

구름, 에어로솔의 라이다 계측 편광 소멸도 분석

박찬봉* · 이영우*

*목원대학교

Analysis of aerosol and cloud depolarization ratios measured by lidar

Chan bong Park*, Young Woo Lee*

*Mokwon University

E-mail : cbpark@mokwon.ac.kr

요 약

이중 편광 라이다로 계측된 에어로솔과 구름의 편광소멸도를 분석하였다. 구름과 먼지, 그리고 구형 에어로솔에 대한 1064 nm 와 532 nm 의 파장별 후방산란비의 비(RDR)를 각각 비교하였다. 구형 에어로솔의 경우 RDR 값은 1.5~6, 먼지는 0.98~4, 그리고 구름의 경우에는 0.7~1.77의 값을 나타내었다. 먼지의 수직분포와 상대습도를 비교하였다. 평균적으로 30~60%의 상대습도가 먼지층에 분포하였다. 하지만 70%이상의 값도 빈번히 계측되었었고, 이의 경우 먼지에 대한 RDR 값은 2~4 정도로 증가하였다.

ABSTRACT

Depolarization characteristics of aerosol and cloud measured by dual wavelengths polarization lidar are examined. Ratio of depolarization ratio (RDR) between 1064 and 532nm are analyzed and compared with spherical aerosols and cloud. RDR of dust aerosols is exponentially decreased according to the increase of depolarization ratio at 532nm. The RDR of spherical aerosol is in the range of 1.5~6, dust aerosol is 0.98~4, and cloud is 0.7~1.77. Vertical distribution of dust aerosol and Relative Humidity (RH) are compared. In general, the RH in the dust layer are in the range of 30~60%. However, higher RH is frequently observed in the dust aerosols layer. In the condition of higher RH over 75%, the RDR of the dust aerosol are also increased to the range of 2~4.

키워드

원격계측, 에어로솔, 구름, 광 계측, 대기분석

1. 서 론

라이다를 이용하여 대기경계층에서부터 권계면까지의 영역에 분포된 에어로솔과 구름에 대해 처음으로 관측을 시도한 것은 라이다의 개발 초기이다[1]. 최근, 대기 중의 구름과 에어로솔은 산란과 흡수를 통하여 복사수지에 직접적 영향을 주고, 또한 에어로솔은 운핵으로서 작용과 화학반응을 수반하고 있다는 현상이 밝혀지면서, 이의 특성을 규명하기 위한 라이다 관측 활동이 활발하게 추진되고 있다.

현재 Mie 산란 라이다에 편광소자를 설치하는

편광라이다(Polarization lidar)를 사용하여 구름의 고도분포(운저 및 운고), 구름의 상(액상 및 빙상)과 입경분포를 추정하고 있다 [2],[3]. 또한 HSRL(High Spectral Resolution Lidar) 등을 사용하여 권운(Cirrus Cloud) 및 수운(Water Cloud)의 미세적 물리학 구조를 정밀 분석하는 보고가 있다[4].

본 연구에서는 ACA 라이다 두 파장 편광소자(532± nm, 532// nm, 1064± nm, 1064// nm)를 이용하여 편광해소도(532 nm, 1064 nm)의 동시 출력으로 에어로솔 및 구름의 파장별 편광소멸도 및 이의 비(RDR)를 분석하였다.

II. 시스템 및 알고리즘

본 연구에 사용된 시스템으로써 레이저는 Nd:YAG를 사용하였으며 상시 출력은 반복율 10 Hz에서 190 mJ @1064 nm 및 65 mJ @532 nm 이다. 출력광의 1064 nm 및 532 nm 파장은 SHG(type I)을 사용하여 s편광 및 p편광으로 분리하였다. 수신광학계의 망원경은 Cassegrain형을 사용하였고 주 거울의 구경은 300 mm ϕ , FOV는 0.3–6.4 mrad이다. 광 검출기는 Licel의 APD(1064s nm 및 1064p nm)와 Hamamatsu의 PMT(532s nm 및 532p nm)를 각각의 쌍으로 배치하여 4채널을 구성하였다. 따라서 두 파장에 대한 각 수신광의 편광은 동시에 검출되므로 각각의 편광해소도는 동시에 측정된 결과로서 비교할 수 있다 분광기는 두 파장의 편광소자 즉 1064 nm의 s성분과 p 성분 그리고 532 nm의 s성분과 p성분 채널들로 각각 배치하였다. 레이저 출력의 광속은 SHG의 type 1에 의하여 532 nm와 1064 nm으로 분할되었고 또한 동축으로 선편광 된다 이때의 편광 평형의 정밀도는 98 %의 수준이므로 수신 광학계에서 GFF(Geometrical form factor)는 두 파장에 대해 필연적으로 동일하게 된다 본 연구에서는 1064 nm APD의 앞쪽에 편광 광속분할기(PBS)를 설치하였고, PBS의 각도를 조정함으로써 송신파장의 광축을 정렬하였다. 이것은 45°편광자를 사용함으로써 두 파장의 송신 광축을 정렬할 수 있고, 또한 검출기의 감도에 대한 평형과 이득의 조정을 쉽게 할 수 있다. 표 1. 은 사용된 시스템의 제원이다.

