

1064/532nm 주사형 이중편광라이다시스템 개발과 이를 이용한 대전시 지역 상공 대기 물질의 파장의존성 계측

박 찬 봉*

Development of a 1064/532nm Scanning Depolarization Lidar System and Wavelengths Dependence Measurements of Atmospheric Matters over Daejeon City

Chan Bong Park*

요 약

1064nm 및 532nm의 수직, 수평편광 광을 이용하여 대기물질의 편광비를 동시 계측할 수 있는 주사형 이중 편광라이다 시스템을 개발하고 이를 이용하여 목원대학교를 기점으로 4km 이내의 대전시 유성지역 상공의 대기물질 편광비를 60도 회전주사계측 하였다. 본 주사계측의 맵핑 결과로써 라이다의 1064nm 편광비 분포는 532nm 편광비와 지역적인 많은 차이를 나타내는 것을 알 수 있었으며, 두 편광비의 비인 RDR값을 분석하여 532nm 편광비만을 단독으로 계측할 때는 분석이 불가능한 먼지, 오염물질 및 구름의 파장의존성을 알 수 있었다. 지역적으로 3km 이하의 구간에서는 RDR 값이 0.82~1.37의 값을 나타내어 오염물질과 먼지가 분포하는 것으로, 3km~4km구간에서는 3.77의 값을 나타내어 구름이 분포하는 것으로 분석되었다.

Abstract

In this study, we developed a scanning dual polarization lidar system that can measure the 1064nm and 532nm depolarization ratio of atmospheric matters over Yusung area in Daejeon city. Using this system, the depolarization ratios within 4km distance from Mokwon University was measured by 60o scanning. As a result of the mapping of this scanning measurement, the 1064nm depolarization ratio distribution shows a large regional difference from the 532nm depolarization ratio. By analyzing the RDR value, which is the ratio of the two depolarization ratios between 1064nm and 532nm, the wavelengths dependence of dust, pollutants and clouds, which cannot be analyzed when only the 532 nm polarization ratio is measured, was analyzed. Regionally, the RDR value was 0.82 to 1.37 in the section of 3km or less indicating that pollutants and dust were distributed and 3.77 in the 3km to 4km section, indicating cloud distribution.

Keywords

lidar, depolarization ratio, scanning measurement, atmospheric remote sensing, aerosols, air pollution

* 목원대학교 전기전자공학과 교수

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7789-264X>

· Received: Aug. 16, 2022, Revised: Sep. 04, 2022, Accepted: Sep. 07, 2022

· Corresponding Author: Chan Bong Park

Dept. of Electronics Engineering, College of Engineering, Mokwon University, 88 Doanbuk-ro, Seo-gu, Daejeon, Korea

Tel.: +82-42-829-7657, Email:cbpark@mokwon.ac.kr

1. 서 론

최근 온난화에 따른 각종기상이변과 대기유해물질 (황사, 미세먼지, 오염가스)에 의한 사회·경제적 피해가 보고되면서 대기환경 관측결과에 대한 일반인의 관심도 매우 증가되고 있다. 고도 1~2km 이하에 대기 중에 존재하는 각종 물질은 크게 입자상 에어로졸과 먼지, 가스물질, VOC(Volatile Organic Carbon), 수증기 및 구름 등으로 분류되며 이들 물질은 배출원의 위치 및 종류 그리고 기상조건에 따라 지역적으로 많은 분포 변화를 가진다[1][2].

이러한 대기 중 물질을 계측하는 각종 계측기로서 일반적으로는 측정시료를 장치 내로 흡입하여 분석하는 샘플러(PM10, PM2.5) 및 반도체센서가 가장 많이 사용되고 있으나[3][4], 이들 계측기는 그 측정범위가 측정기 주변에 제한되는 단점으로 인하여 최근에는 수십 미터~수 km까지 원거리측정이 가능한 광·원격 계측기가 원거리 대기측정용으로 많이 사용되고 있다. 이들 광·원격 계측기로는 FTIR(Fourier Transform InfraRed), DOAS(Differential Optical Absorption Spectroscopy), TDLAS(Tunable Diode Laser Spectroscopy) 및 라이다(LIDAR, Light Detection and Ranging)등이 있다[5][6].

이중 라이다는 가·측정거리가 수 미터에서 최대 수십 km로 길고, 농도의 거리별 계측이 가능하며, 파장이 짧은 레이저를 사용하여 거리 및 시간분해능이 상대적으로 높다는 장점을 가진다. 라이다 종류로는 대기계측 물질에 따라 입자상 물질은 미-산란 라이다(Mie-Scattering), 가스측정용 차분흡수라이다(DIAL, Differential Absorption Lidar), 수증기측정 라만라이다(Water vapor raman Lidar), 구름측정라이다(Cloud Lidar) 등이 있으며[7][8] 기술적으로는 여러 파장을 동시에 사용하는 다파장 라이다(Multi-wavelengths Lidar), 편광측정이 가능한 편광라이다(Depolarization Lidar) 및 대기분자의 직접계측이 가능한 HSRL(High Spectral Resolution Lidar)등이 있다 [9][10]. 최근에는 2-3종의 다파장을 사용하는 미산란-편광 라이다가 많이 개발되고 있는데 이는 다파장을 사용할 경우 대기물질 광학적 특성의 파장의존성 측정이 가능하고 대기물질의 형태(구형,비구형) 계측에 따른 대기물질의 종류 구분이 가능하

는 장점을 가지기 때문이다[11][12].

