

기술자료

DIAL 기반 연직 온도 및 수증기 관측을 위한 파장 선정 및 국내 적용 예비 설계 검토

Wavelength Selection and Preliminary Design Assessment for DIAL-Based Vertical Temperature and Water Vapor Profiling in Korea

문윤기, 신주선, 박민경, 김덕현¹⁾, Sergei Volkov²⁾, 노영민*

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공, ¹⁾국립한밭대학교 기초과학부,

²⁾Center of Laser Atmosphere Sensing, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev Square, 634055 Tomsk, Russia

Yunki Mun, Juseon Shin, Mingyoung Park, Dukhyeon Kim¹⁾, Sergei N. Volkov²⁾, Youngmin Noh*

Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

¹⁾School of Basic Science, Hanbat National University, Daejeon, Republic of Korea

²⁾Center of Laser Atmosphere Sensing, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev Square, 634055 Tomsk, Russia

접수일 2026년 6월 1일
수정일 2026년 6월 12일
채택일 2026년 6월 12일

Received 1 June 2026
Revised 12 June 2026
Accepted 12 June 2026

*Corresponding author
Tel : +82-(0)51-629-6526
E-mail : nym@pknu.ac.kr

Abstract Lidar-based temperature and humidity profiling technology offers a potential approach to complement conventional atmospheric observation systems. While existing observation systems such as radiosondes, satellite sensors, and microwave radiometers each have inherent limitations in vertical resolution or temporal continuity, their low launch frequency and spatial coverage restrict continuous profiling capabilities. This study examines Differential Absorption Lidar (DIAL) technology for temperature and humidity profiling and evaluates design considerations for potential applications in Korea. Using High-resolution TRANsmission molecular absorption database (HITRAN) 2020, we examined candidate wavelengths of 770 nm in the oxygen A-band for temperature profiling, 828 nm for lower tropospheric water vapor, and 935 nm for upper tropospheric water vapor measurements. MATLAB-based signal simulations under representative mid-latitude atmospheric conditions were performed to evaluate feasible design conditions, including a pulse energy of 10 μ J, repetition rate of 7,220~9,000 Hz, and telescope diameter of 40 cm. Under nighttime conditions, the simulated system satisfied the reference SNR criterion (≥ 3) at 5 km for all three wavelengths. Daytime performance was limited by solar background radiation, with evaluated ranges of 3.25~3.62 km and SNR values of 1.9~2.2, which were below the reference criterion of 3. Key considerations for Korean application include wavelength selection according to humidity and altitude conditions, as well as system-level strategies to mitigate solar background radiation for improved daytime performance. This study provides preliminary design considerations for future lidar-based temperature and humidity profiling systems in Korea.

Key words: DIAL, HITRAN, Water vapor, Temperature, Lidar signal simulation

1. 서 론

기상 관측에서 대기 온도와 수증기의 고도별 분포

는 수치예보 개선, 기후변화 분석, 재해기상 대응 등 다양한 분야에서 중요한 요소이다(Sherwood *et al.*, 2010; Pincus *et al.*, 2008). 특히 하층 대기의 수증기

변화는 대류 발생과 강수 예측에 큰 영향을 미치며, 온도 프로파일은 대기 안정도와 경계층 형성에서 핵심적인 역할을 한다(Stevens *et al.*, 2018; Virman *et al.*, 2018). 이러한 이유로 고해상도 온·습도 연직 프로파일 확보는 예보 정확도 향상과 극한기상 조기 탐지에 매우 중요하다(Zheng *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2015).

현재 널리 활용되고 있는 라디오존데, 위성기반 센서, 마이크로파 복사계 등의 관측 시스템은 각각 고유한 한계점을 지니고 있다(Madonna *et al.*, 2020). 라디오존데는 발사 빈도와 공간 분포의 제약으로 인해 빠르게 변하는 기상 현상을 충분히 포착하지 못하며(McCarthy *et al.*, 2009; McMillin *et al.*, 2007), 위성 기반 관측은 수직 해상도가 낮고 경계층 내의 세부 구조 파악이 어렵다(Masunaga *et al.*, 2002). 마이크로파 복사계 등 지상 기반 수동형 센서들은 연속 관측은 가능하나 수직 해상도가 낮아 고도별 세부 구조 파악이 어렵고, 역산 알고리즘에 의존하는 간접 측정 방식으로 인해 경계층 내 프로파일의 정확도가 제한된다(Crewell and Lohnert, 2007). 이처럼 기존 관측 기술은 근본적인 물리적 및 운영적 제약으로 인해 고해상도 연직 관측 수요를 충족시키지 못하고 있으며(Adam *et al.*, 2016; McNicholas and Turner, 2014; Crewell and Lohnert, 2007), 특히 대류 현상이나 급격한 기상 변화에 대응하기 위한 실시간 감시 체계로는 충분하지 않다.

라이다(Light Detection and Ranging)는 능동형 원격탐사 기법으로, 대기 중 산란 또는 흡수 신호를 이용하여 고도별 대기정보를 산출할 수 있다(Kim and Noh, 2023; Ansmann *et al.*, 1990; Fernald, 1984; Fernald *et al.*, 1972). 특히 수증기와 온도 관측에는 라만 산란(Raman scattering)과 차등흡수(Differential Absorption Lidar: DIAL) 기법이 활용되어 왔다(Stillwell *et al.*, 2019; Spuler *et al.*, 2015; Wulfmeyer *et al.*, 2015; Whiteman *et al.*, 1992). 라만 라이다는 수증기 및 온도 산출에 적용 가능하나, 비탄성 산란 신호가 약하여 강한 송신 출력과 고성능 수신계가 요구되는

경우가 많다(Wulfmeyer *et al.*, 2015; Whiteman *et al.*, 1992). 반면 DIAL은 특정 기체의 흡수선에서 온라인 및 오프라인 파장의 신호 차이를 이용하므로, 적절한 흡수선 선택과 송수신계 설계가 관측 성능을 결정하는 핵심 요소가 된다(Stillwell *et al.*, 2019; Spuler *et al.*, 2015; Wulfmeyer *et al.*, 2015). 그러나 이러한 라이다 기반 온·습도 관측 시스템은 파장 안정화, 레이저 안정성, 수신 광학계 구성, 태양 배경광 억제, 유지관리 비용 등 실제 운용 측면에서 고려해야 할 기술적 제약이 크다.

국내에서는 라디오존데가 연직 온·습도 관측의 주요 수단으로 활용되고 있으나, 관측 빈도와 지점 수의 제한으로 인해 급격한 대기 변화나 국지적 대류 발달을 연속적으로 감시하는 데 한계가 있다(KMA, 2016). 또한 국내에는 에어로졸 연직 분포 관측을 위한 지상 라이다 네트워크가 운영되어 왔으나(Yeo *et al.*, 2016), 온도와 수증기 프로파일을 목적으로 하는 라이다 기반 상시 관측 체계는 아직 제한적이다. 한반도는 여름철 고습, 겨울철 건조, 장마 및 태풍, 황사와 농농도 에어로졸 사례 등 계절적·기상학적 변동성이 크므로(Song *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2010; Choi and Kim, 2007), 국내 적용을 위해서는 단순히 선행 시스템의 사양을 도입하기보다 국내 대기 조건과 운용 환경을 고려한 파장 선택 및 시스템 설계 검토가 필요하다.

본 연구는 라이다 기반 연직 온도 및 수증기 관측 시스템의 국내 적용 가능성을 평가하기 위해, 선행 연구에서 활용된 온도 및 수증기 관측 파장과 시스템 사양을 검토하였다. 또한, High-resolution TRANsmission molecular absorption database (HITRAN) 2020 기반 흡수선 분석과 MATLAB 기반 신호 모의 계산을 통해 770 nm 산소 A-band 온도 관측 및 828/935 nm 수증기 관측 파장의 적용 가능성, 주·야간 성능 차이, 시스템 설계상의 제한 요인을 평가하였다. 기존 선행 연구들이 주로 고출력 레이저 기반의 실제 운용 시스템 성능 결과를 중심으로 기술된 반면, 본 연구는 저출력 다이오드 레이저 기반의 국

내 지상 상시 운용이라는 구체적 맥락에서 파장 선정 기준과 설계 변수를 체계적으로 검토하였다는 점에서 차별성이 있다. 특히, 계절별 수증기 변동성이 큰 한반도 대기 조건을 고려하여 단일 파장이 아닌 관측 고도 및 습윤 조건에 따른 복수 파장 조합의 필요성을 제시하였으며, 국내 라이다 기반 온도 및 수증기 연직 관측 시스템 구축을 위한 예비 설계 자료를 제공하는 것을 목적으로 한다.

