

주사형 편광라이다시스템 개발과 대전 유성 상공 대기 에어로졸 편광비의 맵핑

박 찬 봉*

Development of a Scanning Polarization Lidar System and Mapping of Aerosol Polarization Ratios over Yuseung, Daejeon

Chan-Bong Park*

요 약

532 nm 레이저광의 수직, 수평편광을 이용하여 대기 중 에어로졸 편광비 공간분포를 계측할 수 있는 주사형 편광라이다 시스템을 개발하고 본 라이다를 이용하여 대전 유성상공의 에어로졸 편광비를 계측, 맵핑하였다. 본 시스템은 500×800 크기의 반사경을 이용하여 수평으로 360도 회전계측이 가능하다. 계측의 결과로써 에어로졸 편광비는 미세먼지가 적은 2019년 12월 14일과 26일에는 약 8~10% 그리고 많은 2020년 1월 9일과 10일에는 약 13~18%의 평균값을 나타냈으며, 특히 라이다 맵핑의 결과로써 유성지역 내에서도 에어로졸 공간분포는 지역적 편차를 나타내고 있음을 확인 할 수 있었다. 본 논문은 개발된 시스템의 특성과 유성상공의 계측 결과에 대하여 보고한다.

Abstract

In this study, we developed a scanning polarization lidar system that can scanning the spatial distribution of aerosol polarization ratio in the air by using vertical and horizontal polarization of 532 nm laser light. Using this lidar system, the aerosol polarization ratio over Yuseung in Daejeon city was measured and mapped. This system is capable of 360 degree rotation measurement horizontally using a 500×800 reflector. As a result of the measurement, the aerosol polarization ratio showed an average value of about 8-10% on December 14 and 26, 2019 with less fine dust, and about 13-18% with heavy dust days on January 9 and 10, 2020. In particular, as a result of the lidar mapping, it can be confirmed that the aerosol spatial distribution shows regional variation even in the Yuseung region. This paper reports on the developed scanning lidar system and the cases of measurement results.

Keywords

lidar, polarization ratio, optical sensor, atmospheric remote sensing, aerosols, air quality sensing

* 목원대학교 전자공학과 교수
- ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-7789-264X>

• Received: Jul. 30, 2020, Revised: Aug. 20, 2020, Accepted: Aug. 23, 2020
• Corresponding Author: Chan-Bong Park
Dept. of Electronics Engineering, College of Engineering, Mokwon University, 88 Doanbuk-ro, Seo-gu, Daejeon, 35349, Korea
Tel.: +82-42-829-7656, Email: cbpark@mokwon.ac.kr

1. 서 론

대기 중에 부유하는 고체상 혹은 액체상의 물질을 에어로졸이라 한다. 일반적으로 그 크기는 0.001~100 μm 범위이며, 황사, 미세먼지, 해염, 화산재와 같은 자연발생적인 물질과 황산염, 질산염, VOC (Volatile Organic Carbon), 검댕 등 인간 활동에 의한 2차 입자상 물질 등이 있다. 주로 1~2 km의 대기경계층 이하에서 존재하며 배출원에 따른 종류 및 기상조건에 따라 그 농도의 시·공간적 변동 폭이 크다[1][2]. 이러한 대기 부유 에어로졸들은 태양복사를 산란 흡수하여 대기평형에 직접적인 영향을 끼치며, 특히 미세먼지, 황사, 연무, 및 매연 등은 시정을 악화시키고 대기질의 변화 및 인체보건에 큰 영향을 끼치는 것으로 보고되고 있다[3]. 하지만 최근까지도 이러한 에어로졸의 물리 화학적 크기, 농도, 조성 및 공간분포 정보의 불확실성은 높은 것으로 보고[4]되고 있으며 이에 대한 대책으로 다양한 대기 에어로졸 계측센서의 개발 및 계측분석이 요구되고 있다.