본 연구는 라이다로 측정된 532 nm와 1064 nm 2파장편광데이터를 사용하여 간이형 2성분이론을 개발하였다. 즉 적은입경의 먼지에 대한 PDR (particle depolarization ratio)은 파장에 의존하지 않는다는 결과를 설명할 수 있겠끔, 에어러솔들을 두 종류로 생각하는 간이형 이론으로 측정값의 PDR에 대한 구형 에어러솔의 외부혼합 효과를 연구하였다. 또한 먼지와 구형 에어러솔에 대한 BAE(backscatter-related Ångström exponents)와 먼지의 혼합비를 사용하여 관측된 데이터들을 해석하였다. 중요 이론식은 다음과 같다. 먼저 간이형 2성분 모델에서 사용하는 532 nm와 1064 nm의 PDR을 정의하면 $\delta = \beta_s/\beta_p$ 와 같다. 여기서 β_s 는 에어러솔의 후방산란계수의 평행성분이며 β_p 는 이의 수직성분이다. 따라서 측정데이터로 계산되는 혼합비(mixing ratio) X는 식 (1)과 같이 정의 된다.

$$X = \frac{\delta_{532}}{\delta_{d532}(1 + \delta_{532})} = \frac{(1 + \delta_{d532})\delta_{532}}{\delta_{d532}(1 + \delta_{532})} \quad (1)$$

여기서 532 nm와 1064 nm에 대한 PDR은 각각 다음 식 (2), (3)과 같다.

$$\delta_{1064} = \frac{P(1064)_t}{P(1064)_p} = \frac{\delta_{d1064} \frac{X}{2^{\gamma_a}}}{\left(\frac{1}{2^{\gamma_a}} - \frac{1}{2^{\gamma_s}} - \frac{\delta_{d1064}}{2^{\gamma_a}}\right)X + \frac{1}{2^{\gamma_s}}} \quad (2)$$

$$\delta_{532} = \frac{P(532)_t}{P(532)_p} = \frac{\delta_{d532}X}{1 - \delta_{d532}X} \quad (3)$$

1064 nm의 PDR에 대한 532 nm의 비율:R δ , 또한 1064 nm의 후방 산란 계수에 대한 532 nm의 비율:R β 을 각각 유도하면 식(4) 및 식(5)와 같다.

$$R_\delta = \frac{\delta_{1064}}{\delta_{532}} = \frac{(1 - \delta_{d532}X) \frac{\delta_{d1064}}{2^{\gamma_a}} \delta_{d532}}{\left(\frac{1}{2^{\gamma_a}} - \frac{1}{2^{\gamma_s}} - \frac{\delta_{d1064}}{2^{\gamma_a}}\right)X + \frac{1}{2^{\gamma_s}}} \quad (4)$$

$$R_\beta = \frac{\beta_{1064}}{\beta_{532}} = \frac{P(1064)_t + P(1064)_p}{P(532)_t + P(532)_p} = \left(\frac{1}{2^{\gamma_a}} - \frac{1}{2^{\gamma_s}}\right)X + \frac{1}{2^{\gamma_s}} \quad (5)$$

표 1. 시스템의 제원

Transmitter	
Laser :	Surelite I-10
Max. output :	470 mJ @1064 nm 220 mJ @532 nm
Beam div :	0.6 mrad
Repetition :	10 Hz
Receiver	
Telescope :	Cassegrain type
	1st mirror, 300 mm
	FOV, 0.3–6.4 mrad (1 mrad)
Receiving channel :	1064s nm and 1064p nm 532s nm and 532p nm
Detector :	PMT , Hamamatsu-H6780
	APD , Licel-APD-1.5
Data Acquisition :	LeCroy-LT264, 4ch, 350 MHz, 1 GS/sec, 8 bits
Operation mode :	5 min-on, 10 min-off
Range resolution :	6 m

III. 계측 및 분석

그림 1. 은 개발된 두 파장의 편광채널(532 nm 및 1064 nm)을 사용하여 측정된 거리수정 후방산란신호 세기의 THI(Time Height Indication)를 나타낸다. 여기서 사용된 데이터들은 거리수정 후방산란신호의 세기와 이의 편광소멸도에 대한 값이다.

