에어로졸, 수증기 측정 라만 레이저 레이다 시스템 개발

박찬봉* · 이영우*

*목원대학교

Development of Raman Laser Radar System for Aerosol and Water Vapor Measurements

Chan Bong Park* · Young Woo Lee*

*Mokwon University

E-mail : cbpark@mokwon.ac.kr

요 약

대기 중 에어로졸과 수증기 농도를 측정하기 위한 라만방식 레이저 레이다 시스템을 개발하였다. 송신시스템은 Nd:YAG laser 3rd harmonic Generator 및 빔 확대기로 구성되며, 대기 중에 송신되는 파장은 355 nm 이다. 수신시스템은 500 mm 망원경과 3채널 분광기, 광전자증배관 검출기 및 신호처리모듈로 구성되며 최종적으로 처리되는 신호의 파장은 355 nm. 387 nm, 그리고 408 nm 이다. 본 시스템은 대기권의 수증기의 수직 농도분포를 약 100~200 m 의 분해능과 3~4 km의 가 측정거리를 가지고 측정할 수 있다.

ABSTRACT

Raman Laser Radar system for the measurements of aerosol and water vapor concentration is developed. As a transmitting system, Nd:YAG laser with 3rd harmonic Generator and beam expander are used. The wavelength of transmitting laser is 355 nm. The receiving system is consists of 500 mm telescope, 3-channel Raman spectrometer, PMT, and signal processing module. The wavelengths of received signals are 355 nm. 387 nm, and 408 nm 이다. The measurable altitude of this system is about 3~4 km with spatial resolution of 100~200 m.

키워드

Raman, Water Vapor, Laser Radar, Remote Sensing

Ⅰ. 서 론

수증기 혼합비를 관측하는 라이다의 종류는 일반적으로 DIAL방식과 라만방식으로 분류된다[1],[2],[3]. DIAL방식은 특정 파장을 선택하는 어려움이 있으나 대출력 레이저를 사용할 수 있다는 이점 때문에 1990년 초부터 개발되었다. LASE(Laser Atmospheric Sensing Experiment)프로그램의 항공기 탑재 라이다[62]로 채택되면서 분광시스템의 성능은 개선되고, 또한 자동운전 시스템을 구축하는 것 등의 기술 향상을 이루었다. 현재 매우 안정된 라이다 방식으로 평가를 받고 있으나 DIAL방식으로써 단점 때문에 보급에는 한계가 있는 것으로 알려져 있다[4][5].

한편 Raman방식은 간단한 광학계를 사용하는 장점에 비하여, 라만의 산란단면적은 적고, 주간 태양광의 배경잡음 때문에 야간 측정에 한정되는 단점 등이 있다. 그러나 최근에 고 분광 시스템의 개발과 고출력 레이저의 실현으로 대기 경계면(~15 km)이상 까지의 고도에서 주간에도 수증기의 혼합비를 측정하는 결과들이 보고되고 있다[6].

본 연구에서 개발된 라만방식 레이저 레이다는 질소분자(N_2)와 수증기분자(H_2O) 라만채널 및 에어로솔 측정채널로 구성되었다. 레이저파장 355 nm, 387 nm, 408 nm에서 산란신호의 세기를 측정하고 이를 이용 질소, 에어로솔의 광학 파라미터와 수증기 혼합비를 계산한다.

Ⅱ. 시스템의 구성

송신시스템은 Nd:YAG laser 3rd harmonic Generator 및 빔 확대기로 구성되며, 대기 중에 송신되는 파장은 355 nm 이다. 레이저는 Nd:YAG를 사용하였으며 상시 출력은 반복율 10 Hz에서 645 mJ @ 1064 nm, 345 mJ @ 532 nm, 132 mJ @ 355 nm이다. 수신 광학계의 망원경은 Cassegrain형이며, 주 거울의 구경은 520 mmϕ, FOV는 0.3-3 mrad이다. 광 분광기 및 검출기는 3개 채널(354.7 nm, 386.7 nm, 407.5 nm)로 각각 구성되어 있다. 라만채널의 신호처리 시스템은 광계수기 (250 MHz)와 A/D 변환기 (30 MHz, 11 bit)를 사용하였다. 표 1. 은 본 시스템의 제원을 나타내고 있으며, 그림 1. 은 라만시스템의 광 분광기를 나타내고 있다.