2. 선행 연구 및 HITRAN 기반 온도 및 수증기 DIAL 관측 파장 검토

HITRAN은 대기 분자의 흡수선에 대한 분광학적 매개변수를 제공하는 데이터베이스로, 빛의 투과와 방출을 예측하고 시뮬레이션하는 데 활용된다(Gordon *et al.*, 2022). HITRAN 데이터베이스는 현재 55 개 분자종에 830만개의 흡수선을 포함하고 있으며, 각 흡수선에 대해 선 세기(line intensity), 압력과 온도에 따른 선폭 확장, 흡수선의 이동 등의 정보를 제공하므로, DIAL 관측에서 온라인 및 오프라인 파장을 설정하는 데 필수적인 기초 자료로 활용된다.

DIAL 기반 온도 및 수증기 관측에서 파장 선택은 단순히 흡수 강도가 큰 파장을 선택하는 것이 아니라, 온라인 파장에서의 흡수 강도, 오프라인 파장과의 흡수 단면적 비율, 온도 및 압력 의존성, 인접 기체의 간섭 여부를 종합적으로 고려하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 기준을 바탕으로 HITRAN2020 데이터베이스를 활용하여 온도 및 수증기 관측에 적합한 파장 대역을 검토하고, 선행 연구와의 비교를 통해 국내 지상 기반 연직 관측에 적용 가능한 후보 파장 조합을 도출하였다.

2.1 온도 관측을 위한 산소 A-band 파장 검토

산소 A-band는 약 760~770 nm 범위에 분포하는 산소 흡수선으로, 대기 중 산소 혼합비가 비교적 일정하다는 특성을 이용하여 온도 관측에 활용될 수 있

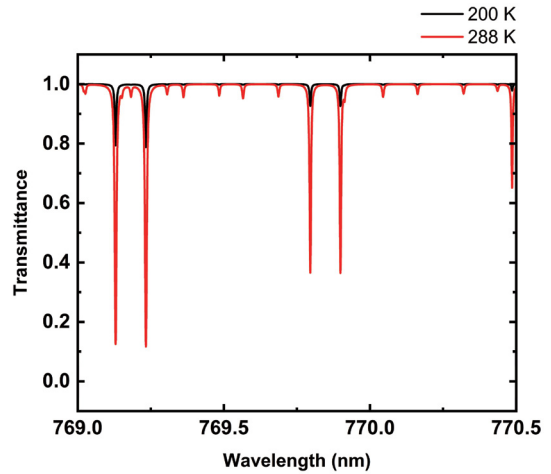


Fig. 1. Transmittance differences near the oxygen A-band at 770 nm as a function of temperature (Calculated with a cell length of 5 km, an oxygen mixing ratio of 0.2095, and a pressure of 1013 hPa).

다. 이 대역의 흡수선 세기는 온도 변화에 따른 볼츠만 분포 변화에 영향을 받으므로, 온라인 및 오프라인 파장의 차등흡수 신호를 이용하면 온도 프로파일 산출이 가능하다(Stillwell *et al.*, 2019; Long *et al.*, 2010). 또한 H₂O, CO₂ 등 다른 대기 기체의 흡수선의 간섭이 최소화되는 영역이므로 스펙트럼 오염이 적고, 적절한 흡수 강도를 가지고 있으므로 신호 손실이 적어 안정적인 측정이 가능하다(Gordon *et al.*, 2022).

본 연구에서는 선행 연구에서 온도 DIAL 관측에 활용된 산소 A-band 파장 범위를 대상으로 HITRAN 기반 투과율 변화를 검토하였다. 그림 1은 769~770.5 nm 부근에서 온도 변화에 따른 투과율 차이를 나타낸 것으로, 온도에 따라 흡수선 강도가 뚜렷하게 달라짐을 확인할 수 있다. 이는 볼츠만 분포에 따른 에너지 준위 점유율 변화에 기인하며(Long *et al.*, 2010), DIAL 온도 산출의 물리적 근거가 된다.

Stillwell *et al.* (2019)은 산소 A-band에서 769.8~770.1 nm 부근의 온라인 및 오프라인 파장 조합을 이용하여 온도 DIAL 관측 가능성을 제시한 바 있다. 본 연구에서도 이와 유사한 770 nm 대역을 온도 관측 후보 파장으로 검토하였으며, 이는 새로운 흡수선의 제

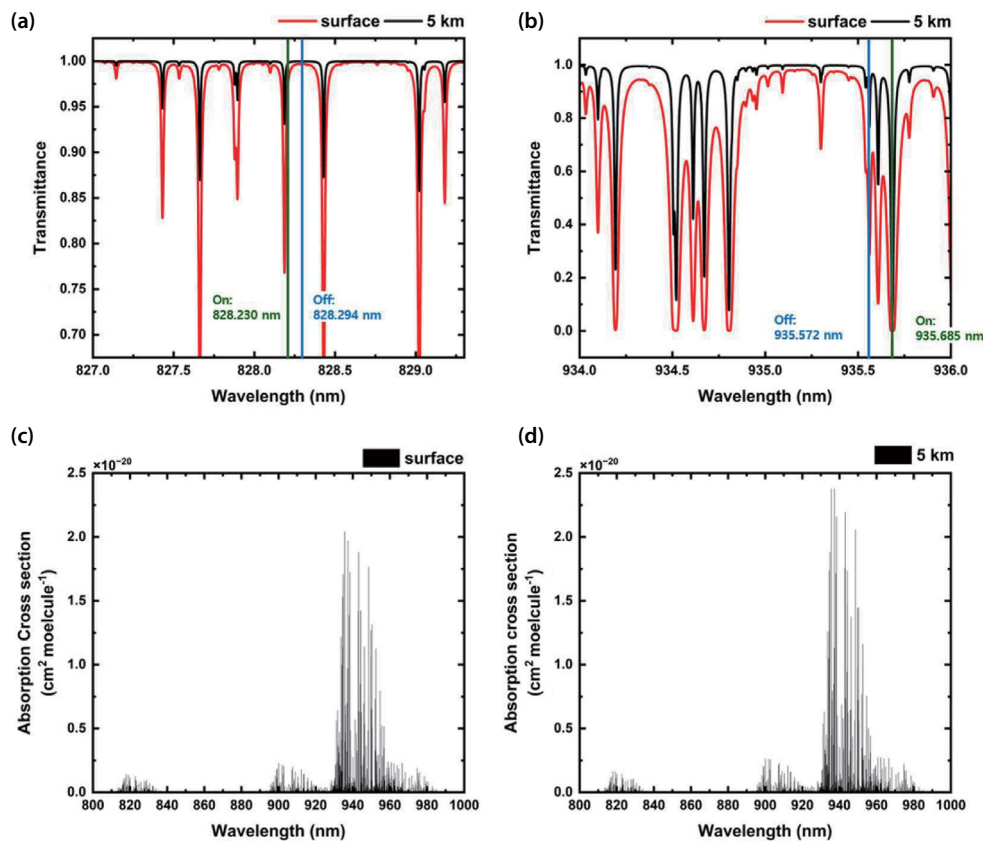


Fig. 2. Water vapor absorption spectra at surface and 5 km altitudes. Surface conditions are set to 281 K and 890 hPa, and the 5 km conditions to 255 K and 540 hPa. (a) Altitude-dependent transmittance near 828 nm; green and blue vertical lines indicate the online (828.230 nm) and offline (828.294 nm) wavelengths, respectively. (b) Altitude-dependent transmittance near 935 nm; blue and green vertical lines indicate the offline (935.572 nm) and online (935.685 nm) wavelengths, respectively. (c) and (d) absorption cross-sections at surface and 5 km altitude conditions, respectively.

안보다는 선행 연구에서 활용된 파장 조합의 국내 지상 기반 적용 가능성을 평가하기 위한 것이다. 다만 산소 A-band 기반 온도 산출은 온도 민감도뿐 아니라 압력 확장 (pressure broadening), 도플러 확장, 파장 안정도, 수신 신호의 신호대 잡음비 (signal-to-noise ratio, SNR)에 의해 영향을 받으므로 실제 적용 시에는 Voigt 프로파일 기반의 분석 알고리즘이 필요하다 (Mendonca *et al.*, 2019; Long *et al.*, 2012; Tran *et al.*, 2008).

