



기술자료

# 원거리 메탄 혼합비 측정을 위한 라만 라이다의 성능 평가: 가스셀 실험 및 매립지 현장에서의 지점측정장비와 비교

## Performance Evaluation of a Raman Lidar for Remote Sensing of Methane Volume Mixing Ratio (VMR): Gas Cell Experiments and Comparison with in situ Measurements at a Landfill

계관욱<sup>1)</sup>, 이한림<sup>2),3),\*</sup>, 박선호<sup>3)</sup>, 최인영<sup>3)</sup>, 장재화<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>국립부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공,  
<sup>2)</sup>국립부경대학교 지구환경시스템과학부 위성정보융합공학전공, <sup>3)</sup>노바스콕(주)

Kwanuk Kye<sup>1)</sup>, Hanlim Lee<sup>2),3),\*</sup>, Sunho Park<sup>3)</sup>, Inyoung Choi<sup>3)</sup>, Jaehwa Jang<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Major of Spatial Information Engineering, Division of Earth and Environmental System Sciences, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea  
<sup>2)</sup>Major of Geomatics Engineering, Division of Earth and Environmental System Sciences, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea  
<sup>3)</sup>NovaScope Co., Ltd, Busan, Republic of Korea

접수일 2026년 1월 1일  
수정일 2026년 1월 28일  
채택일 2026년 2월 13일  
Received 1 January 2026  
Revised 28 January 2026  
Accepted 13 February 2026  
\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)51-629-6688  
E-mail : hanlimlee10@gmail.com

**Abstract** In this study, the performance of a Raman Lidar using an ultraviolet (UV) laser for remote measurement of methane VMRs was evaluated for the first time. Gas cell experiments were conducted to investigate the sensitivity of the methane raman signal to variations in methane partial pressure inside a chamber located at a remote distance from the Lidar. The results showed a very strong correlation between the Raman Lidar signal and the methane partial pressure in the chamber, with a correlation coefficient of 0.99, confirming that the methane raman signal accurately represents the methane VMR. To further verify the applicability of the system under real environmental conditions, field observations were carried out at a landfill site. Methane VMRs measured by the Raman Lidar at a distance of 336 m were compared with simultaneous measurements obtained from an methane in-situ instrument installed at the same location. The comparison showed a high correlation coefficient of 0.99 between the two datasets. The mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), and percentile difference were calculated as 2.56 ppm, 4.43 ppm, and 6.76%, respectively. These results indicate that the Raman Lidar provides methane VMR measurements comparable to those of the in-situ instrument, even under remote measurement conditions. Overall, the results demonstrate that the Raman Lidar is capable of stably measuring methane VMRs over a wide range, from ppm levels to percent (%) levels, at remote distances. Therefore, the Raman Lidar is expected to be a useful remote sensing tool for measuring methane VMRs and detecting leaks from spatially distributed emission sources using a limited number of instruments, and for supporting methane emission estimation when combined with additional information.

**Key words:** Raman Lidar, Methane, VMR, Gas cell test, Remote sensing

### 1. 서 론

지구온난화가 가속화됨에 따라 온실가스에 대한 관심이 높아지고 있다. 국제적으로 이산화탄소, 메탄을 포함한 6개 물질을 대표적인 온실가스로 정하고

(UNFCCC, 1997) 온실가스 배출량을 줄이기 위한 움직임을 보이고 있다. 그중 메탄은 일반 대기 중 농도는 이산화탄소 대비 작지만, 28이라는 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)를 가지고 있어 같은 양을 배출했을 때 이산화탄소 대비 지구온난화

가속화에 큰 기여를 한다(IPCC, 2013). 메탄은 습지나 산불 등에 의한 자연적인 배출원과 LNG 발전소, 매립지, 오일 & 가스(O & NG) 생산 활동 등에 의한 인위적인 배출원에 의해 발생한다. 파리 협정에 따라 각 국가는 NDC (National Determined Contributions)를 통해 자국의 온실가스 감축 목표 이행 계획을 설정하고 이를 UNFCCC에 주기적으로 제출해야 한다. 각 국가는 5년 주기로 NDC를 갱신하고 2년마다 BTR (Biennial Transparency Report)을 통해 메탄을 포함한 온실가스 배출량 정보를 보고해야 한다(UNFCCC, 2015). 최근까지 지표에서의 메탄은 주로 지점측정장비를 기반으로 하여 측정해 왔다. Spokas *et al.* (2006)은 플럭스 챔버(Flux chamber) 및 SF<sub>6</sub> 추적가스(Tracer gas)를 이용한 질량수지(Mass balance) 기법을 이용하여 매립지 표면에서 방출되는 메탄을 직접 측정하고 방출되는 메탄 플럭스를 정량화하였다. 해당 연구에서는 가스 크로마토그래피(Gas chromatograph) 기반의 지점측정을 통하여 메탄 농도를 높은 정밀도로 측정하였다. 또한 Yacovitch *et al.* (2014)은 이동형 지점측정방식을 이용하여 도로 기반으로 연속적인 메탄 농도 측정을 수행하였으며 해당 연구에서는 지점측정방식의 높은 메탄 측정 정확도를 보여주었다. 메탄을 측정하는 지점측정장비는 해당 지점에서 높은 정확도를 가지고 있다. 하지만 지점측정장비는 광범위한 지역에서 다수의 배출원을 측정하기에는 많은 장비의 수를 필요로 하기 때문에 많은 인적·경제적 자원을 필요로 하며, 장비를 설치할 수 없는 지점의 경우 메탄 배출을 측정할 수 없다는 한계를 가지고 있다. 따라서 원거리에서 다수의 메탄 배출원을 측정할 수 있으며 소수의 장비를 통하여 넓은 지역을 효율적으로 측정할 수 있는 기술이 필요하다.

원거리에 존재하는 메탄을 측정할 수 있는 기술은 푸리에 변환 적외선 분광법(Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)과 같은 수동형 원격탐사 방식과 라이다(Light Detecting And Ranging, LiDAR)와 같은 능동형 원격탐사 방식이 있다. FTIR을 이용하여 메탄을 측정하는 연구가 활발히 수행되어 왔다. Smith *et*

*al.* (2011)은 Open-path FTIR을 기반으로 하여 메탄을 포함한 여러 미량기체의 모의 플룸(Plume)에 대한 농도를 측정하고 분광 파라미터 변화에 따른 민감도를 분석하였으며 Zhu *et al.* (2013)은 독일 남부 매립지를 대상으로 하여 수십에서 수백 미터의 야외 매립지 전체에 대한 메탄 배출을 측정하였다. Griffith *et al.* (2018)에서는 독일 하이델베르크에서 1.5 km 경로상의 도시 및 주거 지역 플룸이 혼합된 메탄을 측정하였다. 수동형원격탐사방식의 경우 송신부가 없기 때문에 라이다 장비에 비해 광학 구조가 간단하며 비용이 적게 든다는 장점이 있다. 또한 분광기술을 적용하기 때문에 여러 물질에 대한 분석이 가능하다. 하지만 거리 분해능이 없기 때문에 여러 배출원이 존재할 수 있는 환경에서 특정 타겟 혹은 특정 지점에 대해서 메탄의 혼합비를 산출하고 이를 통해 배출량을 측정하는데는 불확실성이 존재할 수 있다. 또한 적외선 기술을 이용하기 때문에 흡수단면적이 온도에 의한 영향을 매우 많이 받으며 메탄 산출 시 사용되는 파장 영역이 태양광이 강하게 존재하는 파장 영역과 겹치는 경우가 많아 산출 불확도를 증가시키는 요인으로 작용한다(Sussmann *et al.*, 2011). 현재 수동형원격탐사방식의 메탄 측정 오차를 정량적으로 보고한 내용은 부족한 실정이다. Zhu *et al.* (2013)에 따르면 메탄의 혼합비까지 산출했지만 정량적인 오차에 대한 내용이 보고되지 않았다.