대기 에어로졸을 직접적으로 계측하고 분석하는 방법으로 가장 널리 쓰이는 것은 샘플링에 의한 직접채취 방식이다[5]. 이 방식은 다양한 물질에 대한 분석이 가능하다는 장점을 가지나 채취과정이 복잡하고 분석결과 도출에 시간이 많이 걸린다는 단점을 가진다. 최근에는 미세입자 측정을 위한 방식으로 PM10, PM2.5 수준의 측정에 β -ray 형광법을 이용한 자동계측·분석 시스템이 도입되어 처리시간이 분 단위로 단축되었다[6][7]. 하지만 위의 두 방식은 그 계측이 계측기 주변으로 한정되는 점·오염 측정 방식으로 공간계측에 제한적이다. 이러한 공간측정의 한계를 대체하는 측정방식으로 제안된 것이 광·원격계측 방식이다.

광·원격계측 방식으로써 FTIR(Fourier Transform InfraRed)은 수신된 광만 계측·분석하는 수동형 방식이며 DOAS(Differential Optical Absorption Spectroscopy), TDLAS(Tunable Diode Laser Spectroscopy) 및 라이다(LIDAR, Light Detection And Ranging)는 광을 직접 물질에 조사하여 산란/흡수광을 계측하는 능동형 계측방식이다[7]. 이중 LIDAR는 가·측정거리가 수 km로 길고, 거리별 농도계측이 가능하며, 거리

및 시간분해능이 상대적으로 높다는 장점을 가진다. 대기 에어로졸 계측용 라이다는 미-산란(Mie-scattering)방식, 미-라만(Mie-raman) 방식, 미-편광(Mie-depolarization)방식이 있다[9][10]. 국내에서는 90년대 초반부터 Mie-산란 라이다가 성층권 및 대류권 에어로졸 측정에 사용되기 시작하였으며 최근까지 다수의 연구그룹에 의해 미-라만 방식 및 미-편광방식 라이다를 이용한 에어로졸 계측연구가 진행되어왔다[11][12][13]. 하지만 본 계측연구들은 에어로졸의 수직(Vertical)고도 분포 및 경사(Slant-path) 분포계측만 진행되었으며 에어로졸의 공간맵핑을 위한 회전주사계측(Scanning)은 이루어지지 않고 있었다.

본 연구에서는 회전주사형 미-편광방식 라이다를 개발하고 이를 이용하여 대전상공 에어로졸을 주사계측 후 이를 맵핑한 다수의 결과에 대하여 보고한다. 본 회전주사형 미-편광 라이다 시스템 개발 및 이의 계측결과 보고는 국내에서 처음수행된 것으로 국산 시스템개발 및 계측기술의 확보에도 의미를 가진다.

II. 라이다시스템 및 알고리즘

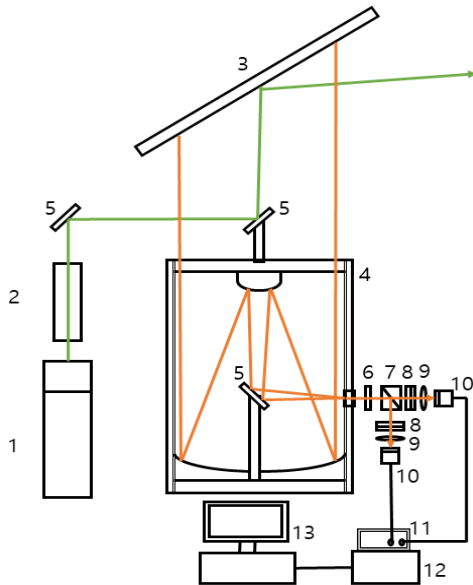
2.1 라이다시스템의 구성

본 대기 에어로졸의 계측에 사용된 시스템은 532nm 파장의 수직, 수평편광의 동시 계측이 가능한 단파장 편광 라이다 시스템이다. 송신부는 1064nm 발진 Nd:YAG 레이저와 532nm 생성을 위한 Harmonic Generator 및 빔 확산기로 구성하였다. 빔 확산기는 송신 레이저 파장인 532nm는 빔 단면적당 파워 및 발산각을 줄이기 위하여 사용되었다. 빔 확산기를 거친 광은 500×800mm 크기의 직사각형 주사 반사경에 의해 대기 중으로 송신된다. 본 주사 반사경은 광의 송신 및 수신이 모두 가능하며 532nm 반사도는 90% 이상이다. 본 주사 반사경의 회전각도는 수평 0~270도, 수직 0~90도 이다. 이의 회전각도 및 회전속도는 주사망원경 제어 프로그램에 의해 자동으로 설정되고 조정된다. 대기 중 송신된 광의 에어로졸과 산란반응 후의 후방산란광은 회전 반사경 및 지름 300mm의 뉴토니안 방식의 망