표 1. 시스템의 제원

Transmitter	Receiver & Data Acquisition
Laser : Surelite Ⅱ Max Output : 645 mJ-1064 nm 345 mJ-532 nm 132 mJ- 355 nm Beam divergence : 0.6 mrad Repetition : 10 Hz	Telescope : Cassegrain 1st mirror, 520 mm Fov, 0.3-3 Receiver channel : Raman 3 channel , 407.5 nm, 386.7 nm, 354.7 nm Detector: PMT-FEU 100 Data Acquisition : Photon Counting 250MHz Analogue 30 MHz-11 bit

Ⅲ. 데이터 처리 알고리즘

라만산란주파수 편이(shift) $\triangle\upsilon$는 모든 대기 기체에 적용되는 값이다. 레이저파장 354.7 nm에서 신호 주파수 shift $\triangle\upsilon$와 라만파장 λ_R은 표 2.와 같다.

표 2. 라만산란 shift $\triangle\upsilon$와 파장 λ_R

gas	$\triangle\upsilon$, cm^{-1}	$\lambda_{R,\ nm}$
N_2	2331	386.7
H_20	3654	407.5

그림 1. 라만 분광기의 구조

레이저파장 354.7 nm의 경우, 질소분자(N_2)의 라만단면적은 $\sigma_{N2} = 2.0 \times 10^{-30}$ cm^2, 수증기(H_2O)에 대한 질소분자 단면적의 비는 $\sigma_{H20} / \sigma_{N2} = 2.1$이다. 레일리후방산란세기에 대한 라만세기의 비는 질소분자의 경우 6.0×10^{-4}, 수증기의 경우 10^{-5}~10^{-6}이다. 여기서 1~6 km 고도에서 W = (5.0~0.5) g/Kg이다.

레이저 파장 354.7 nm에서 에어러솔 소멸계수는 N_2 라만신호의 파장 387 nm에 의해 결정된다. 사용된 사전 정보는 표준 대기의 자료 또는 라디오존데의 데이터를 사용하여 대기 밀도 N(z)에서 고도 프로파일을 계산한다. 이것은 에어러솔 소멸계수: $\sigma_a(\lambda) \sim \lambda^{-K}$는 파장에 의존하는 것을 가정한다. 여기서 파라미터 K는 1.1이며, 사전에 지정된다.

에어러솔 소멸계수 $\sigma_a(\lambda_o, z)$는 식(4.6)의 관계식에 의해 계산된다.

여기서 Z는 라이다 광 경로의 거리, λ_0는 레이저 파장, $P(\lambda_R, Z)$는 라만파장 λ_R에서 라이다신호의

세기, index <a> 및 <m>는 에어러솔 산란과 분자 산란을 나타낸다. 위의 식은 신호 세기 $P(\lambda_0,z)$의 예비적 평활화를 위한 수치 유도를 포함하고 있으며 이것은 반드시 필요계산이다.

에어러솔 후방산란계수와 라이다 비는 두 신호에 의해 결정되는데 이것은 라만파장의 $P(\lambda_R,z)$와 레이저파장의 $P(\lambda_R,z)$이다. 부가적인 조건은 레이저파장 λ_0에서 라이다 신호채널에 관계되는 것이다. 즉 후방산란계수의 단위로 환산하는 문제이다. 이것을 계산하는 방법은 임의의 Calibration Point Z_g에서 이미 알고 있는 산란계수[$\beta_m(\lambda_0,Z_g)$ + $\beta_a(\lambda_0,Z_g)$]를 적용하는 것이다. 일반적으로 이와 같은 점 Z_g는 $\beta_a(\lambda_0, Z_g)=0$에서 정한다.

에어러솔 후방산란계수 $\beta_a(\lambda_0, Z)$는 다음 식에 따라 계산된다.

위의 식 에서 $\sigma_a(\lambda_0, Z)$는 식(1)으로 결정되며 이때 $\sigma_a(\lambda_R, Z)$는 다음과 같다.

$$\sigma_a(\lambda_R, Z)=\sigma_a(\lambda_0, Z)[\lambda_R/\lambda_0]^{-K}$$

따라서 라이다 비는 다음과 같이 계산된다.

$$\Theta a(\lambda_0, Z)=\beta_a(\lambda_0, Z_g)/\sigma_a(\lambda_0, Z)$$

이와 같은 측정값으로부터 두 라만 신호 P_{N2}와 P_{H20}는 레지스터 될 수 있다. 수증기농도는 수증기 혼합비의 형식으로 표현된다. 이것은 건조한 공기의 단위질량에 대한 값이며 g/Kg로 표시된다. 수증기 혼합비 R_{H20}을 결정하는 관계식은 식(4.10)과 같다.

여기서 K_{N2}와, K_{H2O}는 장치의 정수, σ_{N2}와 σ_{H2O}는 라만단면적, $T_{N2,H2O}(Z_g,Z)$는 N_2와 H_2O의 라만파장에서 각각의 Transparence이다. K_C는 측정 중에 발생하는 라만채널 throughput 변화를 고려하는 상수이다.

