lamb, B. K., Ferrara, T. W., Bre wer, P. E., & von Fischer, J. C. (2018). "Vehicle-based methane surve ys for finding natural gas leaks and estimating their size: Validation a nd uncertainty". Environmental science & technology, 52(20): 11922–119 30.
- Wunch, D., Wennberg, P. O., Toon, G. C., Keppel‐Aleks, G., & Yavin, Y. G. (2009). "Emissions of greenhouse gases from a North American megacity". Geophysical research letters, 36(15).
- Zavala-Araiza, D., Lyon, D. R., Alvarez, R. A., Davis, K. J., Harriss, R., Her ndon, S. C., ... & Hamburg, S. P. (2015). "Reconciling divergent estima tes of oil and gas methane emissions". Proceedings of the National Ac ademy of Sciences, 112(51): 15597–15602.

국가통계포털, https://kosis.kr/

- 국정모니터링지표, https://www.index.go.kr/
- 서울특별시, 서울 열린데이터 광장, https://data.seoul.go.kr/
- 통계청, 통계지리서비스, https://sgis.kostat.go.kr/view/thematicMap/
- 법제처, 국가법령정보센터, http://www.law.go.kr/
- 한국중부발전, 서울발전본부, https://www.komipo.co.kr/
- NOAA, Global CH₄ Monthly Means, www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4
- NOAA, Global Average Surface Temperature, https://www.climate.gov/newsfeatures/understanding-climate/climate-change-global-temperature
- Schiermeier, Q. (2020, July 14). Global methane levels soar to record high", Nature, https://www.nature.com/articles/d41586-020-02116-8

Abstract

Characterizing urban methane emissions in Seoul, South Korea using a greenhouse gas monitoring mobile lab

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

Mitigating anthropogenic methane emissions is attracting Korean policymakers' attention as an effective short-term strategy to achieve the national greenhouse gas emission reduction target by 2030. It is widely known that anthropogenic methane emissions are caused by various urban infrastructures, particularly those associated with natural gas use and waste management. Yet, there is still a lack of holistic understanding of methane emission sources and emission source attribution in the Korean urban context. In this study, I shed light on a wide array of expected methane emission sources in an urban area by developing a greenhouse gas monitoring mobile lab suitable for the complex structure of an urban area and surveying such emission sources in Seoul. Toward this end, I conducted a series of surveys for ten months between January and October 2022, and a greenhouse gas monitoring mobile lab detected 1,707 signals of methane leakage in a 4,206 km section across all areas of Seoul.

The empirical findings are fivefold. I first observed that the background concentration in Seoul was about 2,000 to 2,300 ppb. Second, I identified that the main methane emission sources in Seoul were waste sectors-such as landfills and wastewater treatment plants-and energy sectors-including combined thermal power plants and natural gas buses. These two sectors contributed to methane enhancement of 46,500 ppb. Third, I determined that sewage systems -including manholes-contributed to a significant amount of methane emissions, which has not been reflected in the national greenhouse gas inventory. Fourth, I analyzed the ratio of ethane to methane for the major emission sources, suggesting that most waste sector sources were considered biogenic, with a ratio less than the energy sector sources. Lastly, I employed repeated observations and Gaussian plume models to estimate the annual emission rate of the Seonam Wastewater Treatment Plant-one of the main emission sources in the waste sector in Seoul. It was estimated 49.95±5.92 GgCO2eq/year, equivalent to approximately 70% of Seoul's wastewater treatment sector emissions based on the 2019 greenhouse gas inventory, indicating that the inventory's statistics-based simulated emissions are lower than the actual emissions.

This study offers a few policy implications. First, accurate monitoring in urban areas is crucial if Korea is to meet the national greenhouse gas emission reduction target and combat the devastating consequences of climate change. In particular, it is important to continuously conduct mobile laboratory observations in urban areas to enhance the accuracy of greenhouse gas emissions monitoring. Second, in the Korean urban context, it is recommended that Korean policymakers pay attention to effective leakage management of the waste and energy sector infrastructures, given that these infrastructures were identified as the main methane emission sources across Seoul—the largest metropolis of Korea.

keywords: Greenhouse Gas, Methane, Mobile Observation, Emission-rate, Seoul, Urban Student Number : 2021-24014