원경에 의해 집광된다. 망원경 후단의 렌즈를 통과한 후 분광기로 입사된 광은 Dichroic 필터에 의해 532nm 파장만 추출되어 편광기를 거쳐 532nm의 수직/수평 편광성분 광으로 나뉘지게 된다. 이후 2mm의 파장폭을 가지는 협대역 필터를 거쳐 최종적으로 광전증배관에 의해 검출된다. 본 수직, 수평 채널에서의 수신감도의 차이는 약 1:1.92로 이의 차이는 데이터처리 알고리즘을 통해 보정된다.

광전증배관의 광전변환 신호는 전자증폭기 및 ADC에 의해 신호처리 후 최종적으로 PC내 알고리즘 소프트웨어에 의해 데이터처리 된다. 그림 1은 본 라이다 시스템의 구성도를 나타내고 있으며, 표 1은 본 라이다 시스템의 특성을 정리한 특성표이다.

그림 2는 회전형 주사반사경의 회전 및 레이저를 연동하기 위한 프로그램을 나타내고 있다. 수직, 수평각도 및 회전각도/분을 입력하면 레이저 및 신호처리기와 연동하여 제어된다.



1. Nd:YAG laser, 2. Beam expander, 3. Scanning mirror,
4. Telescope, 5. Total mirror, 6. Dichroic filter, 7. Polarizer,
8. Interference filter, 9. lens, 10. PMT 11. amplifier,
12. A/D converter, 13. Data processor(PC)

그림 1. 라이다 시스템의 구성도

Fig. 1. Block diagram of the lidar system

표 1. 레이저레이더 장치의 제원
Table 1. Specification of the lidar system

Transmitter
Laser : Surelite III-10
Output : 220mJ @532nm
Beam div : 0.6 mrad
Repetition : 10Hz
SHG : Type I for 532nm
Receiver
Telescope : Newtonian type, FOV, 1.4 mrad
1st mirror, 300mm, 2nd mirror, 100mm
Receiving channel : 532s nm and 532p nm
Detector : PMT, Hamamatsu-H6780
Data Acquisition : LeCroy-LT264, ADC 2ch,
60MHz, 1GS/sec, 12bits
Scanning mirror
Size: 500×800 mm
Material: BF33
Reflectance: 90% (UV-IR)
Rotation angle: 0 - 360 (Y -axis), 0 - 90 (Z-axis)

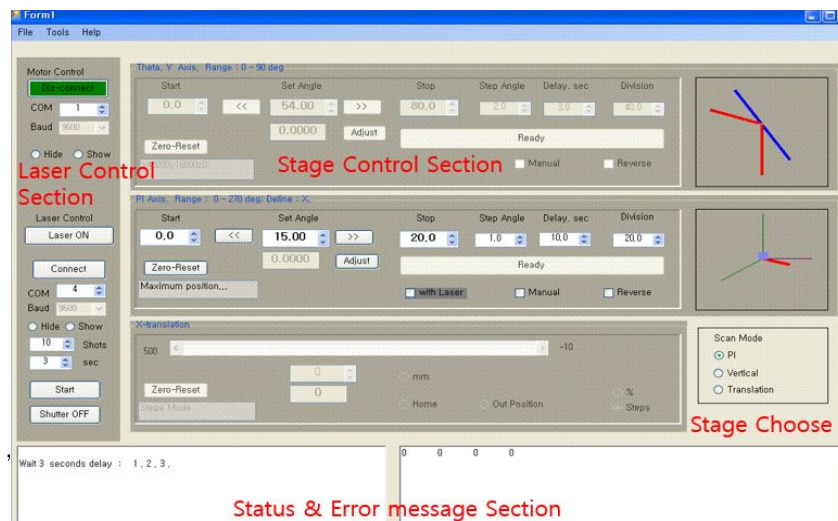


그림 2. 주사망원경 및 레이저 제어 프로그램
Fig. 2. Scanning mirror and laser control program

2.2 데이터 처리 알고리즘

Beer의 법칙을 기본으로 한 라이다방정식에서 라이다시스템에서의 채널별 신호의 크기는 다음의 식 (1)과 같다[14].