반면에 능동형원격탐사 방식인 라이다는 거리분해능이 있어 여러 배출원이 존재하는 환경에서도 특정 목표 혹은 지점에 대해 개별적인 메탄 배출을 측정할 수 있다. 현재까지 라이다 기술을 이용한 온실가스 원격 탐사로는, 라만 라이다(Raman Lidar)를 이용하여 소각장에서 배출되는 이산화탄소의 배출량을 측정하는 연구(Kim *et al.*, 2025)와 차등 흡수 라이다(Differential Absorption Lidar, DIAL)를 이용하여 이산화탄소의 플럭스(Flux)를 원거리에서 측정하는 연구(Aiuppa *et al.*, 2017, 2015)가 있다. 메탄의 경우 라만 라이다를 이용하여 저층 대류권의 메탄 수직 프로파일을 측정하는 연구(Veselovskii *et al.*, 2019)와, 차등 흡수 라이다를

매립지 등 산업 시설에 적용하여 메탄 배출의 공간 특성을 파악하고 정량화하는 연구(Innocenti *et al.*, 2022, 2017)가 수행된 바 있다. 하지만 기존 연구들은 지표와 수직인 방향으로 메탄 측정을 수행하였거나 주로 차등 흡수 라이더를 이용하여 메탄 배출을 측정하였으며 라만 라이더를 이용하여 지표와 수평인 방향으로 메탄을 측정하고 오차를 정량적으로 산정한 연구는 부족한 실정이다. 온실가스는 탄소배출권 거래제와 연관되어 있고 특히 메탄은 많은 나라에서 탄소배출권 거래제에 해당하는 물질 중 하나이다(LRI, 2025). 따라서 원격측정기술 기반으로 메탄의 배출량을 정확하게 측정하는 기술에 대한 시장의 수요가 높아지고 있다(Dreyfus and Ferris, 2023; Soini *et al.*, 2022). 배출량을 측정하기 위해서는 배출농도, 배출속도, 플룸의 면적 정보가 필요하다. 그중에서 정확한 배출농도 측정이 가장 중요한데 원거리에서 배출농도를 측정하는 기술은 제한적이다. 따라서 라만 라이더가 원거리 특정 지점 혹은 목표에 대해서 혼합비 (Volume Mixing Ratio, VMR)나 농도를 얼마나 정확하게 측정하는지 정략적으로 파악할 필요가 있다.

본 연구에서는 처음으로 라만 라이더로 측정된 메탄 라만 신호가 메탄 농도 변화를 정확하게 반영하는지 조사하는 것을 목적으로 한다. 두 번째는 야외환경에서 지점측정장비와 라만 라이더가 메탄 혼합비를 동시 측정했을 때 측정된 메탄 혼합비 값들 사이의 상관관계와 상대적 차이를 평가하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 장비

본 연구에서 다룬 온실가스 측정을 위한 라만 라이더(노바스콧(주), NGL)는 송신부, 수신부, 검출부로 구성되어 있다. 송신부에서 사용된 레이저는 355 nm의 파장 영역에서 70 mJ의 에너지와 20 Hz의 반복률을 가지고 있으며 레이저가 지면과 수평인 방향으로 방

출되기 때문에 안전을 위하여 빔 직경을 5배 확대해주는 빔 익스팬더를 사용하였다. 수신부에서는 직경 150 mm의 슈미트카세그레인식(Schmidt-Cassegrain's) 망원경을 사용하여 대기 중의 분자와 에어로졸에 의해 후방 산란되는 신호를 수집하도록 하였다. 송신부의 레이저와 수신부의 망원경은 동 축으로 움직이도록 설계되었다. 검출부에서는 355 nm의 레일레이-미(Rayleigh-Mie) 산란 신호와 질소 및 메탄의 라만 신호를 분리하고 동시에 수집하기 위하여 다이크로익 빔 분리기(Dichroic beam splitter; BS)를 사용하여 각각의 라만 파장을 분리하였고, 해당 파장의 라만 신호만 투과하는 협대역 간섭필터(Narrow interference filter)를 사용하였다. 파장별로 분리된 신호는 광전자증배관(Photo Multiplier Tube; PMT)에서 거리에 대한 신호 세기의 함수로 기록된다. 메탄의 혼합비를 측정하기 위하여 메탄과 질소의 라만 산란 신호가 사용되며, 레일레이-미 산란 신호는 라만 라이더의 신호 정렬을 위하여 사용하였다. 추가적으로 강한 탄성 산란신호를 제거하기 위하여 노치 필터(Notch filter)를 사용하여 순수한 라만 신호를 수신하도록 하였다. 질소와 메탄

**Table 1.** Components of the Raman Lidar.

Component	Specification
Laser	Nd:YAG Laser Wavelength: 355 nm Pulse energy: 70 mJ Repetition rate: 20 Hz Beam divergence: < 0.3 mrad (after × 5 beam expansion)
Telescope	Schmidt-Cassegrain's (150 mm)
Beam expander	5 ×, beam-expander
Filter1	355 nm Narrow interference filter
Filter2	386~387 nm Narrow interference filter
Filter3	395~396 nm Narrow interference filter
PMT1	Elastic (355 nm) signal channel
PMT2	N <sub>2</sub> Raman signal channel
PMT3	CH <sub>4</sub> Raman signal channel

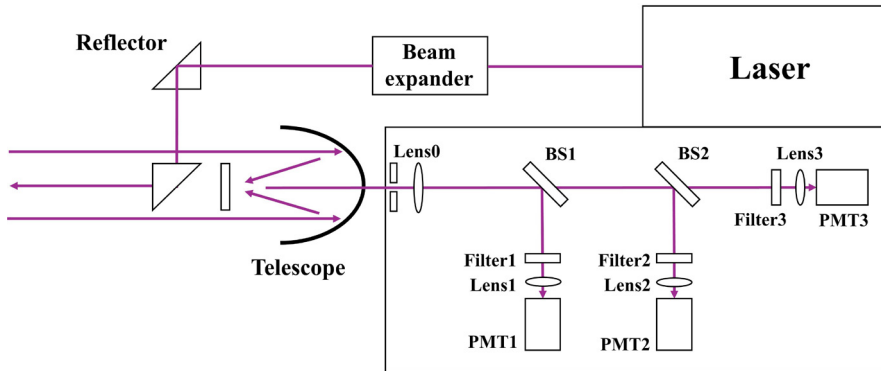


Fig. 1. Schematic of the Raman Lidar.