2.2 수증기 관측 파장 검토

수증기의 흡수선은 근적외선 영역 전반에 걸쳐 광

범위하게 분포되어 있고 세기도 다양하여 선택의 범위가 넓다. 따라서 수증기 DIAL 파장 선택에서는 온라인과 오프라인 파장의 흡수 단면적 차이, 목표 고도에서의 수증기 농도, 대기 투과도, 온도 의존성, 인접 흡수선 간섭을 함께 고려해야 한다. 본 연구에서는 선행 연구에서 주로 활용되는 828 nm와 935 nm 대역의 흡수선을 분석하였다.

그림 2는 두 파장 대역에서의 수증기 흡수 스펙트럼으로, (a), (b)는 지표면 조건 (0 km, 890 hPa, 281 K)과 5 km 고도 조건 (540 hPa, 255 K)에서의 고도별 투과도를, (c), (d)는 동일 조건에서 계산된 흡수 단면적을 각각 나타낸다. 고도가 높아질수록 온도와 압력이

낮아지면서, 흡수선 폭이 좁아지고 세기가 변화하는 양상을 두 파장 대역 모두에서 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 828 nm와 935 nm 대역의 관측 고도별 적용 가능성을 검토한다. 본 연구는 지상기반 수직 관측을 전제로 하므로 항공 관측에서는 결과가 달라질 수 있다.

828 nm 대역은 중간 강도의 흡수선들이 분포하여 하층 대기 관측에 유리하다(Wulfmeyer *et al.*, 2015). 그림 2(a), (c)에서 보이는 것처럼 827.5~828.5 nm 구간에서 수 개의 뚜렷한 흡수선이 관찰된다. 본 연구에서는 Spuler *et al.* (2015)의 MicroPulse DIAL 연구에서 활용된 828 nm 부근의 온라인 및 오프라인 파장(각각 828.230 nm 및 828.294 nm) 조합을 기준으로 검토하였다. 이 대역은 강한 흡수선에 비해 온도 의존성이 낮아 하층 고습 조건에서 신호 포화 가능성이 작고, 저출력 다이오드 레이저 기반 시스템 구성이 가능하여 단순하고 비용 효율적인 설계가 가능하다는 장점이 있다(Spuler *et al.*, 2015; Wulfmeyer *et al.*, 2015; Nehrir *et al.*, 2009).

935 nm 대역은 828 nm보다 강한 흡수선을 보유하고 있으므로, 대기경계층(Planetary boundary layer; PBL) 이상의 상층 대기 측정에 유리하다(Poberaj *et al.*, 2002; Ismail and Browell, 1989). 그림 2(b), (d)에서 확인할 수 있듯이 934~936 nm 구간에 주요 흡수선이 집중되어 있으며, 선행 연구를 참고하여 온라인 및 오프라인 파장을 각각 935.685 nm와 935.572 nm로 설정하였다(Kiemle *et al.*, 2008). Ismail and Browell (1994)의 계산에 따르면 935 nm 대역의 흡수 단면적은 $7.0 \times 10^{-22} \text{ cm}^2 \text{ molecule}^{-1}$ 로 820~828 nm 대역($\approx 0.9 \times 10^{-22} \text{ cm}^2 \text{ molecule}^{-1}$)보다 약 7배 강하여, Ehret *et al.* (1993)이 제시한 상층 대기의 낮은 수증기 농도($0.1 \sim 1 \text{ g kg}^{-1}$) 조건에서도 충분한 신호를 확보할 수 있다. Poberaj *et al.* (2002)의 5~10 km 고도 시뮬레이션 결과, 건조한 조건(상대습도 10~30%)에서도 10~15% 범위의 측정 정확도를 달성하는 것으로 보고되었다. 다만, 935 nm 대역 흡수선은 온도 변화에 상대적으로 민감하므로 하층 고습 조건에서는 신호 감

쇠가 증가할 수 있으며, 온도 및 압력 조건에 따른 흡수선 변화도 발생할 수 있어 정확한 온도 프로파일 기반 보정이 필수적이다(Vogelmann and Trickl, 2008).

따라서, 828 nm와 935 nm 대역은 서로 대체관계라기보다 관측 고도와 수증기 조건에 따라 상보적으로 활용될 수 있는 후보 파장으로 해석할 수 있다. 828 nm 대역은 하층 대기 및 고습 조건의 수증기 관측에, 935 nm 대역은 상대적으로 건조한 자유대기 또는 상층 수증기 관측에 유리하다(Kiemle *et al.*, 2011; Behrendt *et al.*, 2007). 특히, 수증기 관측에서 유의해야 할 점은 온도와 수증기 농도 프로파일에 따라 최적 파장이 미세하게 달라진다는 점이다. 높은 습도 조건(상대습도 > 80%)에서는 약한 흡수선을 사용하는 것이 신호 포화를 방지하는 데 유리하며, 건조한 조건(< 30%)에서는 강한 흡수선이 측정 정확도 향상에 기여한다. 가변 파장 또는 다중 파장 동시 관측의 필요성은 선행 연구에서도 제기된 바 있으며(Späth *et al.*, 2016; Weckwerth *et al.*, 2016), 특히, 계절별 습도 변동이 심한 국내 환경에서는 이러한 접근이 중요하다. 여름철 장마기에는 고습조건이 형성되어 828 nm 대역이 신호 포화 방지에 유리하며, 겨울철 건조기단 유입시에는 흡수 강도가 강한 935 nm 대역이 충분한 신호 확보에 적합하다. 봄철 황사 및 고농도 에어로졸 발생시에는 후방산란계수 변화에 따른 신호 보정도 고려할 필요가 있다. 이러한 국내 계절별 변동성을 감안하면, 828 nm와 935 nm의 상보적 운용이 효과적인 접근임을 시사한다.

3. 국내 적용을 위한 DIAL 시스템 성능 모의 방법

DIAL 시스템의 성능은 선택된 흡수선의 분광학적 특성뿐 아니라 레이저 송신부, 수신 광학계, 신호 처리부의 통합적 설계에 의해 결정된다. 따라서 본 연구에서는 2장에서 검토한 온도 및 수증기 관측 파장을 대상으로 국내 지상 기반 운용을 가정한 DIAL 시

Table 1. System specifications of DIAL instruments used for temperature and water vapor measurements.

Target	Water vapor						Temperature		
Specification	Spuler <i>et al.</i> , 2015	Späth <i>et al.</i> , 2016	Newsom <i>et al.</i> , 2020	Mariani <i>et al.</i> , 2021	Stillwell <i>et al.</i> , 2025	Hayman <i>et al.</i> , 2026	Stillwell <i>et al.</i> , 2019	Cruikshank <i>et al.</i> , 2024	Stillwell <i>et al.</i> , 2025
Laser type	Diode	Nd:YAG (Ti-Sa.)	Diode	Diode	Diode	Low-power diode	Diode	Diode	Diode
Repetition rate (kHz)	9	0.25	8	10	8	8	7	7	7
Pulse energy (μ J)	5	8000	5.5	9	9	9	5		5
Wavelength (nm)	830	817.7~819.0	911.0, 910.6	911.0, 910.6	828.187, 828.302	828.187, 828.302	769.7958, 770.1085	769.7958, 770.1085	769.7958, 770.1085
Telescope diameter (cm)	40.6	80	Near: 15 Far: 28	–	–	–	40.6	40.6	–
Time resolutions (min)	1~10	1	2~20	20	5	5	30	60	30
Range resolution (m)	150	30~300	100~500	50		7.5	225	300	225
Max range (km)	16.5	4	3	3	3	6	4	3.5	4

시스템의 신호 수준, SNR, 최대 관측 거리 및 측정 오차를 모의 계산하였다. 본 장의 목적은 실제 장비의 최종 설계 사양을 확정하는 것이 아니라, 문헌에 보고된 시스템 사양 범위 내에서 저출력 DIAL 시스템의 적용 가능성과 주·야간 운용 한계를 평가하는 데 있다.