$$P(\lambda, z) = A(\lambda)F(\lambda, z)E(\lambda)/z^2, \quad (1)$$

$$F(\lambda, z) = (\beta_a(\lambda, z) + \beta_m(\lambda, z)) \cdot \exp\left[-2 \int_0^z ((\sigma_a(\lambda, z') + \sigma_m(\lambda, z')) dz')\right]$$

위의 식 (1)에서 P 는 파장 및 거리에 따르는 수신신호의 파워이며, $A(\lambda)$ 는 장비의 광학적 상수, $E(\lambda)$ 는 레이저출력 파워, z 는 거리이며, λ 는 레이저의 파장을 나타낸다. 대기 변수로써 β_a 는 입자의 후방산란계수이며 β_m 은 공기분자의 후방산란계수이다. α_a 는 입자의 소멸계수이며 α_m 은 공기분자의 소멸계수이다.

대기 에어로졸 입자의 구형, 비구형 정도를 판별하는 편광비(Polarization ratio)의 계산식은 다음 (2)의 식과 같다[15].

$$\delta = K \frac{P_{\perp}}{P_{\parallel}} \quad (2)$$

$$P_{\perp}(\lambda, z) = A_{\perp}(\lambda)F_{\perp}(\lambda, z)E_{\perp}(\lambda)/z^2, \quad (3)$$

$$P_{\parallel}(\lambda, z) = A_{\parallel}(\lambda)F_{\parallel}(\lambda, z)E_{\parallel}(\lambda)/z^2$$

식 (2)에서 P_{\perp} 는 수신신호의 수직편광성분 신호의 파워를 P_{\parallel} 는 수신신호의 수평편광성분 신호의 파워를 나타내며 각각 식 (3)으로 표현된다. K 는 수직, 수평 채널의 광학적 감도(Sensitivity)의 비이다. 본 알고리즘을 통하여 편광비를 계산하기 위하여서는 신호의 배경광 잡음의 제거과정이 필요하다.

본 신호처리에서는 SNR(Signal Noise Ratio)가 5 이하인 거리부터~12km 까지 범위에서의 신호의 이동평균값을 구한후 이를 배경잡음(Background noise)으로 처리하여 신호에서 제거하였다. 이후 라이다

시스템의 근처 500m 이하 거리에서의 반사광에 의한 신호유도잡음(SIN, Signal Induced Noise)도 Regression fitting을 통해 계산 후 제거하였다.

III. 대전 유성성공 에어로졸의 계측 및 검토

개발된 주사형 편광라이다 시스템을 이용하여 대전상공 에어로졸의 편광비를 측정하였다, 본 계측은 목원대학교 산학협력단 건물을 기점으로(36.324439N/127.337885E)하여 유성구 덕송초등학교(36.358750, 127.318653)를 회전원점(0도)를 하여 우측으로 회전 계측하였다. 본 주사 계측시간은 2°회전당 1분으로 총 60°계측의 30분이다. 이때 레이저 주사의 수직각도는 관측원점 근거리에서의 건축물(아파트)을 회피하기 위한 10°이다.

그림 3은 본 라이다 계측 후 알고리즘 데이터처리로 얻어진 에어로졸 편광비의 측정 거리별 데이터의 예이다. 거리분해능은 12m이며 최대 12km 까지 데이터를 얻었으나 배경광 제거 및 SNR > 5을 기준으로 하여 6km까지만 데이터로 표출하였다. 이때 신호의 통계적 오차는 5% 미만이다. 거리 200m 이하에서의 신호의 피크는 근거리에서의 반사광의 영향에 의한 것이다.