Ⅳ. 측정 실험

시운전 실험으로써 먼저 3개의 수신 채널에서 계측되는 신호를 사용하여 시스템의 정상적 동작 여부를 검토 하였다. 이것은 10Hz 동작의 레이저 펄스를 총 6000번을 송신한 후 후방 산란된 신호를 적분한 것이다. 그림 2는 적분된 수신신호의 파장별 세기를 나타낸 것이다. 수신신호의 세 채널은 355 nm(분자), 387 nm(N_2), 및 408 nm(H_2O)이다. 그림에서 각 채널의 신호는 파랑색, 빨강색 그리고 초록색으로 표시된다. 그림에서 x축은 측정거리로 환산되는 strobe 수로 표시되어 있으며 strobe 간의 거리는 350 m 이다. 즉 strobe number 20에 해당하는 거리는 20 x 350 m 로 7 km 이다. 시 운전을 통해 얻은 신호를 이용하여 계산한 고도별 소멸계수 및 수증기 농도의 결과는 그림 3 과 같다. 수증기 농도 (혼합비)는 1.2 km 고도에서 약 4 g/Kg을 표시하고 있고, 1.3 km이상 고도에서는 약간 감소하고 있다. 이에 대응되는 소멸계수는 1.2 km에서 0.6 km^{-1},1.45 km에서 0.04 km^{-1}이다.

그림 2. 수신신호의 측정 예
(355 nm, 387 nm, 408 nm)

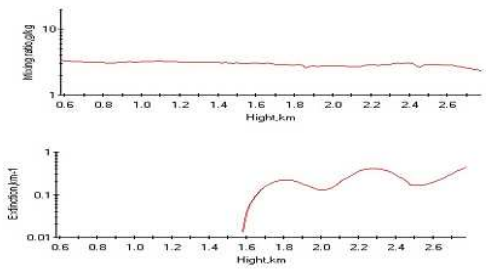

그림 3. 수증기 농도(혼합비) 및 에어로솔 소산계수 (Extinction coefficient)

Ⅴ. 결 론

대기 중 에어로졸과 수증기의 측정을 위한 라만 시스템을 개발 하였다.

본 실험을 통해 나타난 시스템의 문제점은 387 nm 채널 (채널 2)은 PMT 박스 과열로 잡음비가 증가함으로서 N_2 라만 산란에 대한 데이터처리의 측정 가능 고도가 낮아지는데 있다. 다음은 다른 채널을 포함하여 데이터의 정확성과 시간 분해능을 얻기 위하여 평균 관측시간(Averaging time)의 적절한 조정문제이다. 이것을 해결하기 위하여 추가 실험이 필요하다. 10분의 관측시간의 경우 가 측정거리는 2~3 km 정도이며, 40분(24000shot) 의 관측시간을 가지고 신호를 적분하였을 경우 전체 채널의 신호의 세기를 고려한 가 측정거리는 약 4 km 정도이다. 시스템을 최적화 하기위한 실험은 추가적으로 필요하다.

참고문헌

[1]. R. Wilson, M. L. Chanin, and A. Hauchecorne, "Gravity waves in the middle atmosphere observed by Rayleigh lidar. 2. Climatology," Jounal of Geophys. Res. vol. 96, pp. 5169-5183, (1991)

[2]. P. A. T. Haris, T. D. Stevens, S. Maruvada, and C. R. Philbrick, "Latitudinal variation of middle atmospheric atmospheric density and temperature," Jounal of Adv. Space Res. Vol. 14, pp. 83-87, (1994)

[3]. S. E. Bisson and J. E. M. Goldsmith, "Daytime trophospheric water vapor profile measurements with a Raman lidar," in Technical Digest, *Optical Remote Sensing of the Atmosphere*, Salt Lake City, pp. 19-22, (1993)

[4]. D. N. Whiteman, S. H. Melfi, and R. A. Ferrare, "Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere," Jounal of Appl. Opt, Vol. 31, pp. 3068-3082, (1992)

[5]. V. M. Mitev, V. B. Simeonov, and I. V. Grigorov, "A comparison between Raman lidar and conventional contact measurements of atmospheric temperature," in Abstracts, *Sixteenth International Laser Radar Conf.*, MIT, Cambridge, MA., NASA Conf. Pub. vol. 3158, pp. 217-220, (1992).

[6]. D. N. Whiteman, K. Evans, B. Demoz, et al., Advances in Raman lidar measurements of Water vapor, Reviewed and revised papers of ILRC-21, Quebec, Canada, pp. 8-12 July (2002).