3.1 모의 계산 조건 및 설계 변수

본 연구의 성능 모의 계산 변수는 선행 연구에서 제시한 DIAL 시스템의 보고 사양과 설계 가능성을 함께 고려하여 평가하였다. 먼저 표 1에 정리한 기존 DIAL 시스템의 사양을 검토하고, 각 변수의 최소 및 최대값을 모의 계산의 기본 후보 범위로 사용하였다. 이후 실제 시스템 구현 가능성을 고려하여 지나치게 높은 출력, 과도한 장비 규모, 복잡한 유지관리 조건이 요구되는 조합은 국내 지상 기반 상시 운용 시스템의 초기 설계 조건으로 적합하지 않은 것으로 판단하였다.

본 연구에서는 저출력 다이오드 레이저 기반 DIAL 시스템을 기본 개념으로 설정하고, 펄스에너지, 반복률, 망원경 직경, 빔 발산각, 수신 시야각(field of view: FOV), 필터 대역폭, 시스템 효율 및 적분시간을 주요 모의 변수로 고려하였다. 펄스에너지와 반복률은 송신 광자 수와 직접적으로 관련되며, 망원경 직경은 수신 신호량을 결정하는 핵심 변수이다. 빔 발산각과 FOV는 원거리 신호 확보 및 태양 배경광 유입에 영향을 주며, 필터 대역폭은 신호 투과율과 배경광 억제 성능 사이의 균형을 결정한다.

본 연구에서는 펄스 에너지 5~10 μ J, 반복률 100~9,000 Hz, 망원경 직경 15~40 cm, 빔 발산각 0.3~0.4 mrad 범위에서 검토하였다. 대기 조건은 중위도 표준 대기조건을 기준으로 설정하였으며, 대기 후방산란계수($1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$), 대기 투과도(0.75), 시스템 효율(0.1)은 파장별 상대 비교가 가능하도록 동일한 기준값을 적용하였다. 다만 실제 대기에서는 계절별 수증기 농도, 에어로졸 농도, 구름 및 경계층 구조, 태

Table 2. Simulated performance of the DIAL system under daytime and nighttime background conditions.

Wavelength (nm)	Target	Period	Pulse energy (μ J)	Repetition rate (Hz)	Telescope diameter (cm)	Max. range (km)	SNR	Measurement uncertainty
828	Lower tropospheric water vapor	Daytime	10	9000	40	3.38	2.0	$\pm 2.46 \text{ g kg}^{-1}$
		Nighttime	10	9000	40	5.00	5.4	$\pm 0.92 \text{ g kg}^{-1}$
935	Upper tropospheric water vapor	Daytime	10	9000	40	3.62	2.2	$\pm 2.31 \text{ g kg}^{-1}$
		Nighttime	10	7220	40	5.00	5.4	$\pm 0.93 \text{ g kg}^{-1}$
770	Temperature	Daytime	10	9000	40	3.25	1.9	$\pm 4.10 \text{ K}$
		Nighttime	10	9000	40	5.00	5.1	$\pm 1.57 \text{ K}$

양 고도 등에 따라 신호 수준과 배경 잡음이 달라질 수 있으므로, 본 연구의 결과는 특정 장비의 확정 성능이라기보다 기준 조건에서의 성능 모의로 해석할 수 있다.

본 모의 계산에서 적용된 주요 가정의 불확실성이 결과에 미치는 영향은 다음과 같다. 후방산란계수는 에어로졸이 없는 청정 대기의 대표값으로 (Measures, 1984), 황사 및 고농도 에어로졸 발생시에는 $10^{-5} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 수준까지 증가할 수 있다. 이 경우 근거리에서는 후방산란 신호 증가로 SNR이 향상될 수 있으나, 소산계수 증가로 인해 원거리 신호는 오히려 감소할 수 있어 최대 관측거리에 영향을 줄 수 있다. 중첩함수는 완전 중첩을 가정하였는데, 실제 시스템에서는 근거리에서 불완전 중첩으로 인한 관측 제한이 발생할 수 있으나, 본 연구의 목표 거리 성능 평가에는 영향을 미치지 않는다. 배경광 조건은 Spuler *et al.* (2015)의 기준값을 적용하였으며, 여름철 높은 태양 고도 및 산란광 조건에서는 실제 주간 배경광이 기준값보다 높아져 SNR이 추가로 감소할 가능성이 있다.

3.2 송신 및 수신 신호 계산

온도 및 수증기 연직 관측용 DIAL 시스템의 송신 광학계는 선택된 온라인 및 오프라인 파장에서 충분한 광자 수를 안정적으로 방출하고, 목표 고도까지 신호 손실을 최소화하는 구조로 설계되어야 한다. 송신계의 핵심 요소는 레이저 소자 (파장·출력·반복률), 빔 확장계, 발산각 제어로 구성된다.

파장 선택은 2장에서 도출된 온도용 산소 A-band (770 nm) 및 수증기 대역 (828 nm, 935 nm)의 흡수 특성을 반영하여 결정된다. 송신계는 해당 파장에서 레이저의 선폭 (line width)을 흡수선 폭보다 충분히 좁게 유지해야 하며, 특히 산소 A-band 영역에서는 온도 민감도가 크므로 수 pm 단위의 파장 안정도가 필수적이다.

레이저의 총 신호 (total signal, S_{total})는 단일 펄스 신호 (S_{pulse} , 단위: photons)와 적분 시간 동안의 펄스수 (N_{pulse})에 의해 결정된다 (식 1).

$$S_{total} = S_{pulse}(r)N_{pulse} = S_{pulse}(r)ft_{int} \quad (1)$$

여기서 f 는 반복률 (repetition rate, f , 단위: Hz), t_{int} 는 적분시간 (s)이다. 거리해상도는 레이저 펄스폭 (pulse width, τ , 단위: ns)과 광속 ($c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$)에 의해 결정되며, 적분 시간은 유효 펄스수 (N_{eff})와 반복률로 계산한다.

$$\Delta r = c\tau/2 \quad (2)$$

$$t_{int} = N_{eff}f^{-1} \quad (3)$$

단일 펄스 신호 (S_{pulse})는 펄스당 광자 수 (N_{photon})를 기반으로 계산되며, 레이저의 에너지를 광자 에너지 (E_{photon} , 단위: J/photon)로 나누어 광자 수를 구한다 (Spuler *et al.*, 2015; Measures, 1984). E_{photon} 은 플랑크 상수 (Planck constant, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)와 광속, 파장 (wavelength, λ , 단위: nm)으로부터 계산되며, 모든 에너지량은 μJ 단위로 정량화하였다 (식 4).

$$N_{\text{photon}} = \frac{\text{laser energy}}{E_{\text{photon}}} = \frac{E \cdot \lambda}{h \cdot c} \quad (4)$$

이를 바탕으로 단일 펄스 수신 신호는 다음과 같이 표현된다 (Spuler *et al.*, 2015; Weitkamp, 2005; Measures, 1984) (식 5).

$$S_{\text{pulse}}(r) = N_{\text{photon}} \frac{A\beta(r)\Delta r}{r^2} E_{\text{ins}} E_{\text{geo}} O(r) T^2(r) \quad (5)$$

A 는 망원경 면적 (telescope area, 단위: m^2), β 는 후방산란계수 (backscattering coefficient, 단위: $\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$), E_{ins} 와 E_{geo} 는 각각 장비 효율과 기하효율, $O(r)$ 는 중첩함수 (overlap function), T 는 투과도 (transmittance), 그리고 r 은 목표 거리 (target range, 단위: m)를 의미한다. 본 시뮬레이션에서는 완전 중첩 ($O(r)=1$)을 가정하였으며, 실제 시스템에서는 근거리 관측 한계가 발생할 수 있다 (Spuler *et al.*, 2015; Weitkamp 2005).

수신 광학계는 DIAL 시스템의 성능을 결정하는 핵심 구성요소로서, 후방산란 신호를 최대한 수집하는 동시에 온라인 및 오프라인 파장간 미세한 신호 차이를 정확하게 구분해야 한다는 요구조건을 가진다. 수신계는 일반적으로 망원경, 초점계, 분광 필터링 (optical filtering), 광검출기 (detector)로 구성된다.