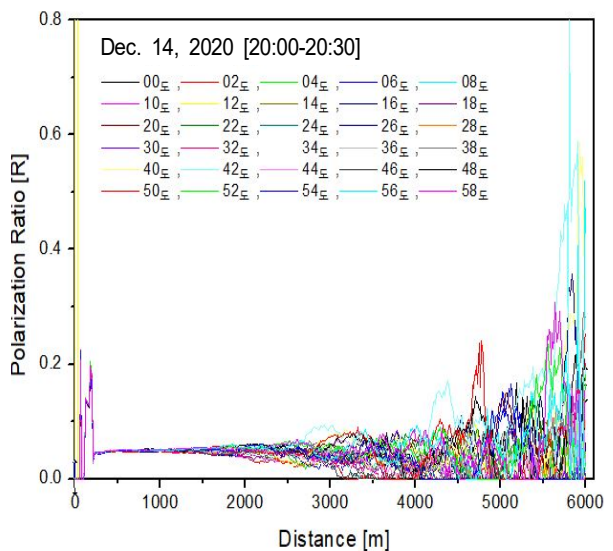


그림 3. 계측각도에 따른 에어로졸 편광비 신호
Fig. 3. Aerosol polarization ratio[R] signal according to a measuring angle

위의 거리별 자료를 Contour 데이터 처리 후 대전시내의 지도에 오버랩하여 대전상공의 에어로졸 편광비분포를 맵핑하였다. 그림 4에서부터 그림 7까지는 각각 2019년 12월 14일, 26일 및 2020년 1월 9일과 10일에 각각 계측된 데이터를 처리한 것이다. 배경광 제한으로 계측은 주로 야간에 진행하였다.

그림 4의 2019년 12월14일의 경우 계측지역 전체적으로 비교적 약 8% 정도의 낮은 편광비를 나타냈으며 지역적으로는 충남대학교 근처 공동부실에서 약 20% 정도의 높은 편광도를 나타냈다.

그림 5의 12월 26일의 경우 다른 지역에 비하

여 대전월드컵 경기장 및 노은동을 중심으로 약 30%에 이르는 증가된 편광도를 나타냈으며 다른 지역은 약 10%대의 낮은 편광도를 보였다.

그림 6, 7의 2020년 1월 9일, 10일의 경우 앞선 두 사례와는 다른 매우 증가된 편광도를 나타냈는데 평균적으로도 3~8% 정도 증가된 값을 나타냈다. 1월 9일의 경우엔 죽동지역에서 약 50%에 이르는 높은 값을 보였으며, 특히 그림 7의 1월 10일의 경우엔 편광도 20% 이상의 지역이 확대되어 대전 월드컵 경기장에서 도안동 서북방면에 이르기 까지 약 20%에서 50% 이상의 높은 편광비를 나타내었다.

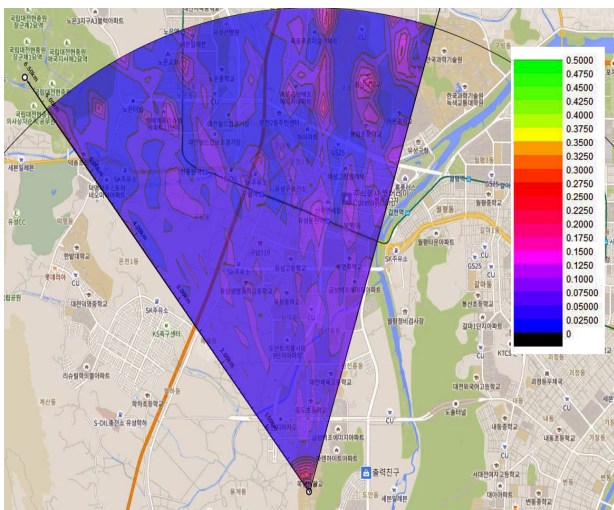


그림 4. 2019년 12월 14일 유성상공 에어로졸 편광비 계측
Fig. 4. Measurement of aerosol depolarization ratio on Dec. 14, 2019 over Yuseung, Daejeon city