의 라만 산란 파장은 각각 386.7 nm (Kim *et al.*, 2018) 와 395.7 nm (Veselovskii *et al.*, 2019)를 사용하였다. 표 1은 온실가스 측정을 위한 라만 라이다의 구성 요소를 요약한 것이다.

그림 1은 라만 라이다의 구조도를 나타낸 것이다. 레이저는 빔 익스팬더(Beam expander)를 지나 반사경을 거쳐 대기 중으로 방출되며 대기 중에서 산란된 빛은 망원경으로 수집된 후 핀홀(Pinhole)과 시준 렌즈(Lens0)를 지나 이후 지날 광경로에 평행하게 들어 오게 된다. BS1은 355 nm 이하의 빛은 반사시키고 그 외 파장 영역의 빛은 투과시킨다. BS1에서 반사된 빛은 355 nm 영역의 파장만 투과시키는 Filter1을 투과하여 PMT1에는 레일레이-미 산란이 수집된다. BS1에서 투과된 빛 중 387 nm보다 짧은 파장의 빛은 BS2에서 반사되며 이때 반사된 빛은 386.7 nm 파장의 빛만을 투과시키는 Filter2를 지나 PMT2에 질소 라만 신호로 수집된다. BS2에서 투과된 빛은 395.7 nm 파장의 빛만을 투과시키는 Filter3을 지나 PMT3에 메탄 라만 신호로 수집되고 각각의 렌즈들(L1~L4)은 다이크로익 빔 분리기와 필터들을 지나 각각의 파장대별로 분리된 빛이 광전자증배관에서 검출될 수 있도록 초점을 맞추는 역할을 한다.

## 2.2 메탄 혼합비 산출 방법

본 연구에서는 메탄의 혼합비를 산출하기 위하여 라만 라이다 방정식을 사용하였으며, 다음과 같이 나

타낼 수 있다(Veselovskii *et al.*, 2019; Ansmann *et al.*, 1990).

$$P(\lambda_0, \lambda_x, z) = k(\lambda_x) \frac{O(z)}{z^2} \beta(\lambda_0, \lambda_x, z) \times \exp \left( - \int_{z_0}^z [\alpha_{\lambda_0}^{mol} + \alpha_{\lambda_0}^{aer} + \alpha_{\lambda_x}^{mol} + \alpha_{\lambda_x}^{aer}] dz \right) \quad (1)$$

$P(\lambda_0, \lambda_x, z)$ 는 거리  $z$ 에서  $\lambda_0$  파장의 레이저를 방출하였을 때  $\lambda_x$  파장으로 라만 산란되어 돌아오는 신호이다.  $k(\lambda_x)$ 는 시스템 상수(망원경의 수신면적, 광전자 증배관의 수신 효율 등)이며,  $O(z)$ 는 오버랩 함수이다.  $\beta$ 는 후방 산란 계수를 나타낸다.  $\alpha$ 는 소산계수(Extinction coefficient)를 나타내며 위첨자 aer, mol은 각각 에어로졸과 분자에 의한 소산계수를 나타내고 아래첨자는 해당 파장영역으로 산란되는 분자를 나타낸다. 거리  $z_0$ 에서  $z$ 까지의 대기투과도는 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$\alpha_{\lambda_x} \equiv \alpha_{\lambda_x}^{mol} + \alpha_{\lambda_x}^{aer} \quad (2)$$

$$q(\lambda_x, z_0, z) = \exp \left( - \int_{z_0}^z \alpha_{\lambda_x}(z) dz \right) \quad (3)$$

본 연구에서는 355 nm의 레이저를 사용하였으며, 이때 측정하고자 하는 기체인 메탄은 진동 라만 산란으로 인하여 395.7 nm 파장으로 변화한다. 또한 질소의 라만 산란 파장은 386.7 nm이다. 식 (1), (2), (3)을

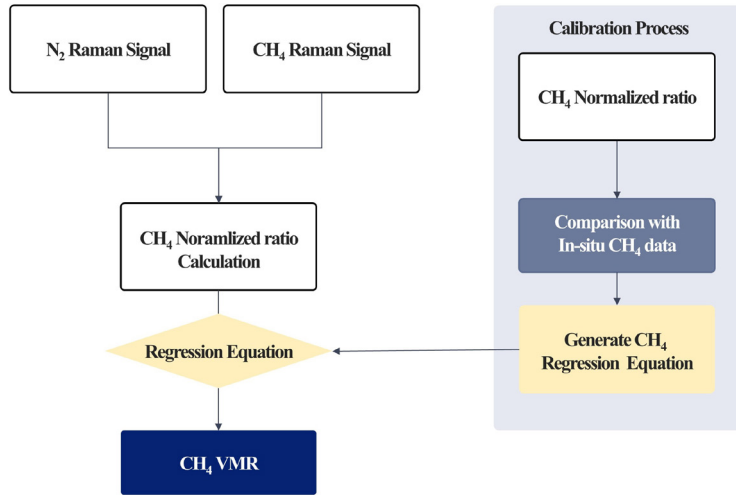


Fig. 2. Flow chart of CH<sub>4</sub> VMR retrieving algorithm using the Raman Lidar.

이용하여 라만 라이다로 측정된 질소와 메탄의 후방 라만 산란 신호는 각각 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$P_{N_2} = \frac{O(z)k(\lambda_{N_2})}{z^2} \beta(\lambda_0, \lambda_{N_2}, z) q(\lambda_{N_2}, z_0, z) \times q(\lambda_0, z_0, z) \quad (4)$$

$$P_{CH_4} = \frac{O(z)k(\lambda_{CH_4})}{z^2} \beta(\lambda_0, \lambda_{CH_4}, z) \times q(\lambda_{CH_4}, z_0, z) q(\lambda_0, z_0, z) \quad (5)$$

식 (4), 식 (5)의 질소와 메탄의 후방 라만 신호는 각각 대기 중 질소와 메탄의 양을 가장 많이 반영하며, 에어로졸과 같은 간섭물질들의 영향도 포함하고 있다. 라만 라이다에서는 간섭물질의 영향을 최대한 제거하기 위하여 메탄의 라만 파장과 근접한 파장대에서 측정된 질소 라만 산란 신호와 비율을 취하여 식 (6)의 Normalized ratio를 계산한다(Veselovskii *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2008). Normalized ratio를 후술될 그림 2의 회귀식에 대입하여 메탄 혼합비를 산출하게 되는데, 메탄 라만 신호와 질소 라만신호의 비율을 취한다고 하더라도 간섭물질의 영향을 모두 제거할 수는 없기 때문에 이에 따른 오차가 회귀식에 포함될 수 있다.