국내에서는 90년대 초반부터 미-산란 라이다가 개발되었으며 최근까지 다수의 연구그룹에 의해 미-라만 방식 및 미-편광방식 라이다를 이용한 대기물질 계측연구가 진행되어왔다[13][14]. 하지만 위의 계측연구들은 주로 대기물질의 수직분포 혹은 일정 직선거리의 경사계측에 대한 연구로써 측정지역이 레이저 발산각 주변의 좁은 공간으로 제한된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 최근 회전주사계측(Scanning)방식을 이용한 라이다시스템의 개발과 이를 이용한 먼지 및 대기오염가스물질의 공간맵핑 연구가 국내·외에서 활발히 진행되고 있다[15]-[17]. 회전주사계측 방식은 넓은 영역에서의 배출원 위치 및 주변기상환경(바람, 온도, 습도)에 따른 대기물질의 공간 분포의 변화를 측정할 수 있다는 장점을 가지므로 지역별로 차별화된 대기질(Air quality) 예보에 매우 효율적이다.

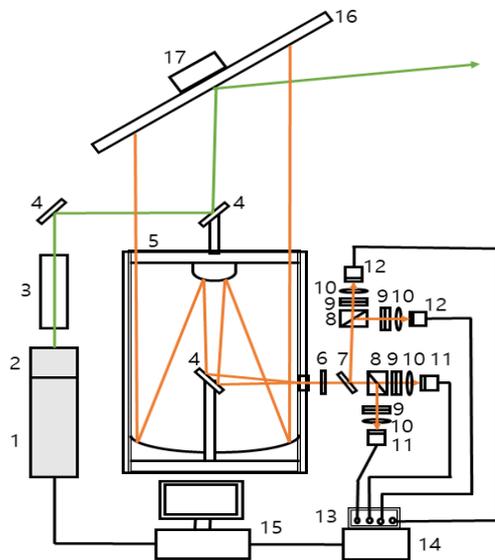
본 연구는 기존의 연구에 사용된 532nm 미-편광 라이다[15]를 532nm 및 1064nm의 두 파장의 편광계측이 가능한 이중편광 라이다 시스템으로 재개발하고 이를 이용하여 대전 유성지역 상공의 대기물질을 회전주사 계측하여 맵핑한 결과에 대한 것으로써 최종적으로 대기물질의 파장의존성 및 지역별 분포변화를 분석하였다. 본 연구는 국내에서 최초로 시도된 이중편광파장을 사용한 대기물질의 회전주사계측 분석에 대한 것으로서 추후 대기물질 맵핑 분석에 의한 지역별 동네 대기질 예보에 바로 적용이 가능한 기술이다. 또한 개발된 다중파장 편광 계측 기술은 라이다 탑재 자동차의 악기상 조건을 고려한 자율주행 기술, 위성간 레이저통신, 및 위험가스 계측 기술에도 활용될 것으로 기대된다.

II. 라이다시스템 및 알고리즘

2.1 이중편광 라이다시스템의 구성

본 연구에 사용된 라이다 시스템은 이중편광 라이다로서 532nm 및 1064nm 각각 파장의 수직, 수평편광 계측이 가능한 시스템이다. 그림 1은 본 라이다 송수신 및 신호처리 시스템의 전체 구성도를 나타내고 있다.

송신 시스템은 1064nm 발진의 Surelite III-10 Nd:YAG 고체 레이저를 기본으로 532nm 생성을 위한 2차고조파 발생기(SHG, Second Harmonic Generator), 송신광의 편광도를 조정하기 위한 편광기(Polarizer), 송신광의 단위면적당 파워를 줄이고 송신광의 발산각을 줄이기 위한 빔확산기(Beam expander)로 구성되어 있다. 빔확산기를 통과한 후 레이저광은 약 36mm의 직경을 가지며 전반사경 및 주사 반사경을 거쳐 망원경의 시야각과 동일한 축(Coaxial)을 가지고 대기 중으로 조사된다. 이때 레이저광의 발산각은 약 0.6~0.8mrad 이다. 주사반사경은 광의 송신 및 수신에 모두 사용되며 크기는 500×800mm이고 532nm, 1064nm에서 각각 92%, 90.6%의 반사율을 가지도록 설계 제작되었다.



1. Nd:YAG 레이저와 2차고조파 발생기, 2. 편광기, 3. 빔확산기, 4. 전반사경, 5. 망원경, 6. 초점렌즈, 7. 다이크로익 필터, 8. 편광필터, 9. 간섭필터, 10. 렌즈, 11. 광전증배관, 12. 어벌런치 포토 다이오드, 13. 증폭기, 14. A/D 변환기, 15. 데이터처리기(PC), 16. 주사반사경, 17. 모터기동기
1. Nd:YAG laser with second harmonic generator, 2. Polarizer, 3. Beam expander, 4. Total mirror, 5. Telescope 6. Focusing lens, 7. Dichroic filter, 8. Polarization filter, 9. Interference filter, 10. lens, 11. PMT, 12. APD, 13. Amplifier, 14. A/D Converter, 15. Data processor(PC), 16. Scanning mirror, 17. Motor actuator

그림 1. 라이다 시스템의 구성도

Fig. 1. Block diagram of the Lidar system

주사 반사경은 2개의 모터기동기(Actuator)에 의해 회전기동되며 회전각도는 수평 0~270도, 수직 0~90도이다. 실제 계측시 반사경의 수직, 수평 회전각도 및 회전속도는 주사망원경 제어 프로그램에 의해 설정된 후 레이저와 연동되어 운전된다.