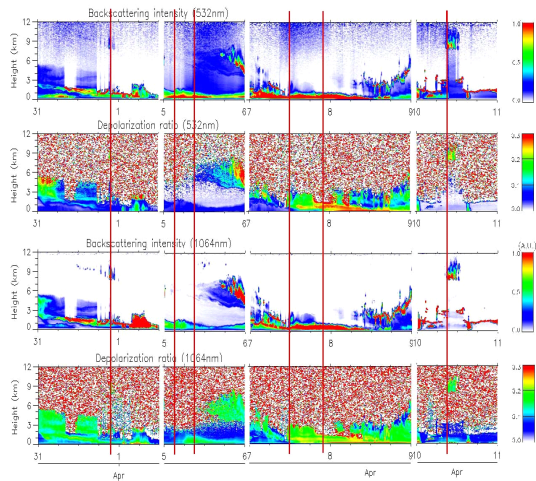


그림 1. THI로 표시된 후방산란신호 세기 및 편광해소도

위의 그림에서 먼지의 경우, 1064 nm 편광해소도와 532 nm 편광해소도의 비(TDR 1064/TDR 532)는 1.3~2.2이며 이때 532 nm의 편광해소도는 20~15 % 범위에 있다. 그러나 황사가 없을 때 즉 오염물질과의 혼합 에어로솔(외부 혼합)의 경우에는 두 파장의 편광해소도 비는 3.6~4.0으로 증가하고 있다. 이때 532 nm의 편광해소도는 6.0~3.0 % 범위에 있다. 이와 같은 분석결과에 의하면 1064 nm 편광해소도는 에어로솔의 혼합 상태에 따라 증가하고, 또한 편광해소도는 황사 및 에어로솔의 편광해소도는 파장에 의존되지 않음을 설명하고 있다. 이것은 본 연구의 결과로 발표된 혼합 에어로솔의 모델과 매우 일치한다. 구름의 경우는 대기의 하층에 혼합에어로솔의 층이 있고 상층에는 구름이 분포되어 있는 경우이며 구름층은 8-10 km 고도에 있다. 두 파장의 편광해소도비는 0.7 ~ 2.0 범위에 있으며 황사 에어로솔의 경우보다 매우 적은 값이다. 그런데 구름층이 불안정할 때에는 1064 nm 편광해소도는 대체로 증가하는 경향으로 변동하고 있다.

V. 결론

좀 더 통계적인 분석을 위해 총 30회의 관측에 대하여 평균값의 예를 분석한 결과는 다음의 그림 2와 같다.

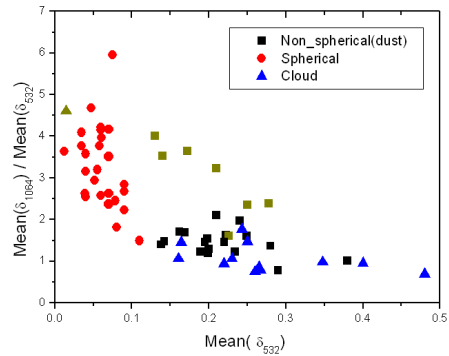


그림 2. RDR (1064/532 nm)의 먼지, 구형 에어로솔 그리고 구름에 대한 분포

구형 에어로솔의 경우 RDR 값은 1.5~6, 먼지는 0.98~4, 그리고 구름의 경우에는 0.7~1.77의 값을 나타내었다. 먼지의 수직분포와 상대습도를 비교하였다. 평균적으로 30~60%의 상대습도가 먼지층에 분포하였다. 하지만 70%이상의 값도 빈번히 계측되었고, 이의 경우 먼지에 대한 RDR 값은 2~4 정도로 증가하였다.

참고문헌

- [1]. G. Fiocco and J. B. DeWolf, Frequency spectrum of laser echos from atmospheric constituents: and determination of aerosol content of air, J. Atm. Sci. 25, 488-496, (1968).
- [2]. K. Sassen and B. S. Cho, Subvisual-thin Cirrus lidar dataset for satellite verification and limatological research, J. Appl. Meteorol., 31, 1275-1285, (1972).
- [3]. Y. Sassano, A. Shigematsu, H. Shimizu, N. Takeuchi, and M. Okuda, On the relationship between the aerosol layer height and the mixed layer height determined by laser rader and low-level radiosonde observation, J. Meteorol. Soc. Japan, 60, 889-895, (1982).
- [4]. N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, Chimatological characteristics of cloud distribution and planetary boundary layer structure in Jakarta, Indonesia revealed by lidar observation, Geophys. Res. Lett., 27, 18, 2909-2912, (2000).