수신 신호는 망원경 면적에 비례하므로, 직경이 클수록 신호량이 증가하지만, 시스템 전체의 무게·비용·기계적 안정성 문제가 동시에 증가한다. 또한 직경과 초점이 커질수록 기하학적 중첩효율 (geometrical overlap function) 확보가 어려워져 관측 가능한 최소 고도가 상승하는 문제가 발생한다. 따라서 수신계 최적화는 단순히 큰 망원경을 사용하는 것이 아니라, 목표 고도 범위, 근거리 관측 요건, 예산, 장비 부피 등을 종합적으로 고려하여 적정 직경을 산정하는 것이 핵심이다. 망원경 면적 (A , 단위: m^2)은 직경 (D , 단위: m)으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$A = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (6)$$

분광 필터링 성능 역시 수신계 품질을 좌우하는 중

요한 설계 요소이다. 온라인·오프라인 파장 차이가 수 pm 수준에 불과한 DIAL 특성상, 태양광 배경잡음을 억제하면서도 해당 파장대만 통과시키는 협대역 필터가 필요하다. 필터폭이 넓으면 신호량은 늘어나지만 배경잡음도 함께 증가하므로, 최적 필터 선택은 SNR을 좌우하는 핵심 설계 변수이다.

시야각 (FOV, 단위: mrad)은 배경광을 직접 제어하는 요소로, 일반적인 라이다 시스템에서는 0.3~2.0 mrad 범위에서 고체각을 산정하여 적용한다 (Spuler *et al.*, 2015). 이상의 이론을 바탕으로 본 연구에서는 $\text{SNR} \geq 3$, 관측 거리 5 km를 기준 성능 목표로 설정하고, 동일한 송·수신 조건을 주간 및 야간 배경광 조건에 적용했을 때의 성능 저하와 추가 설계 필요성을 평가하였다.

3.3 배경광 및 SNR 산정

수신 신호에는 대기 후방산란신호 외에도 태양 복사에 의한 배경 노이즈 (background noise, N_B), 검출기 잡음, shot noise 등이 포함된다. 특히 주간 조건에서는 태양 배경광이 SNR 저하의 주요 원인이 되므로, 필터 대역폭과 수신 시야각을 고려하여 N_B 를 산정하였다 (Spuler *et al.*, 2015; Measures 1984).

$$N_B = S_b \Omega_r \Delta f A E_{\text{ins}} \frac{\lambda}{hc} \quad (7)$$

하늘 복사 휘도 (sky radiance, S_b)는 주간과 야간의 값으로 각각 1.15×10^{-3} 과 $5 \times 10^{-5} \text{ Wcm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ 을 사용했다 (Spuler *et al.*, 2015). 필터폭 (filter bandpass width, Δf)은 선행 연구결과를 바탕으로 770 nm, 828 nm, 935 nm 파장에 대하여 각각 0.2 nm (Stillwell *et al.*, 2019), 0.28 nm (Spuler *et al.*, 2015), 0.3 nm (Wirth *et al.*, 2009)로 설정하였다. Ω_r 는 고체각 (solid angle)으로 FOV에 따라 달라진다 (식 8).

$$\Omega_r = \pi \left(\frac{\text{FOV} \times 10^{-3}}{2} \right)^2 \quad (8)$$

3.4 측정 오차 및 성능 평가 기준

본 연구에서는 $\text{SNR} \geq 3$ 을 설계 목표로 설정하였다.

SNR=3은 신호 불확도가 약 33% 수준에 해당하며, 대기 라이다 연구에서 신호 검출 가능성 및 품질 평가를 위한 최소 기준으로 활용되는 값이다(Du *et al.*, 2020; Barton-Grimley *et al.*, 2018). 다만, 실제 관측 성능은 주·야간 배경 복사 조건에 따라 달라질 수 있으며, 최대 관측 거리(r_{max})는 목표거리(r)에서의 SNR이 최소 기준(SNR_{min}) 이상을 만족할 때 확보되는 거리로 정의하였으나(식 9), SNR_{min} 을 달성하지 못할 경우 최적 설계 조건에서 달성 가능한 최대 거리와 해당 거리에서의 산출된 SNR값을 함께 제시하였다.

$$r_{max}=r \quad \text{where} \quad SNR(r) \geq SNR_{min}=3 \quad (9)$$

실제 DIAL 광학계 설계 시에는 레이저 안전성도 반드시 고려해야 한다. 본 연구에서는 ANSI Z136.1-2022 및 IEC 60825-1의 레이저 안전등급 분류체계를 따르며, Class 1 또는 1M eye-safety를 설계 목표로 설정하였다(ANSI, 2022; Spuler *et al.*, 2015).

시뮬레이션의 최종 단계에서는 송·수신 파라미터 조합별 성능을 다중지표 종합 점수화(optimization scoring) 방법으로 평가하였다. 점수에 영향을 주는 요인은 SNR, 최대 관측거리, 레이저 안전성, 비용 효율성, 복잡도이다. SNR 점수는 목표값 3을 기준으로 정규화하였으며, 최대 관측거리 점수는 목표거리 5 km를 기준으로 산정하고 2배 이상 초과한 경우 비현실적인 설계로 간주하여 반영하지 않았다. 비용 효율성 점수는 펄스 에너지, 반복률, 망원경 직경이 증가할수록 감소하도록 했고, 레이저 안전성 점수는 평균 출력과 최대 출력이 안전기준을 초과하지 않는 경우에는 1로, 초과할 경우 0으로 설정하였다. 복잡도는 에너지, 반복률, 망원경 직경이 설정 기준 이상일 경우 감점하는 패널티 방식을 적용했다. 최종 종합점수는 모든 항목을 0~1로 정규화하여 산출하며, 점수가 높을수록 실현 가능성과 성능을 동시에 만족하는 설계로 평가된다.

본 시뮬레이션에서 측정오차는 표준 DIAL 오차 전파 이론에 기반하여 정량적으로 산출하였다. DIAL에서 수증기 수밀도는 온라인(on) 및 오프라인(off) 신호의 차등흡수로부터 다음과 같이 계산된다.

$$n(r) = \frac{1}{2\Delta r \Delta \sigma(r)} \ln \left(\frac{S_{off}(r)}{S_{on}(r)} \right) \quad (10)$$

여기서, Δr 은 거리해상도, $\Delta \sigma(r) = \sigma_{on}(r) - \sigma_{off}(r)$ 은 두 파장에서의 흡수 단면적 차이이다. $\Delta \sigma$ 는 HITRAN 2020으로부터 산출하였으며, 828 nm 파장조합에서 약 $0.9 \times 10^{-22} \text{ cm}^2 \text{ molecule}^{-1}$, 935 nm 파장조합에서 약 $7.0 \times 10^{-22} \text{ cm}^2 \text{ molecule}^{-1}$ 을 적용하였다(Ismail and Browell, 1994). 신호 잡음이 통계적으로 독립이며 포아송 통계를 따른다고 가정하면, 오차 전파법에 의해 수증기 수밀도의 불확도는 다음과 같이 유도된다(Carroll *et al.*, 2022; Wulfmeyer and Bösenberg, 1998; Ismail and Browell, 1989).

$$\delta_n(r) = \frac{1}{2\Delta r \Delta \sigma(r)} \sqrt{\frac{1}{SNR_{on}^2(r)} + \frac{1}{SNR_{off}^2(r)}} \quad (11)$$

따라서, 수증기 농도 오차는 SNR과 온·오프 간 흡수 단면적 차이에 반비례함을 알 수 있다. 계산된 수밀도 불확도는 이상기체 상태방정식을 이용하여 혼합비(g kg^{-1}) 단위로 변환하였다. 산소 A-band를 이용한 온도 오차의 경우에는 흡수 단면적의 온도 민감도($\frac{\delta \sigma}{\delta T}$)는 HITRAN 2020 및 Long *et al.* (2010)의 분광 데이터를 기반으로 산출하였다. 수증기와 동일한 오차 산출 방식에 따라 온도 불확도는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta T(r) = \frac{1}{SNR(r)} \cdot \left| \frac{1}{\partial \sigma / \partial T} \right| \quad (12)$$

4. DIAL 시스템 성능 모의 결과

표 2는 770 nm 산소 A-band 온도 관측과 828/935 nm 수증기 관측 파장에 대해 주·야간 배경광 조건을 구분하여 산출한 DIAL 시스템 성능 모의 결과를 나타낸다. 본 결과는 표 1에 정리한 선행 연구 시스템 사양의 최소-최대 범위와 국내 적용을 위한 시스템

구현 가능성을 함께 고려하여 설정한 변수 범위 내에서 산출된 것이다.