대기에 조사된 레이저광의 대기물질 산란반응에 의한 후방산란광은 회전 반사경 및 망원경에 의해 집광된다. 망원경의 구조는 뉴토니안 방식이며 주반사경(Primary mirror) 및 부반사경(Secondary mirror)의 지름은 각각 300mm, 100mm이다. 망원경의 시야각 (FOV, Field of View)은 0.3~6.4mrad 범위내에서 조정하여 사용이 가능하다. 망원경 내부의 전 반사경을 통과한 광은 망원경 옆면의 핀홀(Pin hole) 및 렌즈(Lens)를 통과하여 분광기로 입사된다. 분광기는 송신파장과 동일한 532nm 및 1064nm 파장의 수직/수평 편광성분을 각각 걸러내어 검출할 수 있도록 4채널로 구성되었다.

표 1. 라이다 장치의 제원

Table 1. Specification of the Lidar system

Transmitting system	
Laser : Surelite III-10 with SHG	
Output : 220mJ @532nm, 470mJ @1064 nm	
Repetition Rate: 10Hz	
Second Harmonic Generator : type I for 532nm	
Polarizer : 0°/90°	
Beam Expander :	
Beam divergence : 0.6-0.8 mrad	
Receiving system	
Telescope : Newtonian type	
Primary Mirror Diameter, 300mm	
Secondary Mirror Diameter, 100mm	
FOV, 0.3-6.4 mrad	
Spectrometer	
Channels : 532s and 532p	
1064s and 1064p	
Interference Filter: 2nm(Wavelength width)	
Detector : PMT, Hamamatsu-H6780 @532 nm	
APD, Licel-APD-1.5 @1064nm	
Signal Acquisition ADC	
LeCroy-LT264, 4 channels	
60MHz, 12bits	
Scanning mirror system	
Mirror Size: 500×800 mm, Material: BF33 Al coating	
Reflectance: 92% @532nm, 90.6 @ 1064nm	
Rotation angle: 0 - 360° (Rotation), 0 - 90° (Elevation)	

분광기로 입사된 Dichroic Filter에 의해 532nm, 1064nm 파장으로 나뉘지게 되며 이후 편광필터(Polarization filter)를 거쳐 각 파장의 수직/수평 편광 성분 광으로 나뉘지게 된다. 이후 파장폭 2nm의 협대역 필터(Interference filter) 및 렌즈를 거쳐 최종적으로 검출기에 의해 검출된다. 532nm 검출기로는 광전증배관(PMT, Photo Multiplier Tube)을 1064nm 검출기로는 어벌런치 광다이오드(APD, Avalanche Photo Diode)를 각각 사용하였다. 표 1은 본 시스템에 사용된 라이다장치의 주요제원을 나타내고 있다. 검출기에서 광전변환된 전기적 신호는 증폭기(Amplifier)를 거친 후 60MHz 12bit의 ADC(Analog Digital Converter) 변환기에 의해 거리별 신호의 세기 값으로 신호 처리된다.

2.2 데이터 처리 알고리즘

분광기에서 검출되는 채널별 라이다 신호의 세기(Power)는 Beer의 법칙을 기본으로 하는 다음의 라이다 식 (1)과 같다[18].

$$\begin{aligned}
 P(\lambda, r) &= (A(\lambda)C(\lambda))/r^2 \cdot B(\lambda, r) \cdot E(\lambda, r) \\
 B(\lambda, r) &= (\beta_a(\lambda, r) + \beta_m(\lambda, r)) \\
 E(\lambda, r) &= \exp\left[-2 \int_0^z ((\sigma_a(\lambda, r') + \sigma_m(\lambda, r')) dr')\right]
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

위의 식 (1)에서 P는 파장 및 거리에 따르는 수신신호의 세기이며, C(λ)는 라이다장비의 전체 광학적 상수, A(λ)는 레이저출력의 세기, r은 거리이며, λ는 레이저광의 파장을 나타낸다. 대기 변수로써 β_a는 입자의 후방산란계수이며 β_m은 공기분자의 후방산란계수이다. α_a는 입자의 소멸계수 이며 α_m은 공기분자의 소멸계수이다.

대기 중 분포하는 물질의 구형, 비구형 정도를 나타내는 편광비(Depolarization ratio)의 계산식은 다음 식 (2)와 같다[19].

$$\delta(\lambda, r) = G \frac{P_{\perp}(\lambda, r)}{P_{\parallel}(\lambda, r)}
 \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 P_{\perp} &= (A_{\perp}(\lambda)C_{\perp}(\lambda))/r^2 \cdot B_{\perp}(\lambda, r) \cdot E_{\perp}(\lambda, r) \\
 P_{\parallel} &= (A_{\parallel}(\lambda)C_{\parallel}(\lambda))/r^2 \cdot B_{\parallel}(\lambda, r) \cdot E_{\parallel}(\lambda, r)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

식 (2)에서 P_⊥는 수신신호 중 수직편광성분 신호의 세기를 P_∥는 수신신호 중 수평편광성분 신호의 세기를 나타내며 각각 식 (3)과 같다. G는 본 라이다 장치의 분광기, 검출기 및 증폭기를 포함한 수직, 수평 채널 각각에서의 광학적 감도(Sensitivity)의 비이다. 동일한 파워 및 편광도를 가지는 레이저 광을 각각의 수직, 수평편광 채널에 입사시킨 후 증폭기 뒷단의 오실로스코프에서 계수된 신호를 비교하여 얻어진 G값은 532nm 채널에서 1.92, 1064nm 채널에서는 1.43이다. 1064nm 편광비와 532nm 편광비의 비인 파장의존성 값 RDR의 계산을 위한 식은 (4)와 같다.