$$Normalized\ ratio_{CH_4} = \frac{P_{CH_4}}{P_{N_2}} \quad (6)$$

그림 2는 온실가스 측정을 위한 라만 라이다의 메탄 혼합비 산출 흐름도를 나타낸 것이다. 라만 라이다가 측정을 시작하여 질소와 메탄의 라만 산란 신호를 동시에 수집하게 되며 수집된 신호를 이용하여 메탄의 Normalized ratio를 각각 계산해 준다. Normalized ratio를 혼합비로 변환하기 위해서 검정 과정(Calibration process)을 거친다. 검정 과정에서는 지점측정장비로 측정된 메탄의 혼합비와 라만 라이다로 측정된 Normalized ratio 사이의 회귀식(Regression equation)을 생성한다. 라만 라이다로 측정된 Normalized ratio를 회귀식에 대입하여 최종적으로 지표 메탄 혼합비를 산출한다(Kim *et al.*, 2025, 2018).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 메탄 가스 셀 실험

현장에서 원격측정장비와 지점측정장비를 비교할 경우 다양한 변수에 의해서 우연의 일치로 높은 상관관계가 획득될 수도 있다. 예를 들어 우리가 산업현

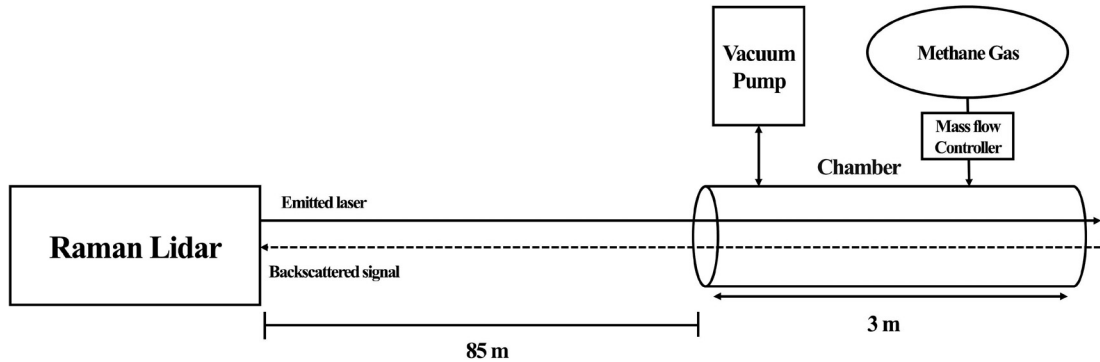


Fig. 3. Schematic of the CH<sub>4</sub> Gas cell test.

장에서 흔히 볼 수 있듯이 메탄이 배출될 때 수증기가 함께 배출된다고 할 경우, 원격측정장비의 분광 불확실성으로 인해 메탄 라만 신호가 아닌 메탄 라만 파장과 인접한 곳에 위치한 수증기 라만 신호가 측정된 경우에도 원격 측정 장비로 측정된 신호와 in-situ 장비로 측정된 메탄 혼합비 간의 상관관계가 우연히 높게 나올 수 있다. 셀 환경에서 수증기와 같은 간섭물질이 없는 상황에서 메탄의 농도를 증가시켰을 때 본 연구에서 사용한 온실가스 측정 라만 라이다가 측정하고자 하는 메탄 라만 신호와 셀 내부의 메탄 압력 사이의 높은 상관관계가 확보되는 것을 확인할 필요가 있다. 이러한 셀 실험은 원격측정장비를 개발하는 과정에서 측정물질에 대한 높은 민감도가 확보되었는지 여부를 검증하는 목적으로 널리 사용된다 (Lin *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2018; Limery *et al.*, 2017). 그림 3은 가스 셀 실험의 구조도를 나타낸 것이다. 셀 실험에서 라만 라이더의 오버랩 구간을 고려하여 라만 라이더로부터 30 m 이상 떨어져 있으면서, 셀 실험을 진행한 공간의 제약을 고려하여 라만 라이더로부터 가장 멀리 떨어뜨려 놓을 수 있는 85 m 지점에 가스 셀 실험을 위한 챔버 (Gas chamber)를 설치하였다. 진공펌프 (Vacuum pump)를 통하여 챔버 내부를 진공상태로 만들고 유량 조절기 (Mass flow controller)를 이용하여 챔버 내부로 메탄을 주입한다. 본 실험에서는 총 6번의 메탄 분압 상태를 인위적으로 만들어 각 분압별로 10번씩 라만 라이더 측정을 수행하였다.

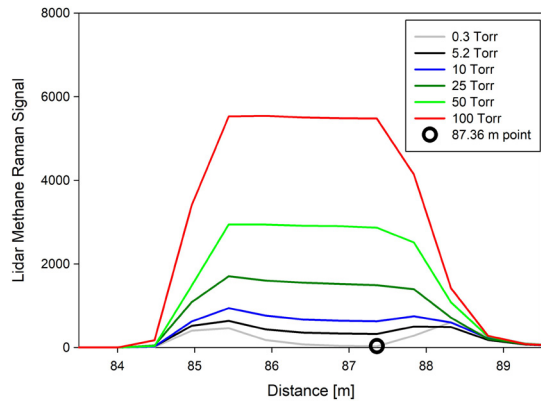
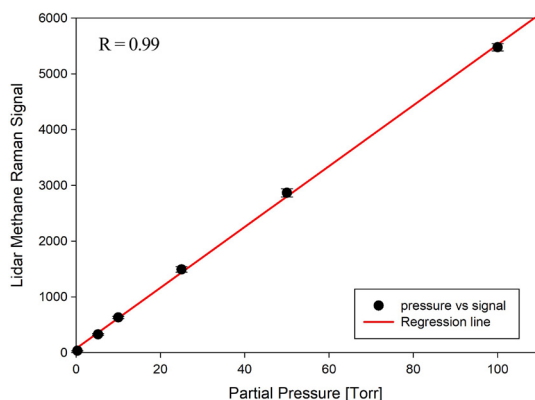


Fig. 4. Averaged CH<sub>4</sub> raman signals measured by the Raman Lidar at a range of 85.5~88.5 m while the CH<sub>4</sub> partial pressure inside the chamber was varied from 0.3 to 100 Torr. The black circle indicates the location of 87.36 m.