설정된 모의 조건 내에서 펄스 에너지 $10\mu\text{J}$ 와 망원경 직경 40 cm 조건은 모든 파장대에서 공통적으로 높은 수신 신호와 SNR을 제공하는 기준 설계 조합으로 나타났다. 반복률은 935 nm 야간 관측에서 $7,220\text{ Hz}$, 그 외 조건에서는 모두 $9,000\text{ Hz}$ 로 결정되었다. 이는 저출력 다이오드 레이저로 구현 가능한 수준으로, 경제성과 안전성 측면에서 유리한 설계이다. 평균 출력은 최대 0.09 W ($10\mu\text{J} \times 9,000\text{ Hz}$) 수준으로, ANSI Z136.1-2022 레이저 안전 기준의 Class 1M 한계 내에서 운용 가능하다.

관측 성능은 주·야간 시간대별로 현저한 차이를 보였다. 야간 관측에서는 세 파장 모두 목표 관측거리인 5.00 km 에서 $\text{SNR} \geq 3$ 기준을 만족하였으나, 주간에서는 어떤 거리에서도 SNR 설계 목표를 달성하지 못했다. 표 2에 제시된 주간 최대거리는 SNR이 최대가 되는 거리에서의 값으로, 해당거리의 SNR은 $1.9 \sim 2.2$ 에 불과하였다. 이는 태양 복사에 의한 배경 노이즈 증가로 인해 SNR이 감소하여 최대 관측거리에서의 SNR이 설계 목표값을 만족하지 못한 것이다. 하층 수증기 관측(828 nm)의 주간 최대거리는 3.38 km , 상층 수증기 관측(935 nm)은 3.62 km , 온도 관측(770 nm)은 3.25 km 로 나타났다. 주간 관측 성능의 한계는 레이저 출력 부족보다는 태양 배경 복사에 의한 샷 노이즈(shot noise) 증가에 기인하므로, 주간 운용에서는 배경 억제 전략이 핵심 설계 요소이며 야간과는 다른 설계 조건이 필요하다는 점을 시사한다.

측정 오차 측면에서 수증기 관측의 경우, 야간에는 828 nm 에서 $\pm 0.92\text{ g kg}^{-1}$, 935 nm 에서 $\pm 0.93\text{ g kg}^{-1}$ 으로 양호한 성능을 보였으나, 주간에는 828 nm 에서 $\pm 2.46\text{ g kg}^{-1}$, 935 nm 에서 $\pm 2.31\text{ g kg}^{-1}$ 으로 증가하였다. 온도 측정에서는 야간 $\pm 1.57\text{ K}$ 로 WMO 권장 기준($\pm 2\text{ K}$)을 충족하였으나, 주간에는 $\pm 4.10\text{ K}$ 로 기준을 초과하였다. 0.3 mrad 의 좁은 시야각은 태양광 배경 노이즈를 효과적으로 억제하는 데 기여하였음에도 불구하고, 주간 성능 한계는 배경 복사의 절대

적인 크기에 기인하는 것으로 판단된다.

종합하면, 본 모의 결과는 저출력 DIAL 시스템이 야간 조건에서는 5 km 범위의 온도 및 수증기 연직 관측에 적용 가능성이 있음을 보여준다. 그러나 주간 조건에서는 태양 배경광에 의한 SNR 저하가 뚜렷하게 나타나므로, 국내 상시 운용 시스템으로 확장하기 위해서는 주간 배경광 억제가 핵심적인 기술 과제로 판단된다. 특히 국내 환경에서는 여름철 고습, 겨울철 건조, 황사 및 고농도 에어로졸 조건이 계절별로 크게 달라질 수 있으므로, 향후 실제 시스템 설계 단계에서는 파장별 흡수 특성뿐 아니라 배경광, 에어로졸 후방산란, 계절별 수증기 분포를 함께 고려한 검증이 필요하다.

5. 결 론

본 연구는 DIAL 기반 대기 연직 온도 및 수증기 관측 시스템의 국내 적용 가능성을 검토하기 위해, 선행 연구에서 활용된 DIAL 관측 파장과 시스템 사양을 바탕으로 후보 파장을 검토하고, HITRAN 2020 기반 흡수선 분석과 MATLAB 기반 신호 모의 계산을 수행하였다. 본 연구는 개발 완료된 장비의 성능이나 새로운 흡수선 제안을 목적으로 한 것이 아니라, 국내 지상 기반 운용을 고려한 DIAL 파장 선택, 설계 변수, 주·야간 성능 차이 및 적용상의 한계를 평가하는 데 초점을 두었다.

파장 검토 결과, 산소 A-band의 770 nm 대역은 온도 DIAL 관측 후보 파장으로 활용 가능하며, 828 nm 와 935 nm 대역은 수증기의 관측 조건에 따라 상보적으로 활용될 수 있는 후보 파장으로 평가되었다. 828 nm 대역은 온라인·오프라인 파장 간 흡수 단면적 차이가 크고 온도 의존성이 낮아 하부 대류권($0 \sim 5\text{ km}$) 관측에 유리하고, 935 nm 대역은 흡수 강도가 828 nm 대역보다 약 7배 강하여 (Ismail and Browell, 1994), 본 연구의 5 km 야간 모의 결과($\text{SNR } 5.4$)와 선행 연구(Poberaj *et al.*, 2002; Ehret *et al.*, 1993)를 고려

할 때, 자유대기의 낮은 수증기 농도 조건에서도 충분한 신호 확보가 가능한 것으로 판단된다. 따라서 여름철 고습과 겨울철 건조가 뚜렷한 국내 대기 조건에서는 단일 파장만을 적용하기보다, 관측 목적과 목표 고도에 따라 흡수선 강도가 다른 복수 파장 조합을 고려할 필요가 있다.

시스템 성능 모의 결과, 선행 연구 사양 범위와 실제 구현 가능성을 고려한 조건에서 펄스 에너지 10 μJ , 반복률 7,220~9,000 Hz, 망원경 직경 40 cm, 빔 발산각 0.3 mrad의 저출력 다이오드 레이저 시스템이 기준 설계 조합으로 평가되었다. 야간 조건에서는 세 파장 모두 5 km에서 $\text{SNR} \geq 3$ 기준을 만족하였다. 수증기 측정 오차는 828 nm에서 $\pm 0.92 \text{ g kg}^{-1}$, 935 nm에서는 $\pm 0.93 \text{ g kg}^{-1}$ 로 계산되었고, 온도 측정 오차는 770 nm에서 $\pm 1.57 \text{ K}$ 로 나타났다. 이는 태양 배경광 영향이 작은 야간 조건에서는 저출력 DIAL 시스템을 5 km 범위의 온도 및 수증기 연직 관측에 적용할 수 있다는 점을 보여준다.

반면 주간 조건에서는 동일한 송·수신 조건을 적용하였음에도 불구하고, 세 파장 모두 $\text{SNR} \geq 3$ 기준을 만족하지 못하였다. 주간 조건의 배경 복사에 의한 성능 제한이 존재함을 확인하였다. 주간 조건에서의 SNR은 828 nm에서 2.0, 935 nm에서 2.2, 770 nm에서 1.9로 산출되었으며, 측정 오차는 각각 $\pm 2.46 \text{ g kg}^{-1}$, $\pm 2.31 \text{ g kg}^{-1}$, $\pm 4.10 \text{ K}$ 로 증가하였다. 이러한 결과는 주간 태양 배경광에 의한 shot noise 증가가 저출력 DIAL 시스템의 성능을 제한하는 주요 요인임을 의미한다. 따라서 국내 상시 운용 시스템으로 확장하기 위해서는 협대역 필터 적용, 수신 시야각 최적화, 검출 효율 개선, 적분시간 조정 등 주간 배경광 억제를 위한 추가 설계 검토가 필요하다.

본 연구의 결과는 국내 온도 및 수증기 라이다 시스템 구축을 위한 초기 설계 검토 자료로 활용될 수 있으나, 실제 장비 성능을 확정하는 결과로 해석하기에는 한계가 있다. 본 연구는 중위도 표준 대기 조건과 문헌 기반 시스템 변수를 사용한 모의 계산에 기반하였으며, 실제 대기 중 계절별 수증기 분포, 에어

로졸 후방산란, 구름, 경계층 구조, 태양 고도 변화 등은 충분히 반영하지 못하였다. 특히, 주간조건에서는 태양 배경광으로 인한 성능제한이 확인되었으므로, 주간 상시 운용을 위해서는 수신 광학계 설계의 추가 최적화가 선행되어야 한다. 향후 연구에서는 계절별 국내 대기 조건을 반영한 추가 모의 계산, 에어로졸 및 배경광 영향 평가를 거쳐, 시제품 수준의 시스템 구축 및 라디오존데 등 기준 관측 자료와의 비교 검증이 필요하다. 이러한 후속 연구가 수행될 때, 본 연구에서 검토한 파장 조합과 설계 변수는 국내 라이다 기반 연직 온도 및 수증기 관측 시스템의 설계 및 성능평가에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 기상청 국립기상과학원 「국가 기상장비 및 관측자료 표준화(KMA2018-00221)」 사업에 의해 생산된 자료를 활용하였으며, 2024학년도 국립부경대학교의 글로벌 공동연구 지원을 받아 수행된 연구임(202412120001).