$$RDR(\lambda, r) = \frac{\delta_{1064nm}(\lambda, r)}{\delta_{532nm}(\lambda, r)}
 \tag{4}$$

본 알고리즘을 이용한 편광비 및 RDR 값을 계산하기 위한 신호처리의 사전과정으로써 배경광잡음(Background noise) 및 신호유도잡음(Signal induced noise)을 채널별 신호에서 각각 계산 후 제거하였다. 배경광 잡음과 신호유도잡음은 전 계측거리에서 같이 존재하므로 본 처리에서는 SNR(Signal Noise Ratio)가 5이하인 거리부터 최대측정거리인 12km 까지 범위내의 수신신호에 대한 Multiple regression fitting을 통해 얻어진 배경광 잡음과 신호유도잡음을 원신호에서 차감하여 제거하였다.

III. 대전시 지역 상공의 에어로졸의 계측

본 532nm, 1064nm 이중편광 주사형 라이다 시스템을 이용하여 대전 유성지역 상공의 대기 에어로졸의 편광비를 측정하였다. 본 계측은 서구 도안동에 위치한 목원대학교 산학협력단 창업보육센터 건물을 기점으로(36.324439N, 127.337885E)하여 유성구 덕송초등학교(36.358750, 127.318653)를 회전원점(0도)를 하여 우측으로 수평 60도 회전 계측하였다.

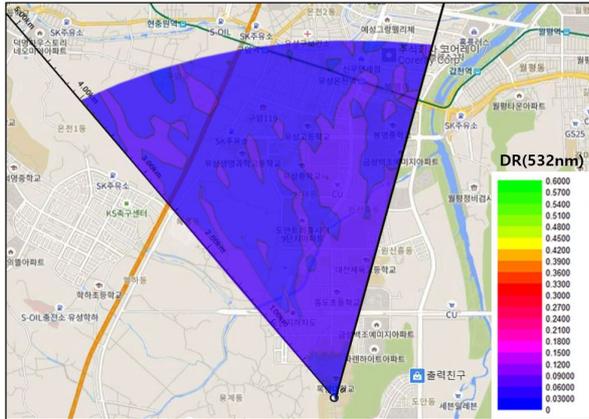


그림 3. 2022년 01월 09일 유성지역 상공 532nm 편광비 분포의 주사계측

Fig. 3. Scanning measurement of 532nm depolarization ratio on Jan. 09, 2022 over Yuseung, Daejeon city

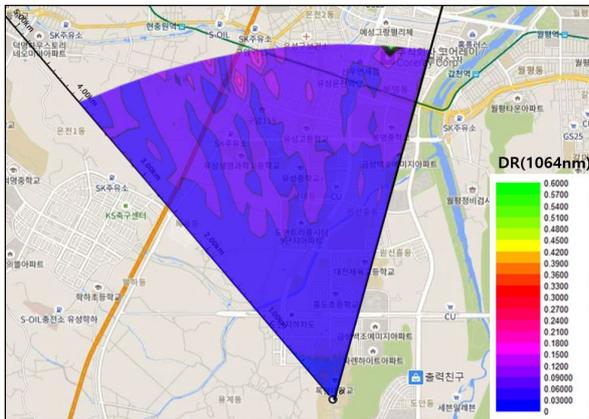


그림 4. 2022년 01월 09일 유성지역 상공 1064nm 편광비 분포의 주사계측

Fig. 4. Scanning measurement of 1064nm depolarization ratio on Jan. 09, 2022 over Yuseung, Daejeon city

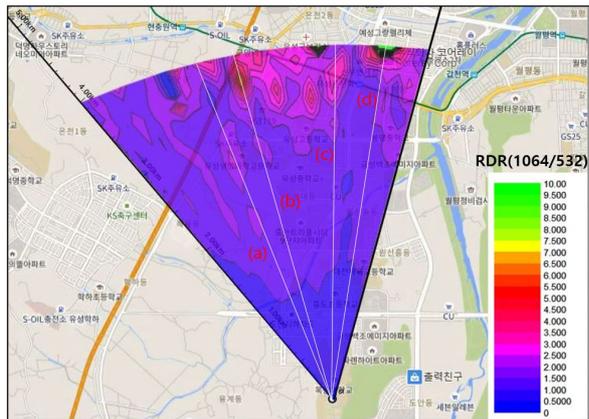


그림 5. 2022년 01월 09일 유성지역 상공 RDR 분포
Fig. 5. RDR distribution Measured on Jan. 09, 2022 over Yuseung, Daejeon city

10Hz 송신 레이저와 동기화 된 회전주사 계측시간은 2도 회전당 1분으로 총 60도 계측에 소요된 시간은 30분이며 얻어진 프로파일은 총 30개이다. 레이저 송신 수직각도는 관측기점의 근거리에서 위치한 건축물(아파트)을 회피하기 위해 10도로 설정하였다. 1개의 프로파일당 거리분해능은 12m이며 최대 12km 까지 데이터를 얻었으나 배경광 및 신호 유도 잡음 제거 후 532nm, 1064nm 전 채널에서 신호의 통계적 오차(Statistical error)가 10% 미만인 4km까지만 데이터로 표출하였다. 60도 회전 계측을 통해 각각의 파장에서 얻어진 30개의 편광비 프로파일 데이터를 Contour 데이터 처리 후 대전시내의 지도에 오버랩하여 대전상공의 에어로졸 편광비 분포를 맵핑하였다.