그림 4는 챔버 내부의 메탄 분압 변화별로 측정된 라만 라이더의 메탄 라만 신호 변화를 거리에 따라 나타낸 그래프이다. 가로축은 거리이며 세로축은 각 분압별로 10회씩 라만 라이더로 측정된 메탄 라만 산란 신호를 평균한 것이다. 메탄이 존재하는 85.5 m에서 88.5 m 구간에서 챔버 내부의 메탄 분압이 상승함에 따라 라만 라이더의 메탄 라만 신호 또한 강해지는 것을 확인할 수 있다. 챔버 내부의 가스가 없다고 판단되는 0.3 Torr의 신호를 보면, 가스가 없는 진공상태임에도 불구하고 85.5 m 부근과 88.5 m 부근에서 메탄 라만 신호가 높아진 것을 확인할 수 있으며 두 지점 사이의 거리는 챔버의 길이인 3 m와 일치한다. 이는 챔버

전면과 후면에서 투과되지 못한 일부의 빛이 발생시킨 강한 탄성 산란 신호(레이레이-미 산란)에 의한 영향이다. 챔버 내부의 메탄 분압이 높아짐에 따라 전면과 후면의 탄성 산란 신호에 의한 영향이 줄어드는 것처럼 보이지만, 실제로는 그 영향이 사라지는 것이 아니기 때문에 인공적으로 발생한 탄성 산란 신호의 영향이 최소화되는 지점을 선택하여 해당 지점에 대한 분석을 실시해야 한다. 챔버 내부에서 챔버 전면부와 후면부에 의한 영향이 최소가 되는 지점을 선택하기 위하여 챔버 내부 구간이라고 판단되는 85.5~88.5 m 사이에서 라만 라이다의 메탄 라만 신호가 최소가 되며 해당 구간에서 중앙이 되는 지점을 선택하고자 하였으며 해당 조건을 만족하는 지점을 87 m 지점으로 선정(그림 4 참고)하여 분석을 수행하였다. 그림 5는 챔버 앞·뒷면의 탄성 산란의 영향이 최소화되는 지점인 87.36 m에서의 라만 라이다로 측정된 메탄 라만 신호(Lidar Methane Raman Signal)와 챔버 내부 분압(Partial pressure) 간의 상관성 분석을 실시한 결과를 나타낸 그림이며 각 분압별 메탄 라만 신호의 표준 편차를 구하여 오차막대를 나타내었다. 상관계수 R은 0.99로 두 값이 높은 상관성을 보였다. 본 실험을 통하여 챔버 내부의 온도와 부피가 일정하고, 내부의 변수는 메탄뿐이기 때문에 온실가스 측정을 위한 라만 라



**Fig. 5.** Comparison of CH<sub>4</sub> raman signals measured by the Raman Lidar at 87.36 m and CH<sub>4</sub> partial pressure inside the chamber. The red line is linear regression line and error bars indicate standard deviation.

이다가 메탄의 농도 변화가 일어난 지점과 메탄의 농도 변화를 유효하게 측정할 수 있음을 확인하였다.

### 3.2 현장 관측

본 연구에서는 야외 상황에서 온실가스 측정을 위한 라만 라이다(노바스콧(주), NGL)의 지표 부근 메탄 혼합비 측정 성능을 평가하기 위하여 대한민국 부산광역시에 위치한 생곡 매립지에서 현장 측정을 수행하였다. 2025년 10월 16일부터 2025년 12월 1일까지 관측하였으며, 기상악화 및 장비점검으로 관측하지 못한 경우를 제외한 날에 대하여 분석을 수행하였다. 메탄 라만 신호의 신호대잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)를 확보하고 주간 시간 태양 자외선에 의한 간섭을 최소화하기 위하여 모든 관측은 야간에만 수행하였다. 라만 라이다로 측정된 메탄 혼합비와의 비교를 위하여 지점측정장비를 설치하여 동시 관측을 수행하였다. 라만 라이다로 측정된 메탄 혼합비의 유효성 검증을 위해 사용한 지점측정장비는 국립환경과학원으로부터 메탄 혼합비 측정에 대한 규격 인증을 받은 장비인 Nutech사의 Nutech3000을 사용하였다(NIER, 2022). Nutech3000은 촉매 산화와 이중 불꽃이온화 검출(Flame Ionization Detection, FID) 기술을 통하여 동시에 탄화수소, 메탄, 비메탄 탄화수소의 농도를 산출하며 해당 장비의 상세 구성은 표 2에 정리하였다. 라만 라이다로 측정된 메탄의 Normalized ratio와

**Table 2.** Technical data of Nutech3000 (Nutech Instruments, Inc., 2025) and Raman Lidar(NGL, Novascope co. kr).

Parameter	Specification	
Nutech3000	Test method	Catalytic Oxidation + Double FID
	Measurement range	0~10/100/1000/10000 mg/m <sup>3</sup> (Extendable)
	Detection limit	≤ 0.04 mg/m <sup>3</sup>
	Accuracy	± 0.2%
	Linear error	± 2% (CH <sub>4</sub> )
NGL	Measurement distance	≤ 1 km

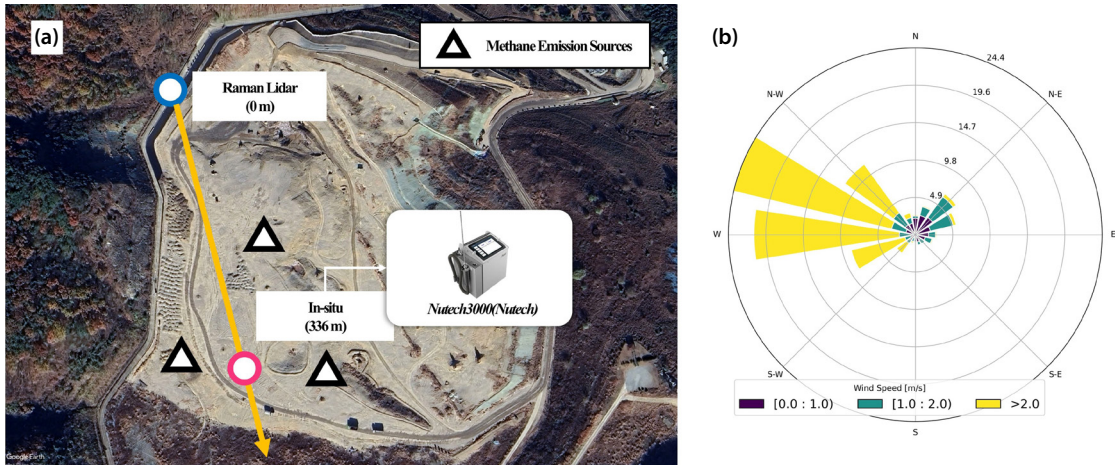


Fig. 6. (a) Measurement geometry of field test at Saenggok Landfill and (b) wind rose on November 17, 2025, 19:30 (KST).