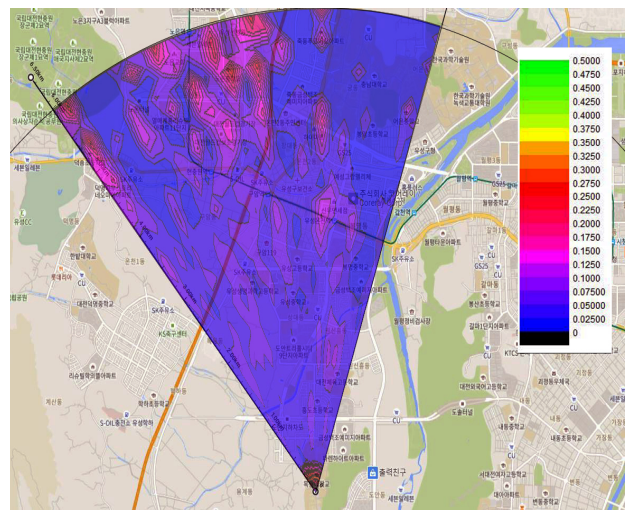


그림 5. 2019년 12월 26일 유성상공 에어로졸 편광비 계측
Fig. 5. Measurement of aerosol depolarization ratio on Dec. 26, 2019 over Yuseung, Daejeon city

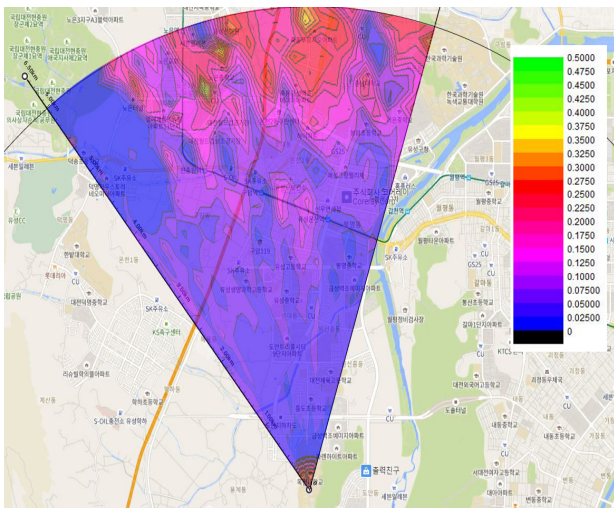


그림 6. 2020년 01월 9일 유성상공 에어로졸 편광비 계측
Fig. 6. Measurement of aerosol depolarization ratio on Jan. 09, 2020 over Yuseung, Daejeon city

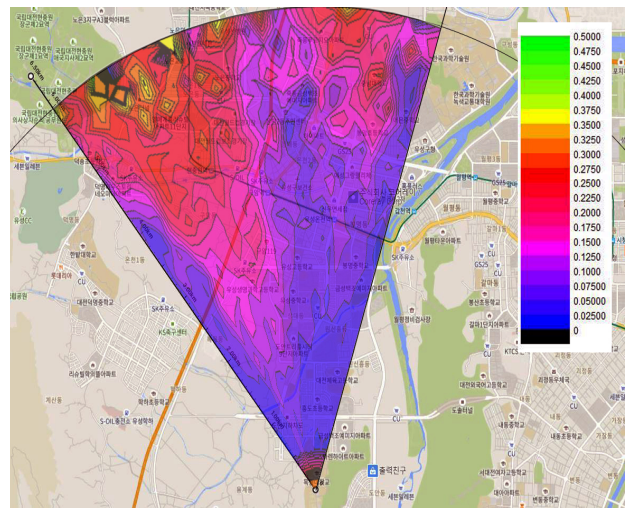


그림 7. 2020년 01월 10일 유성상공 에어로졸 편광비 계측
Fig. 7. Measurement of aerosol depolarization ratio on Jan. 10, 2020 over Yuseung, Daejeon city

기존의 라이다 계측에 의한 대기 에어로졸 보고 들에 의하면 스모그 나 오염가스의 경우는 0.2~10%, 바이오메스의 경우는 7~13%, 스모크(Smoke)와 먼지의 경우 12~55% 정도이다. 따라서 1월 9일과 10일의 경우는 도시 스모크 및 먼지의 증가에 의한 영향으로 보인다.