본 시스템은 주야간 계측이 가능하나 배경광 크기의 제한으로 계측은 야간에 진행하였다. 본 계측 시 기상조건으로 기상청 미세먼지 분포는 PM10 기준으로 $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 낮은 값을 보였으며 흐리고 낮은 구름이 있는 상태였다. 그림 3, 4는 2022년 1월19일 저녁9시부터 9시30분까지 30분동안 계측된 532nm 및 1064nm의 편광비 분포를 나타내고 있다. 그림 5는 1064nm 편광비와 532nm 편광비의 비인 파장의존성 값 RDR을 나타낸 것이다.

IV. 계측자료의 분석 및 검토

그림 3에서 532nm의 편광비 값은 전체지역에서 0.01~0.10(1~10%)내의 값을 나타내었으며 전체평균 값은 0.048(4.8%)이다. 관측기점을 중심으로 원신흥동-봉명동-유성온천역 방향에서 기타 지역보다 약 2~3%정도의 높은 값을 나타내고 있다. 기존의 보고에 의하면 532nm의 편광비[%]의 경우 스모그나 오염가스의 경우는 0.2~10%, 바이오메스의 경우는 7~13%, 스모크와 먼지의 경우 12~55% 정도로 보고되고 있다[17]. 하지만 water cloud의 경우에도 1~15%의 값을 cirrus cloud 경우에도 그 두께에 따라 5%~60%의 값을 가지므로[20] 532nm 단일 파장에 의한 대기성분 물질의 분류에는 한계를 가진다.

그림 4에서 1064nm의 편광비는 그림 3의 532nm 편광비와는 매우 상이한 분포값을 나타내었다.

전체지역에서에서는 약 0.03~0.25(1~25%)의 값을 가지며 평균값은 0.064(6.4%)이다. 관측기점을 중심으로 2.5km이하에서는 평균 0.043(4.3%)의 값을 2.5~4km 지역에서 0.083(8.3%)으로 높은 값을 나타내었으며. 특히 3.5km 이상에서의 특정지역에서는 0.2~0.6(20~60%)이상의 높은 값을 나타내기도 하였다. 대기 물질의 종류에 따른 편광비의 파장 의존성에 관한 보고에 따르면 입자가 적고 구형인 오염입자(Pollutant matter)의 경우 532nm를 기준으로 파장이 증가할수록 편광비는 감소하며, 입자가 크고 비구형인 먼지(Dust)혹은 cirrus cloud의 경우 파장이 증가할수록 편광도도 비례하여 커진다[21][22].

그림 5는 식 (4)에 의해 계산된 파장의존성 RDR값의 분포를 나타내고 있다. 그림에서 파란색의 부분은 RDR 1이하의 값을 나타내고 있으며 이는 1064nm의 편광비가 532nm의 편광비 보다 낮은 것이다. 관측기점에서 1.5km 이내에서 RDR의 평균값은 0.827 이고, 1.5~3km의 지점에서의 평균값은 1.358, 3km 이상의 RDR 값이 큰 지역에서의 평균값은 5.08로 매우 크게 나타났다. 이러한 큰 값은 그림 5에서 초록색으로 표시된 RDR값이 10이상인 지역이 부분적으로 존재하기 때문이다. 그림 RDR 값의 프로파일 별 분포변화를 4개의 개별 프로파일을 선택하였다. 그림 6, 7, 8, 9는 그림 5의 (a), (b), (c), (d)로 표시된 프로파일에서의 RDR 값 및 532nm, 1064nm의 편광비의 값을 나타내고 있다. 이때 회전각도는 각각 20도, 26도, 44도, 52도 이다.

그림 6의 회전각도 20도 계측 프로파일의 경우 1064nm와 532nm 편광비가 0.1(10%) 이내로 낮으며 RDR값도 1보다 낮은 구간(1.7km이하, 3.5~3.75km)과 높은 구간(1.75~3.4km)이 교차하여 나타난다. 이는 기존의 보고들과 비교 할 때 대기 오염물질과 약한 먼지의 입자상 물질이 혼재되어 분포하여 나타난 것으로 보인다.

그림 7의 회전각도 26도의 계측에는 3.1km 이하의 구간에서는 20도의 프로파일과 비슷한 1064nm와 532nm 편광비값을 나타내고 있으나 3.1km 이상의 구간에서 1064nm의 편광비가 증가하며 동시에 532nm의 편광비는 감소하여 RDR의 값은 3.25km이상에서 5이상 최대 11의 값을 나타내고 있다.