Nutech3000 측정 메탄 혼합비 간의 회귀식을 획득하기 위하여 2주 동안(2025년 10월 1일부터 2025년 10월 15일까지) 독립적인 관측을 수행하였다. 라만 라이다 메탄 관측자료에 이동평균을 적용하여 생성된 771 개의 Normalized ratio 자료로부터 지점측정장비로 관측된 메탄 혼합비 사이의 회귀식을 획득하였다. 검증 기간(2025년 10월 16일부터 2025년 12월 1일) 동안 측정된 Normalized ratio를 획득된 회귀식에 입력하여(2.2절 참고) 라만 라이다 메탄 혼합비를 산출하였다. 그림 6은 매립지 현장 관측의 측정 기하와 메탄 발생원으로부터 발생한 메탄 플룸의 영향을 가장 잘 나타낸 날인 11월 17일의 바람 장미를 나타낸 것이다. 라만 라이다 설치 위치로부터 336 m 떨어진 곳에 지점측정장비를 설치하였으며 지점측정장비의 측정 센서가 광경로와 최대한 비슷하게 위치하도록 라만 라이다의 측정 고도각을 설정하였다. 현장 관측에서 라만 라이다는 1.2 m 간격으로 측정을 수행하였으며 1분에 한 번씩 측정 정보를 저장하도록 하였다. 지점측정장비는 10초에 한 번씩 데이터를 저장한다. 라만 라이다와 지점측정장비 자료를 20분 간격으로 시간에 대하여 이동평균을 수행해 시간 해상도를 일치시켰으며, 공간 일치를 위하여 지점측정장비가 설치된 336 m 거리의 라만 라이다 혼합비를 추출하여 라만 라이

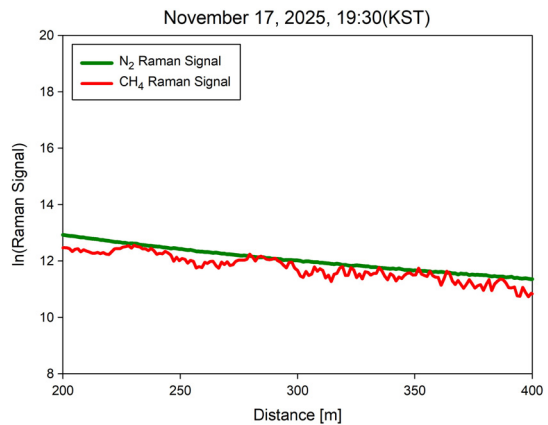
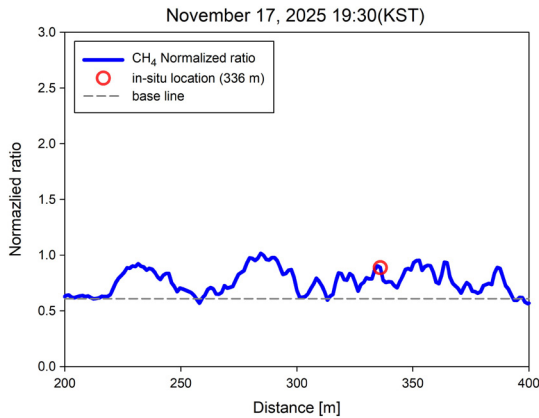


Fig. 7. Twenty-minute accumulated N<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> raman signals measured along the line of sight of the Raman Lidar on November 17, 2025, 19:30 (KST). The green and red solid line indicate N<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> raman signals respectively.

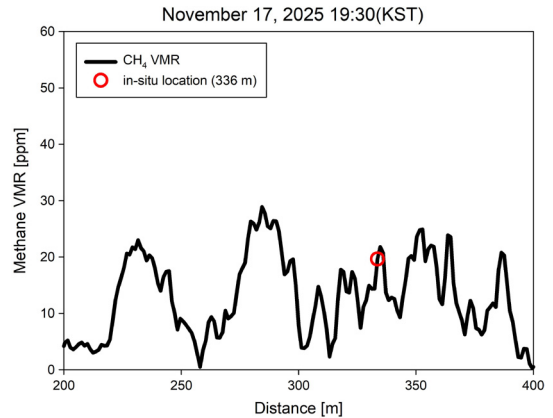
다로 측정된 메탄 혼합비와 지점측정장비로 측정된 메탄 혼합비를 비교하였다. 해당 관측은 지점측정장비와의 상대적 정확도를 비교한 것으로, 두 장비 측정값의 차이는 지점측정장비와 본 연구에서 이용한 온실가스 측정을 위한 라만 라이다의 측정 오차를 함께 포함하고 있다.

그림 7은 2025년 11월 17일 19시 30분(KST)에 라만 라이다로 측정된 질소와 메탄의 20분 누적 라만 신



**Fig. 8.** Twenty-minute accumulated  $\text{CH}_4$  normalized ratio measured along the line of sight of the Raman Lidar on November 17, 2025, 19:30 (KST). The blue solid line and grey dotted line represent normalized ratio of  $\text{CH}_4$  and baseline, defined as the 5th percentile of the  $\text{CH}_4$  normalized ratio, respectively. The red circle indicates 336 m range, corresponding to the location where the in-situ instrument (Nutech3000) was installed.

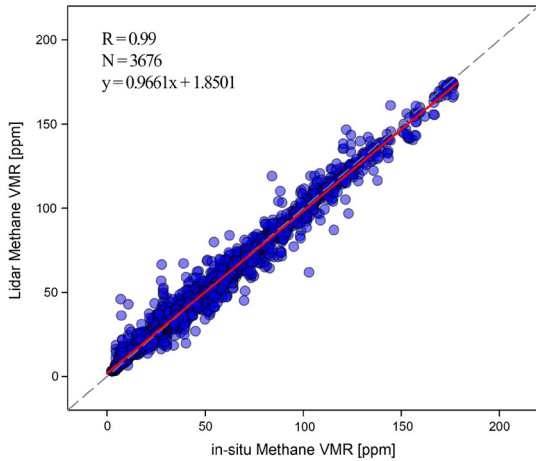
호를 거리별로 나타낸 것이며 x축은 거리, y축은 질소와 메탄의 라만 신호에 자연로그를 취한 것이다. 라만 신호는 대기 투과도에 의하여 거리 증가에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이러한 대기 투과도의 영향을 제거하기 위하여 질소 라만 신호를 함께 측정하고 식 6에 따라 메탄의 Normalized ratio를 계산하였다. 그림 8과 그림 9는 계산된 메탄의 Normalized ratio를 거리에 따라 나타낸 것과 그림 2의 회귀식과 그림 8의 Normalized ratio를 이용하여 거리별 메탄의 농도 산출 결과를 각각 나타낸 것이며, 메탄 혼합비 비교를 위해 설치한 지점측정장비의 위치(336 m)를 표시한 것이다. 이를 통하여 라만 라이다로 측정된 메탄 라만 신호의 거리에 따라 감소하는 경향성이 제거된 것을 확인할 수 있다. 11월 17일은 메탄 플룸의 영향을 잘 보여준 사례로 그림 8의 Normalized ratio의 하위 5% 값을 나타내는 baseline과 대비하였을 때, 200~250 m 구간과 260~300 m 구간, 두 구간에서 메탄의 Normalized ratio가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 레이저 광경로 인근에 존재하는 메탄 배출원으로부터 방출된 메탄 플룸의 영향을 라만 라이다가 잘 반영한 것



**Fig. 9.** Twenty-minute accumulated  $\text{CH}_4$  VMR measured along the line of sight of the Raman Lidar on November 17, 2025, 19:30 (KST). The black solid line and red circle represent  $\text{CH}_4$  VMR measured by the Raman Lidar and 336 m range, corresponding to the location where the in-situ instrument (Nutech3000) was installed, respectively.