References

- Adam, S., Behrendt, A., Schwitalla, T., Hammann, E., Wulfmeyer, V. (2016) First assimilation of temperature lidar data into an NWP model: Impact on the simulation of the temperature field, inversion strength and PBL depth, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(700), 2882-2896. <https://doi.org/10.1002/qj.2875>
- American National Standards Institute (ANSI). (2022) ANSI Z136.1-2022: American national standard for safe use of lasers, Laser Institute of America, Washington D.C. <https://webstore.ansi.org/standards/lia/ansiz136.1-2022>
- Ansmann, A., Riebesell, M., Weitkamp, C. (1990) Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar, *Optics Letters*, 15(13), 746-748. <https://doi.org/10.1364/OL.15.000746>
- Barton-Grimley, R.A., Stillwell, R.A., Thayer, J.P. (2018) High reso-

- lution photon time-tagging lidar for atmospheric point cloud generation, *Optics Express*, 26(20), 26030-26044. <https://doi.org/10.1364/OE.26.026030>
- Behrendt, A., Wulfmeyer, V., Schaberl, T., Bauer, H.-S., Kiemle, C., Ehret, G., Flamant, C., Kooi, S., Ismail, S., Ferrare, R. (2007) Intercomparison of water vapor data measured with lidar during IHOP_2002. Part II: Airborne-to-airborne systems, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24(1), 22-39. <https://doi.org/10.1175/JTECH1924.1>
- Carroll, B.J., Nehrir, A.R., Collins, J.E., Barton-Grimley, R.A., Notari, A. (2022) Differential absorption lidar measurements of water vapor by the High Altitude Lidar Observatory: Retrieval framework and validation, *Atmospheric Measurement Techniques*, 15, 605-626. <https://doi.org/10.5194/amt-15-605-2022>
- Choi, K., Kim, B. (2007, December). Climatological characteristics of tropical cyclones making landfall over the Korean Peninsula. In AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 2007, pp. A43B-1144).
- Crewell, S., Lohnert, U. (2007) Accuracy of Boundary Layer Temperature Profiles Retrieved With Multifrequency Multiangle Microwave Radiometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(7), 2195-2201. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2006.888434>
- Cruikshank, O., Colberg, L., Repasky, K.S., Stillwell, R.A., Spuler, S.M. (2024) Advancement and demonstration of a perturbative retrieval technique for temperature profiling in the lower troposphere using differential absorption light detection and ranging, *Journal of Applied Remote Sensing*, 18(3), 034514. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.18.034514>
- Du, L., Pan, Y., Wang, W. (2020) Random sample fitting method to determine the planetary boundary layer height using satellite-based lidar backscatter profiles, *Remote Sensing*, 12(23), 4006. <https://doi.org/10.3390/rs12234006>
- Ehret, G., Kiemle, C., Renger, W., Simmet, G. (1993) Airborne remote sensing of tropospheric water vapor with a near-infrared differential absorption lidar system, *Applied Optics*, 32(24), 4534-4551. <https://doi.org/10.1364/AO.32.004534>
- Fernald, F.G., Herman, B.M., Reagan, J.A. (1972) Determination of aerosol height distributions by lidar, *Journal of Applied Meteorology*, 482-489. <https://www.jstor.org/stable/26175741>
- Fernald, F.G. (1984) Analysis of atmospheric lidar observations: some comments, *Applied Optics*, 23(5), 652-653. <https://www.jstor.org/stable/26175741>
- Gordon, I.E., Rothman, L.S., Hargreaves, R., Hashemi, R., Karlovets, E.V., Skinner, F., Conway, E.K., Hill, C., Kochanov, R.V., Tan, Y. (2022) The HITRAN2020 molecular spectroscopic database, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 277, 107949. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107949>
- Hayman, M., Stillwell, R.A., Karboski, A., Spuler, S.M. (2026) Signal processing to denoise and retrieve water vapor from multi-pulse-length lidar data, *Atmospheric Measurement Techniques*, 19, 405-420. <https://doi.org/10.5194/amt-19-405-2026>
- Ismail, S., Browell, E.V. (1989) Airborne and spaceborne lidar measurements of water vapor profiles: a sensitivity analysis, *Applied Optics*, 28(17), 3603-3615. <https://doi.org/10.1364/AO.28.003603>
- Ismail, S., Browell, E.V. (1994) Recent lidar technology developments and their influence on measurements of tropospheric water vapor, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 11(1), 76-84. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1994\)011%3C0076:RLTDAT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1994)011%3C0076:RLTDAT%3E2.0.CO;2)
- Kiemle, C., Wirth, M., Fix, A., Ehret, G., Schumann, U., Gardiner, T., Schiller, C., Sitnikov, N., Stiller, G. (2008) First airborne water vapor lidar measurements in the tropical upper troposphere and mid-latitudes lower stratosphere: accuracy evaluation and intercomparisons with other instruments, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(17), 5245-5261. <https://doi.org/10.5194/acp-8-5245-2008>
- Kiemle, C., Quatrevalet, M., Ehret, G., Amediek, A., Fix, A., Wirth, M. (2011) Sensitivity studies for a space-based methane lidar mission, *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(10), 2195-2211. <https://doi.org/10.5194/amt-4-2195-2011>
- Kim, J., Noh, Y. (2023) Study on PM_{2.5} Emission Sources in the Vicinity of Busan Gamman Port using Scanning LIDAR Observation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(4), 535-545. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.4.535>
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2016) 2016 Meteorological Yearbook, <https://www.kma.go.kr> (accessed on Oct. 25, 2025).
- Lee, S.-S., Seo, Y.-W., Ha, K.-J., Jhun, J.-G. (2010) Shift of peak in summer monsoon rainfall over Korea and its association with El Niño-Southern Oscillation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115, D02111. <https://doi.org/10.1029/2009JD011717>
- Lee, E., Lee, E.-H., Choi, I.-J. (2019) Impact of increased vertical resolution on medium-range forecasts in a global atmo-