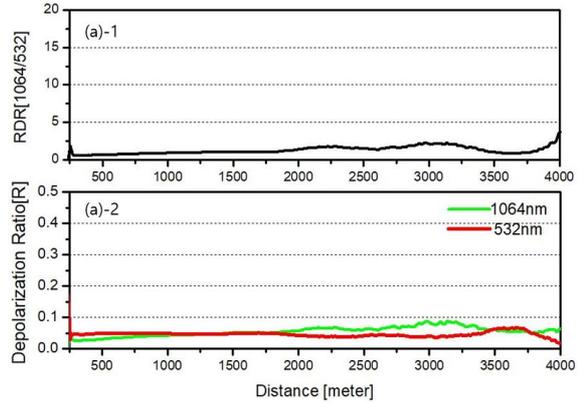


그림 6. 회전각도 20도에서의 RDR (a)-1과 1064nm, 532nm 편광비, (a)-2 프로파일
Fig. 6. Profiles of RDR (a)-1 and 1064nm, 532nm depolarization ratio, (a)-2 at rotation angle 20°

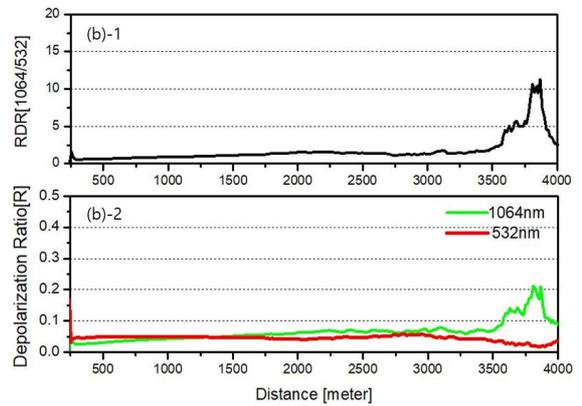


그림 7. 회전각도 26도에서의 RDR (a)-1과 1064nm, 532nm 편광비, (a)-2 프로파일
Fig. 7. Profiles of RDR (a)-1 and 1064nm, 532nm depolarization ratio, (a)-2 at rotation angle 26°

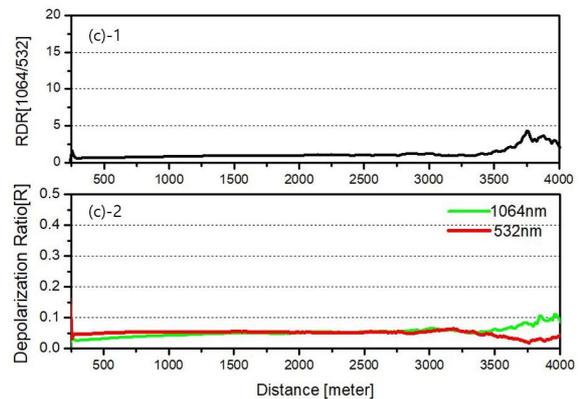


그림 8. 회전각도 44도에서의 RDR (a)-1과 1064nm, 532nm 편광비, (a)-2 프로파일
Fig. 8. Profiles of RDR (a)-1 and 1064nm, 532nm depolarization ratio, (a)-2 at rotation angle 44°

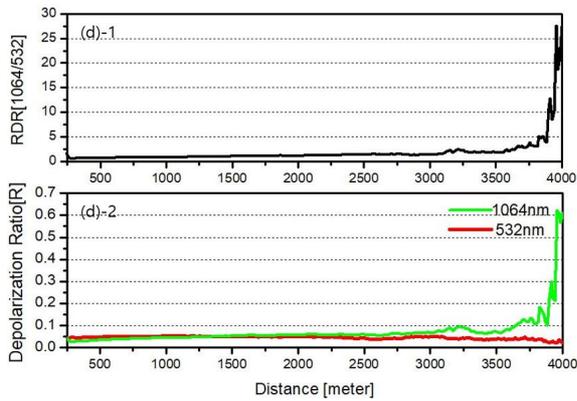


그림 9. 회전각도 52도에서의 RDR (a)-1과 1064nm, 532nm 편광비, (a)-2 프로파일
 Fig. 9. Profiles of RDR (a)-1 and 1064nm, 532nm depolarization ratio, (a)-2 at rotation angle 52°

1064 nm 편광비의 증가 0.1~0.2(10~20%)의 경우에는 cloud 혹은 먼지에 의한 영향으로 분석되나 같은 구간에서 532nm 편광비의 감소가 이루어지므로 이는 먼지에 의한 증가 보다는 water cloud의 경우로 분석된다. 먼지의 경우나 cirrus cloud의 경우에는 구름의 두께 및 입자의 크기에 따라 다르긴 하나 일반적으로 구름의 표면에서 1064nm와 532nm의 편광비는 동시에 증가한다.

그림 8의 회전각도 44도의 경우에도 3.3km 이하의 구간에서 RDR은 2이하의 낮은값을 나타내고 있다. 이후 3.35km 이상의 구간에서는 1064nm 편광비는 증가 532nm는 감소하는 경향을 나타내며 값은 두 편광비 모두 그리 크지 않아 RDR은 5이하의 값을 나타내지만 역시 water cloud에 의한 값으로 보인다.

그림 9의 회전각도 52도의 경우에는 3.2 km이상의 구간에서 1064nm의 편광비가 급격히 증가하면서 3.9km구간에서 약 0.6(60%)의 매우 큰 편광비를 나타내고 있다. 같은 구간에서 532nm는 0.05(5%)이하의 값을 나타내고 있다. RDR값은 5이상으로 약 26의 최대값을 나타내고 있다. 이러한 1064nm 편광비의 증가 532nm 편광비의 감소는 그림 7, 8의 3.5 km이상에서의 변화와 같은 경향이나 1064nm의 값이 60%이상으로 매우 크게 나타난 것은 일반적인 water cloud의 경우로 보기에 매우 큰 값이다. 이의 높은 값에 대하여서는 구름 물방울 입자크기, 입자의 수, 구름 내부에서의 다중산란효과 혹은 라이

다 장치의 FOV값 설정, 송수신 광축의 불일치 등 [19]의 다양한 해석이 가능하나, 실제 어떠한 영향에 의한 것인지는 좀 더 분석이 필요해 보인다.