으로 판단된다. 농도가 매우 낮은 지역에서 비교를 수행할 경우, 라만 라이다 및 지점측정장비의 유효 측정 범위 내에서 농도 변화에 대한 측정 성능을 평가하기가 어렵다. 반대로 메탄이 배출되는 배출공에서 직접적으로 측정을 수행할 경우 메탄 농도가 급격히 증가하여 지점측정장비의 농도 측정 범위를 초과하게 된다. 따라서 배출공에서 배출되는 메탄의 영향을 일부 받아 측정 농도 범위의 변화량이 크게 존재할 수 있으면서도 상대적으로 낮은 농도 범위를 보이는 지점을 선정할 수 있도록 하였다. 또한 라만 라이다는 측정 거리가 증가할수록 신호대잡음비가 감소하는 특성이 있다. 본 연구에서 사용한 라만 라이다는 약 1 km 거리까지 메탄 라만 신호에 대하여 안정적인 신호대잡음비 확보가 가능하다. 따라서 라만 라이다의 신호대잡음비가 충분히 확보되면서 앞서 설명한 농도 범위 조건을 동시에 만족하는 위치로서 그림 6에 표시된 336 m 지점을 최종 선정하여 비교 분석을 수행하였다.

그림 10은 지점측정장비로 측정한 메탄 혼합비(in-situ Methane VMR)와 라만 라이다로 측정된 메탄 혼합비(Lidar Methane VMR)를 비교한 산점도이며 비교한 데이터의 수(N)는 3,676개이다. 두 값의 상관계



**Fig. 10.** Scatter plot between in-situ CH<sub>4</sub> VMR and Raman Lidar CH<sub>4</sub> VMR. The grey dashed line indicates a 1:1 line and the red solid line indicate a linear regression line.

수 R은 0.99로 높은 상관성을 보였으며 회귀식의 기울기는 약 0.97로 1에 가까운 값을 가지고 있다. 1 km 이내에서는 지점측정장비와 라만 라이더 사이의 검정 과정이 이루어질 336 m의 신호대잡음비와 유사하기 때문에, 본 연구에서 보고한 지점측정장비로 측정된 값과 라만 라이더로 측정된 값 사이에 높은 일치성이 1 km까지는 유효할 것으로 생각할 수 있다. 다만, 습도가 매우 높을 경우 신호대잡음비가 거리에 따라서 큰 변화를 보이기 때문에 이에 대한 추가적인 조사가 필요하다. 평균 절대값 오차(Mean Absolute Bias, MAB)와 평균 제곱근 편차(Root Mean Square Error, RMSE) 그리고 두 값 간의 백분율 오차(Percentile Difference, PD)는 각각 2.56 ppm, 4.43 ppm, 6.76%이다. 두 측정값 사이의 발생하는 차이는 간섭물질 및 라만 라이더로부터의 거리에 따른 신호대잡음비 변화와 지점측정장비 측정값과 라만 라이더 Normalized ratio 값 사이의 회귀식을 생성할 때, 이 둘의 관계가 회귀식으로 100% 설명되지 못하기 때문에 발생하는 차이와 관련될 수 있다. 관측 사이트로부터 약 10 km 떨어진 가장 가까운 방재기상관측지점(Automatic Weather Station, AWS)에서 관측 기간 동안의 기상자료를 획득하였으며 관측 기간 동안의 최대 및 평균 풍속은 각각 6.1 m/s, 1.5 ±

**Table 3.** Statistical comparison of CH<sub>4</sub> VMR measured by an in-situ instrument and by the Raman Lidar for different concentration ranges.

VMR range [ppm]	N	R	MAE [ppm]	RMSE [ppm]	Percentile difference [%]
0~20	576	0.80	1.99	3.90	14.68
0~50	2154	0.96	2.18	3.90	8.68
20~180	3100	0.99	2.66	3.31	5.29
50~180	1522	0.98	3.10	5.10	4.05

1.1 m/s였다. 표 3은 메탄 농도 구간에 따른 지점측정 장비로 측정된 메탄 혼합비와 라만 라이더로 측정된 메탄 혼합비를 비교한 통계값을 정리한 것이다. 상관계수 R 값은 0~20 ppm 구간에서 가장 낮은 값(R = 0.80)을 보였으며, 고농도를 포함하는 구간으로 갈수록 R 값이 높아지는 경향을 보였다. 평균 제곱근 편차의 경우 저농도를 포함하는 구간(0~20 ppm, 0~50 ppm)에서 3.90 ppm으로, 고농도의 영향을 가장 많이 포함하는 구간(50~180 ppm)의 5.10 ppm보다 낮은 값을 보였다. 반면 백분율 오차의 경우 저농도의 영향을 가장 많이 포함하는 구간인 0~20 ppm 구간에서 가장 높은 값인 14.68%를 보였으며 고농도의 영향을 많이 받을수록 낮아지는 경향을 보였으며 고농도의 영향을 가장 많이 포함하는 구간인 50~180 ppm 구간에서 4.05%로 가장 낮은 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론 및 요약

본 연구에서는 가스 셀 실험과 현장 관측을 통하여 온실가스 측정을 위한 라만 라이더의 메탄 탐지 및 측정 타당성 평가와 측정 성능 평가를 수행하였다. 라만 라이더는 레이저를 대기 중으로 방출하여 후방 산란되는 빛 중 레일레이-미 산란에 의한 빛과 질소 및 메탄의 라만 산란 파장 영역의 빛을 분리하여 신호를 수집하는 3채널 시스템으로 구성되어 있다. 라만 라이더의 메탄 탐지 및 측정 타당성 평가를 위한 가스 셀 실험에서 라만 라이더로 챔버 내부의 메탄 분압을 변화시키며 측정을 수행하였을 때, 챔버 내부의 메탄 농도

변화 지점을 성공적으로 탐지하였으며 라만 라이다로 측정된 메탄 라만 신호 중 챔버의 앞과 뒤의 영향을 받지 않는 지점의 신호를 추출하여 챔버 내부의 메탄 분압과 상관관계 비교를 수행하였을 때 높은 상관성을 보여 메탄의 농도 변화를 성공적으로 탐지하였음을 확인하였다. 라만 라이다의 메탄 혼합비 측정 성능 평가를 위하여 생곡 쓰레기 매립지에서 지점측정장비와 동시에 관측을 수행하였다. 성능 평가를 위하여 라만 라이다로 측정된 메탄 혼합비 중 지점측정장비가 위치한 지점의 혼합비를 추출하고 이를 지점측정장비로 측정된 메탄 혼합비와 비교분석을 수행하였다. 두 값을 비교하였을 때 높은 상관성을 보였으며, 평균 절대값 오차와 평균 제곱근 편차 그리고 두 값 간의 백분율 오차를 계산하였을 때 야외환경에서 라만 라이다가 메탄 혼합비를 높은 성능으로 산출한 것을 확인할 수 있었다. 라만 라이다는 소수의 장비로 메탄이 누출 및 배출되는 여러 지점을 원거리에서 측정할 수 있어 효율적인 메탄 모니터링의 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 실측 기반의 메탄 배출량을 산출하기 위하여, 본 연구에서 소개한 라만 라이다로 측정된 배출 농도 정보와 추가적인 배출속도 정보를 통하여 원거리 측정을 기반으로 한 실시간 배출량 정보를 높은 정확도로 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2025년도 중소벤처기업부의 창업성장기술개발사업 지원에 의한 연구임 [RS-2025-23323846].