- spheric model, *Monthly Weather Review*, 147(11), 4091-4106. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0387.1>
- Long, D.A., Havey, D.K., Okumura, M., Miller, C.E., Hodges, J.T. (2010) O₂ A-band line parameters to support atmospheric remote sensing, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 111, 2021-2036. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2010.05.001>
- Long, D.A., Hodges, J.T., Miller, C.E., Lisak, D. (2012) Frequency-dependent Voigt line shape parameterization for accurate retrievals of atmospheric oxygen, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117, D12304. <https://doi.org/10.1029/2012JD017807>
- Madonna, F., Tramutola, E., Sy, S., Serva, F., Proto, M., Rosoldi, M., Gagliardi, S., Amato, F., Marra, F., Fassò, A. (2020) Radiosounding HARMonization(RHARM): A new homogenized dataset of radiosounding temperature, humidity and wind profiles with uncertainty, *Earth System Science Data Discussions*, 2020, 1-38. <https://doi.org/10.5194/essd-2020-183>
- Mariani, Z., Stanton, N., Whiteway, J., Lehtinen, R. (2021) Evaluation of Arctic Water Vapor Profile Observations from a Differential Absorption Lidar, *Remote Sensing*, 13(4), 551. <https://doi.org/10.3390/rs13040551>
- Masunaga, H., Iguchi, T., Oki, R., Kachi, M. (2002) Comparison of rainfall products derived from TRMM microwave imager and precipitation radar, *Journal of Applied Meteorology*, 41(8), 849-862. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041%3C0849:CORPDF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041%3C0849:CORPDF%3E2.0.CO;2)
- McCarthy, M.P., Thorne, P., Titchner, H.A. (2009) An analysis of tropospheric humidity trends from radiosondes, *Journal of Climate*, 22(22), 5820-5838. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2879.1>
- McMillin, L.M., Zhao, J., Rama Varma Raja, M., Gutman, S.I., Yoe, J.G. (2007) Radiosonde humidity corrections and potential Atmospheric Infrared Sounder moisture accuracy, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D13). <https://doi.org/10.1029/2005JD006109>
- McNicholas, C., Turner, D. (2014) Characterizing the convective boundary layer turbulence with a High Spectral Resolution Lidar, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(22), 12910-12927. <https://doi.org/10.1002/2014JD021867>
- Measures, R.M. (1984) *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*, John Wiley & Sons, New York, 510 pp.
- Mendonca, J., Strong, K., Toon, G.C., Wunch, D., Long, D.A., Hodges, J.T. (2019) Improving tropospheric O₂ absorption spectroscopy in the A band for remote sensing applications, *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 35-50. <https://doi.org/10.5194/amt-12-35-2019>
- Nehrir, A.R., Repasky, K.S., Carlsten, J.L., Obland, M.D., Shaw, J.A. (2009) Water vapor profiling using a widely tunable, amplified diode-laser-based differential absorption lidar(DIAL), *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(4), 733-745. <https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1201.1>
- Newsom, R.K., Turner, D.D., Lehtinen, R., Munkel, C., Kallio, J., Roininen, R. (2020) Evaluation of a Compact Broad-band Differential Absorption Lidar for Routine Water Vapor Profiling in the Atmospheric Boundary Layer, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 37(1), 47-65. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-18-0102.1>
- Pincus, R., Batstone, C.P., Hofmann, R.J.P., Taylor, K.E., Glecker, P. J. (2008) Evaluating the present-day simulation of clouds, precipitation, and radiation in climate models, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D14). <https://doi.org/10.1029/2007JD009334>
- Poberaj, G., Fix, A., Assion, A., Wirth, M., Kiemle, C., Ehret, G. (2002) Airborne all-solid-state DIAL for water vapour measurements in the tropopause region: system description and assessment of accuracy, *Applied Physics B*, 75(2), 165-172. <https://doi.org/10.1007/s00340-002-0965-x>
- Sherwood, S., Roca, R., Weckwerth, T., Andronova, N. (2010) Tropospheric water vapor, convection, and climate, *Reviews of Geophysics*, 48(2). <https://doi.org/10.1029/2009RG000301>
- Song, I.H., Park, J.S., Park, S.M., Kim, D.G., Kim, Y.W., Shin, H.J. (2021) Seasonal characteristics of PM₁ in Seoul, Korea, measured using HR-ToF-aerosol mass spectrometer in 2018, *Atmospheric Environment*, 266, 118717. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118717>
- Spuler, S.M., Repasky, K.S., Morley, B., Moen, D., Hayman, M., Nehrir, A.R. (2015) Field-deployable diode-laser-based differential absorption lidar (DIAL) for profiling water vapor, *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(3), 1073-1087. <https://doi.org/10.5194/amt-8-1073-2015>
- Späth, F., Behrendt, A., Muppa, S.K., Metzendorf, S., Riede, A., Wulfmeyer, V. (2016) 3-D water vapor field in the atmospheric boundary layer observed with scanning differential absorption lidar, *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(4), 1701-1720. <https://doi.org/10.5194/amt-9-1701-2016>

- Stevens, B., Brogniez, H., Kiemle, C., Lacour, J.-L., Crevoisier, C., Kiliani, J. (2018) Structure and dynamical influence of water vapor in the lower tropical troposphere, In *Shallow Clouds, Water Vapor, Circulation, and Climate Sensitivity*, Springer, New York, 199-225. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77273-8_10
- Stillwell, R.A., Spuler, S.M., Hayman, M., Repasky, K.S., Bunn, C. E. (2019) Demonstration of a combined differential absorption and high spectral resolution lidar for profiling atmospheric temperature, *Optics Express*, 28(1), 71-93. <https://doi.org/10.1364/OE.379804>
- Stillwell, R.A., Karboski, A., Hayman, M., Spuler, S.M. (2025) Expanding observational capabilities of diode-laser-based lidar through shot-to-shot modification of laser pulse characteristics, *Atmospheric Measurement Techniques*, 18, 4119-4130. <https://doi.org/10.5194/amt-18-4119-2025>
- Tran, H., Hartmann, J.-M., Toon, G.C., Brown, L.R., Frankenberg, C., Warneke, T., Spietz, P., Hase, F. (2008) An improved O₂ A-band absorption model to retrieve atmospheric CO₂ from space observations, *Journal of Geophysical Research*, 113, D18104. <https://doi.org/10.1029/2008JD010011>
- Virman, M., Bister, M., Sinclair, V., Järvinen, H., Räisänen, J. (2018) A new mechanism for the dependence of tropical convection on free-tropospheric humidity, *Geophysical Research Letters*, 45(5), 2516-2523. <https://doi.org/10.1002/2018GL077032>
- Vogelmann, H., Trickl, T. (2008) Wide-range sounding of free-tropospheric water vapor with a differential-absorption lidar (DIAL) at a high-altitude station, *Applied Optics*, 47(12), 2116-2132. <https://doi.org/10.1364/AO.47.002116>
- Wang, H., He, J., Wei, M., Zhang, Z. (2015) Synthesis analysis of one severe convection precipitation event in Jiangsu using ground-based GPS technology, *Atmosphere*, 6(7), 908-927. <https://doi.org/10.3390/atmos6070908>
- Weckwerth, T.M., Weber, K.J., Turner, D.D., Spuler, S.M. (2016) Validation of a water vapor micropulse differential absorption lidar (DIAL), *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(11), 2353-2372. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0119.1>
- Weitekamp, C. (2005) *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*, Springer, New York, 460 pp.
- Whiteman, D.N., Melfi, S.H., Ferrare, R.A. (1992) Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere, *Applied Optics*, 31(16), 3068-3082. <https://doi.org/10.1364/AO.31.003068>
- Wirth, M., Fix, A., Mahnke, P., Schwarzer, H., Schrandt, F., Ehret, G. (2009) The airborne multi-wavelength water vapor differential absorption lidar WALES: system design and performance, *Applied Physics B*, 96(1), 201-213. <https://doi.org/10.1007/s00340-009-3365-7>
- Wulfmeyer, V., Bösenberg, J. (1998) Ground-based differential absorption lidar for water-vapor profiling: Assessment of accuracy, resolution, and meteorological applications, *Applied Optics*, 37(18), 3825-3844. <https://doi.org/10.1364/AO.37.003825>
- Wulfmeyer, V., Hardesty, R.M., Turner, D.D., Behrendt, A., Cadeddu, M.P., Di Girolamo, P., Schlüssel, P., Van Baelen, J., Zus, F. (2015) A review of the remote sensing of lower tropospheric thermodynamic profiles and its indispensable role for the understanding and the simulation of water and energy cycles, *Reviews of Geophysics*, 53(3), 819-895. <https://doi.org/10.1002/2014RG000476>
- Yeo, H., Kim, S.W., Lee, C., Kim, D., Kim, B.-G., Kim, S., Nam, H.-G., Noh, Y., Park, S.J., Park, C.B., Seo, K., Choi, J.-Y., Lee, M.-I., Lee, E. (2016) The KALION automated aerosol type classification and mass concentration calculation algorithm, *Korean Journal of Remote Sensing*, 32(2), 119-131. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2016.32.2.5>
- Zheng, M., Delle Monache, L., Cornuelle, B.D., Ralph, F.M., Tallapragada, V.S., Subramanian, A., Haase, J.S., Zhang, Z., Wu, X., Murphy, M.J. (2021) Improved forecast skill through the assimilation of dropsonde observations from the Atmospheric River Reconnaissance program, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(21), e2021JD034967. <https://doi.org/10.1029/2021JD034967>

Authors Information

문윤기(국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 석사과정) (ansdbsrl12@pukyong.ac.kr)

신주선(국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 박사후연구원) (juseonshin@pukyong.ac.kr)

박민경(국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 석사과정) (minddol8301@gmail.com)

김덕현(국립한밭대학교 기초과학부 정교수) (dhkim7575@hanmail.net)

Sergei Volkov (Center of Laser Atmosphere Sensing, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, staff scientist) (Srgy_volkov@yahoo.com)

노영민(국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 부교수) (nym@pknu.ac.kr)