표 2는 1064nm, 532nm 편광비의 값과 RDR값의 결과에서 1064nm 편광비가 높은, 532nm 편광비가 높은, RDR값이 높은 지역을 거리별 구간으로 정리한 것이다. 지역별로 다소 분포의 차이는 있으나 평균적으로 1.5km 이하의 구간에서는 RDR값이 0.82 이하로 532nm의 편광비가 1064nm의 편광비보다 높은 분포를 보였으며 1.5~3km구간에서는 RDR값이 1.37으로 1064nm 편광비가 532nm 편광비보다 높은 값을 3~4km 구간에서는 RDR값이 3.77로 1064nm 편광비가 상대적으로 매우 높은 값을 나타내었다. 이는 기존의 계측보고와 비교할 때 3km 이하의 구간에서는 지역 오염물질과 먼지가 혼재하며 3km이상에서는 이들 물질과 동시에 구름이 지역별로 분포하는 것으로 보인다.

표 2. 대전 유성지역 상공 532nm, 1064nm 편광비 및 RDR의 값의 분포

Table 2. Distribution of 1064nm, 532nm depolarization ratio (DPR) and RDR over Yuseung area, Daejeon city

Range	Average of 532nm DPR	Average of 1064nm DPR	Average of RDR
< 1.5km	0.05	0.04	0.82
1.5 - 3km	0.045	0.06	1.37
3km - 4km	0.032	0.10	3.77

V. 결 론

본 연구에서는 1064nm 및 532nm 의 수직, 수평 편광 광을 이용하여 대기물질의 편광비를 계측할 수 있는 주사형 이중편광라이다 시스템을 구성하고 이를 이용하여 대전 목원대를 관측기점으로 4km 이내의 유성지역 상공의 편광비를 60도 회전 주사계측 하였다. 본 계측의 결과로써 라이다 1064nm 편광비는 532nm 편광비와 지역적으로 많은 차이를 나타내는 것을 알 수 있었다. 또한 1064nm 편광비와 532nm의 편광비를 비교한 RDR 값을 분석하여 532nm 편광비만을 단독으로 계측할 때는 분석할 수 없었던 오염물질 혹은 구름의 파장의존성도 알 수 있었다.

기존의 계측보고와 본 계측결과를 비교하여 분석하였을 때 지역적으로 3km 이하의 구간에서는 대기오염물질과 먼지가 혼재하며 3km 이상에서는 지역적으로 낮은 구름이 존재하는 것으로 보인다. 하지만 구름의 경우 1064nm의 편광비가 기존의 보고와 비교하여 비교적 높은 값을 나타내는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 시스템의 구성 및 잡음 제거 과정에 따른 시스템오차(Systematical error) 및 신호의 통계적오차(Statistical error)에 기인한 것으로 보인다. 본 시스템 및 계측결과의 정확성을 검증하기 위해서는 위의 오차요인에 대한 정밀한 분석과 더불어 동일한 편광도 및 RDR값을 도출할 수 있는 기타장치에 의한 비교검증이 필요하며 이는 앞으로 추가 진행되어야 할 과제이다.

본 연구는 기존의 대기물질의 수직측정과는 차별화된 회전주사형 이중편광방식 라이다에 의한 대기물질의 측정으로 앞으로 다중과장을 이용하여 대기물질의 종류를 분별하는 연구에 많은 도움이 될 것으로도 기대한다.

References

- [1] R. B. Husar, J. M. Prospero, and L. L. Stowe, "Characterization of tropospheric aerosols over the ocean with the NOAA advanced very high resolution radiometer optical thickness operation product", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, No. 14, pp. 16889-16909, Jul. 1997.
- [2] R. L. Miller, I. Tegen, and J. Perlwits, "Surface radiation forcing by soil dust aerosols and hydrological cycle", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, No. 4, pp. D04203, Feb. 2004. <https://doi.org/10.1029/2003JD004085>.
- [3] G. F. Fine, L. M. Cavanagh, A. Afonja, and R. Binions, "Metal oxide semi-conductor gas sensors in environmental monitoring", *Sensors*, Vol. 10, No. 06, pp. 5469-5502, Jun. 2010. <https://doi.org/10.3390/s100605469>.
- [4] S. E. Shin, C. H. Jung, and Y. P. Kim, "Analysis of the Measurement Difference for the PM10 Concentrations between Beta-ray Absorption and Gravimetric Methods at Gosan", *Journal of Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 11, No. 7, pp. 846-853, Nov. 2011. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.04.0041>.
- [5] J. Wang, W. Gu, W. Qi, C. Li, D. Chen, G. Adedokun, L. Xu, and F. Wu, "A Fully Integrated Gas Detection System With Programmable Heating Voltage and Digital Output Rate for Gas Sensor Array", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 21, No. 5, pp. 6821-6829, Mar. 2021. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3042624>.
- [6] Q. Gao, W. Weng, B. Li, M. Aldén, and Z. Li, "Gas Temperature Measurement Using Differential Optical Absorption Spectroscopy(DOAS)", *Applied Spectros*, Vol. 72, No. 7, pp. 1014-1020, Dec. 2018.
- [7] P. C. S Devara, "Review article Remote sensing of atmospheric aerosols from active and passive optical techniques", *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 17 pp. 3271-3288, Aug. 2010. <https://doi.org/10.1080/014311698213966>.
- [8] A. Ansmann, M. Riebesell, and C. Weitkamp, "Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman Lidar", *Optics Letters*, Vol. 15, No. 13, pp. 746-748, Jul. 1990. <https://doi.org/10.1364/OL.15.000746>.
- [9] V. Freudenthaler, M. Esselborn, and M. Weigner, "Depolarization ratio profiling at several wavelengths in pure Saharan dust during SAMUM 2006", *Tellus B*, Vol. 61, No. 1, pp. 165-179, Jan. 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2008.00396.x>.
- [10] Z. Liu, I. Matsui, and N. Sugimoto, "High-spectral-resolution lidar using an iodine absorption filter for atmospheric measurements", *Journal of Optical Engineering*, Vol. 38, No. 10, pp. 1661-1670, Oct. 1999. <https://doi.org/10.1117/1.602218>.
- [11] M. R. Perrone1, F. De Tomasi1, and G. P. Gobbi, "Vertically resolved aerosol properties by multi-wavelength lidar measurements", *Atmos. Chem. Phys.*, Vol. 14, No. 3, pp. 1185-1204, Feb. 2014. <https://doi.org/10.5194/acp-14-1185-2014>.