## References

- Ansmann, A., Riebesell, M., Weitkamp, C. (1990) Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar, *Optics Letters*, 15, 746-748. <https://doi.org/10.1364/OL.15.000746>
- Aiuppa, A., Fiorani, L., Santoro, S., Parracino, S., D'Aleo, R., Liuzzo, M., Maio, G., Nuvoli, M. (2017) New advances in DIAL-lidar-based remote sensing of the volcanic CO<sub>2</sub> flux, *Frontiers in Earth Science*, 5, 15. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00015>
- Aiuppa, A., Fiorani, L., Santoro, S., Parracino, S., Nuvoli, M., Chiodini, G., Minopoli, C., Tamburello, G. (2015) New ground-based lidar enables volcanic CO<sub>2</sub> flux measurements, *Scientific Reports*, 5, 13614. <https://doi.org/10.1038/srep13614>
- Dreyfus, G., Ferris, R. (2023) Metrics and Measurement of Methane Emissions, Institute for Governance & Sustainable Development, United States. <https://www.igsd.org/wp-content/uploads/2023/11/Metrics-and-Measurement-of-Methane-Emissions.pdf> (accessed on Feb. 23, 2025).
- Griffith, D.W.T., Pöhler, D., Schmitt, S., Hammer, S., Vardag, S.N., Platt, U. (2018) Long open-path measurements of greenhouse gases in air using near-infrared Fourier transform spectroscopy, *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 1549-1563. <https://doi.org/10.5194/amt-11-1549-2018>
- Innocenti, F., Gardiner, T., Robinson, R. (2022) Uncertainty assessment of differential absorption lidar measurements of industrial emissions concentrations, *Remote Sensing*, 14(17), 4291. <https://doi.org/10.3390/rs14174291>
- Innocenti, F., Robinson, R.A., Gardiner, T.D., Finlayson, A.J., Connor, A. (2017) Differential absorption lidar (DIAL) measurements of landfill methane emissions, *Remote Sensing*, 9(9), 953. <https://doi.org/10.3390/rs9090953>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, USA. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_all\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf)
- Kim, D., Choi, W., Lee, H. (2025) A new technique to measure CO<sub>2</sub> mixing ratio at industrial stacks plumes based on Raman lidar remote sensing, *Science of The Total Environment*, 983, 179638. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179638>
- Kim, D., Kang, H., Ryu, J.-Y., Jun, S.-C., Yun, S.-T., Choi, S., Park, S., Yoon, M., Lee, H. (2018) Development of Raman Lidar for Remote Sensing of CO<sub>2</sub> Leakage at an Artificial Carbon Capture and Storage Site, *Remote Sensing*, 10, 1439. <https://doi.org/10.3390/rs10091439>
- Legal Response International (LRI) (2025) *Carbon Trading Schemes Around the World*. <https://legalresponse.org> (accessed on Feb. 23, 2025).
- Liméry, A., Cézard, N., Fleury, D., Goular, D., Planchat, C., Bertrand, J., Hauchecorne, A. (2017) Raman lidar for hydrogen gas concentration monitoring and future radioactive

- waste management, *Optics Express*, 25(24), 30636-30641. <https://doi.org/10.1364/OE.25.030636>
- Lin, C.-H., Grant, R.H., Heber, A.J., Johnston, C.T. (2019) Application of open-path Fourier transform infrared spectroscopy (OP-FTIR) to measure greenhouse gas concentrations from agricultural fields, *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 3403-3415. <https://doi.org/10.5194/amt-12-3403-2019>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2022) Type approval certificate for total hydrocarbon (THC) analyzer (Nutech 3000), Republic of Korea. <https://www.nier.go.kr> (accessed on Feb. 23, 2025).
- Smith, T.E.L., Wooster, M.J., Tattaris, M., Griffith, D.W.T. (2011) Absolute accuracy and sensitivity analysis of OP-FTIR retrievals of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and CO over concentrations representative of "clean air" and "polluted plumes", *Atmospheric Measurement Techniques*, 4, 97-116. <https://doi.org/10.5194/amt-4-97-2011>
- Soini, M., Kohli, A., Fuessler, J. (2022) Assessment of Digital Measurement, Reporting, and Verification, Climate Ledger Initiative, Switzerland. <https://www.climateledger.org/resources/D-MRV-Report-2022.pdf> (accessed on Feb. 23, 2025).
- Spokas, K., Bogner, J., Chanton, J.P., Morcet, M., Aran, C., Graff, C., Moreau-Le Golvan, Y., Hebe, I. (2006) Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems?, *Waste Management*, 26(5), 516-525. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.07.021>
- Sussmann, R., Forster, F., Rettinger, M., Jones, N. (2011) Temporal variability of solar absorption FTIR measurements of atmospheric methane, *Atmospheric Measurement Techniques*, 4, 1637-1649. <https://doi.org/10.5194/amt-4-1637-2011>
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (1997) Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf> (accessed on Dec. 28, 2025).
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2015) Paris Agreement. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> (accessed on Dec. 28, 2025).
- Veselovskii, I., Goloub, P., Hu, Q., Podvin, T., Whiteman, D.N., Korenskiy, M., Landulfo, E. (2019) Profiling of CH<sub>4</sub> background mixing ratio in the lower troposphere with Raman lidar: a feasibility experiment, *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 119-128. <https://doi.org/10.5194/amt-12-119-2019>
- Yacovitch, T.I., Herndon, S.C., Pétron, G., Kofler, J., Lyon, D., Zahniser, M.S., Kolb, C.E. (2014) Mobile laboratory observations of methane emissions in the Barnett Shale region, *Environmental Science & Technology*, 48(13), 7889-7895. <https://doi.org/10.1021/es5034846>
- Zhao, P., Zhang, Y., Wang, L., Cao, K., Su, J., Hu, S., Hu, H. (2008) Measurement of tropospheric CO<sub>2</sub> and aerosol extinction profiles with Raman lidar, *Chinese Optics Letters*, 6(3), 157-160. <https://doi.org/10.3788/COL20080603.0157>
- Zhu, H., Letzel, M.O., Reiser, M., Kranert, M., Bächlin, W., Flassak, T. (2013) A new approach to estimation of methane emission rates from landfills, *Waste Management*, 33, 2713-2719. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.08.027>

## Authors Information

- 계관욱 (국립부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템 공학전공 석사과정 학생) (kyeuk0413@gmail.com)
- 이한림 (국립부경대학교 지구환경시스템과학부 교수, 노바스콥(주) 대표) (hanlimlee10@gmail.com)
- 박선호 (노바스콥(주) 기술이사) (shpark@novascope.co.kr)
- 최인영 (노바스콥(주) 수석연구원) (iychoi@novascope.co.kr)
- 장재화 (국립부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템 공학전공 석사과정 학생) (jaehwa916@gmail.com)