본 계측결과를 비교하기 위하여 라이다 계측시간 대의 대전지역의 PM10 미세먼지 농도와 비교하였다[16]. 표 2에서 PM10의 값은 1시간 평균값이다. 라이다 편광비의 평균값이 8.4%~18.2% 로 증가할 때 PM10의 결과도 36~70으로 증가하여 라이다 편광도의 증가와 더불어 PM10의 값도 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이는 기존의 먼지의 총량증가에 대한 라이다 편광도 증가의 보고사례들과 일치하는 결과이다. 하지만 두 데이터의 정량적인 상관관계를 도출하기 위하여서는 좀 더 정기적인 계측으로 많은 데이터를 취득, 분석해야 할 것으로 생각된다.

표 2. 유성상공 에어로졸 편광비 계측값 및 PM10 비교
Table 2. Measurement results of aerosol polarization ratio and comparison with PM 10

CASE	Meas. date	Meas. time	DP range	DP average	PM10 average (µg/m2)
#1	2019. 12.14	20:00-20:30	5~20%	8.4%	36
#2	2019. 12.26	21:00-21:30	5~30%	10.2%	44
#3	2020. 01.09	21:00-21:30	5~38%	13.7%	51
#4	2020. 01.10	22:00-22:30	5->45%	18.2%	70

IV. 결 론

본 연구에서는 532nm 수평, 수직편광 광을 이용하여 대기 에어로졸의 편광비를 계측할 수 있는 주사형 편광라이다 시스템을 개발하고 이를 이용하여 대전 유성상공의 에어로졸의 편광비를 주사계측 하였다. 계측의 결과로써 라이다 편광비는 미세먼지가 적은 날의 경우 약 8~10%, 많은 날은 약 13~18%의 평균값을 나타냈다. 이는 PM10의 증가와도 일치하는 결과이다. 하지만 평균값과는 다르게 주사계측 후 맵핑의 결과로써 본 유성상공의 편광비는 지역

내에서도 편차를 가지는 것으로 확인되었다. 본 연구에서의 주사형 라이다 계측방식은 기존의 PM10 등과 같은 점·오염 측정이 가지는 한계점을 보완하고 지역전체의 에어로졸 분포 맵핑이 가능하여 특정지역의 높은 에어로조 분포를 확인할 수 있다는 점에서 의미를 가진다. 본 계측은 주로 야간에 이루어 졌으며 낮에도 측정이 가능할 수 있도록 성능을 조정하는 것은 앞으로의 과제이다.

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. 16,889-16,909, 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.

[3] S. Kinne, M. Schulz, and C. Textor, "An AeroCom initial assessment-optical properties in aerosol component modules of global models", *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 6, No. 7, pp. 1815-1834, May 2006.

[4] P. Foster, P. Artaxo, and T. Berntsen et al., "Changes in atmospheric constituents and in radiation forcing, in *Climate Changes 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Changes*", Cambridge University Press, NewYork, NY, USA, pp. 129-234, Sep. 2007.

[5] F. Aldape, J. Flores M., R. V. Diaz, J. R. Morales, T. A. Cahill, and L. Saravia, "Sesonal study of the composition of atmospheric aerosols in Mexico city", *International Journal of PIXE* Vol. 01, No. 04, pp. 355-371, Dec. 1991.

- [6] 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, pp. 846-853, Nov. 2011.
- [7] S. H. Chae, H. Y. Kim, and J. W. Gim, "Development of Portable Atmospheric Environment Measurement System using Low Power Wireless Communication", *JAIRC*, Vol. 10, No. 1, pp. 99-109, Jul. 2020.
- [8] 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, Sep. 1998.
- [9] 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.
- [10] V. Freudenthaler, M. Esselborn, M. Weigner et al., "Depolarization ratio profiling at several wavelengths in pure Saharan dust during SAMUM 2006", *Tellus B*, Vol. 61, No. 1, pp. 165-179, Jan. 2009.
- [11] Chan-Bong Park and Young-Woo 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.
- [12] Y. M. Noh, D. Müllera, D. H. Shin, H. L. Lee, and J. S. Jung, and K. H. Lee, et al., "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.
- [13] C. B. Park, "Development of 355 nm Rayleigh Lidar for Measurements of Temperature Vertical Profile over Daejeon City, Korea", *JAIRC*, Vol. 7, No. 2, pp. 55-64, Dec. 2017.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] <https://www.airkorea.or.kr/web/>: [accessed: June 10, 2020].

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 조교수
관심분야 : 광계측, 레이저레이더, 광신호해석