- [12] Z. Kong, Z. Yin, Y. Cheng, Y. Li, Z. Zhang, and L. Mei, "Modeling and Evaluation of the Systematic Errors for the Polarization-Sensitive Imaging Lidar Technique", *Remote Sensing*, Vol. 12, No. 20, pp. 3309, Oct. 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12203309>.
- [13] C. B. Park and Y. W. Lee, "Development of Dual Polarization Laser Radar System for 24 hours Continuous Monitoring of Aerosols, Asian-dust and Cloud", *Journal of KIIT*, Vol. 9, No. 12, pp. 1-7, Dec. 2010.
- [14] Y. M. Noh, D. Müllera, D. H. Shin, H. L. Lee, J. S. Jung, and K. H. Lee, "Optical and microphysical properties of severe haze and smoke aerosol measured by integrated remote sensing techniques in Gwangju, Korea", *Atmospheric Environment*, Vol. 43, No. 4, pp. 879-888, Feb. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.058>.
- [15] C. B. Park, "Development of a Scanning Polarization Lidar System and Mapping of Aerosol Polarization Ratios over Yuseung, Daejeon", *Journal of KIIT*, Vol. 18, No. 8, pp. 99-105, Aug. 2020. <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2020.18.8.99>.
- [16] J. Xiana, D. Sun, W. Xu, Y. Han, J. Zheng, J. Peng, and S. Yang, "Urban air pollution monitoring using scanning Lidar", *Journal of Environmental Pollution*, Vol. 258, No. 113696, pp. 3275-3294, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113696>.
- [17] C. Xie, M. Zhao, B. Wang, Z. Zhong, L. Wang, D. Liu, and Y. Wang, "Study of the scanning lidar on the atmospheric detection", *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 150, No. 4, pp. 114-120 Jan. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.08.023>.
- [18] W. Yuen, Q. Ma, S. Koloutsou-Vakakis, K. Du, and M. J. Rood, "Lidar equation inversion methods and uncertainties in measuring fugitive particulate matter emission factors", *Applied Optics*, Vol. 56, No. 27, pp. 7691-7701, Sep. 2017. <https://doi.org/10.1364/AO.56.007691>.
- [19] G. Y. Dai, S. H. Wu, and X. I. Song, "Depolarization Ratio Profiles Calibration and Observations of Aerosol and Cloud in the Tibetan Plateau Based on Polarization Raman Lidar", *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 10, No. 378, pp. 1848-1846, Mar. 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10030378>.
- [20] J. Xie, X. Huang, L. Bu, H. Zhang, F. Mustafa, and C. Chu, "Detection of Water Cloud Microphysical Properties Using Multi-scattering Polarization Lidar", *Current Optics and Photonics*, Vol. 4, No. 3, pp. 174-185, Jun. 2020. <https://doi.org/10.1364/COPP.4.000174>.
- [21] M. Haarig, A. Ansmann, H. Baars, and C. Jimenez, "Depolarization and lidar ratios at 355, 532, and 1064 nm and microphysical properties of aged tropospheric and stratospheric Canadian wildfire smoke", *Atmos. Chem. Phys.*, Vol. 18, No. 16, pp. 11847-11861, Aug. 2018. <https://doi.org/10.5194/acp-18-11847-2018>.
- [22] D. P. Donovan, H. K. Baltink, J. S. Henzing, S. R. de Roode, and A. P. Siebesma, "A depolarisation lidar based method for the determination of liquid-cloud microphysical properties", *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, Vol. 8, No. 1, pp. 237-266, Jan. 2015. <https://doi.org/10.5194/amt-8-237-2015>.

저자소개

박 찬 봉 (Chan Bong Park)



1999년 3월 : 경희대학교
전자공학과(공학박사)
2001년 9월 ~ 2006년 9월 :
일본국립환경연구원 연구원
2010년 2월 ~ 2011년 2월 :
목원대학교 국제환경관측센터
연구원

2011년 2월 ~ 현재 : 목원대학교 전자공학과 교수
관심분야 : 광계측, 레이저레이더, 광신호분석