

## 회전 라만 신호를 이용한 낮 시간 온도측정 라이다

윤문상<sup>1</sup> · 김덕현<sup>2†</sup> · 박선호<sup>2</sup> · 신명재<sup>2</sup> · 김용기<sup>1</sup> · 정해두<sup>2</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 물리학과

☎ 314-701 충청남도 공주시 신관동

<sup>2</sup>한밭대학교 교양학부

☎ 305-719 대전광역시 유성구 덕명동

(2012년 6월 8일 받음, 2012년 7월 2일 수정본 받음, 2012년 7월 2일 게재 확정)

본 연구에서는 질소와 산소의 회전 라만 신호를 측정하여 낮 시간 온도 측정이 가능한 라이다 시스템을 자체 개발하였다. 태양 광에 의한 배경신호를 줄이기 위하여 파장의 폭이 좁고(0.5 nm) 제거율이 높은( $10^{-6}$ ) 회절판과 간섭필터를 이용하였다. 개발된 장치의 성능을 검증하기 위하여 라이다를 수평방향으로 조사하여 온도 특성을 얻고 기상청에서 주어지는 값과 비교하여 상관관계가 일치함을 알 수 있었다. 그리고 수직온도분포로 얻기 위하여 수평으로 얻은 검정 값을 사용하였다. 또한 수직방향으로 조사하여 미국 표준 데이터와 비교하였으며, 존데 데이터와 검정을 통한 본 연구의 결과를 비교하였다.

## Daytime Temperature Measuring LIDAR System by Using Rotational Raman Signal

Moonsang Yoon<sup>1</sup>, Dukhyeon Kim<sup>2†</sup>, Sunho Park<sup>2</sup>, MyeongJae Sin<sup>2</sup>,  
Yonggi Kim<sup>1</sup>, and Haedoo Jung<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Kongju National University, Singwan-dong, Kongju 314-701, Korea

<sup>2</sup>Division of Cultural Studies, Hanbat National University, Dukmyoung-dong, San 16-1, Yuseong-gu, Daejeon 305-719, Korea

(Received June 8, 2012; Revised manuscript July 2, 2012; Accepted July 2, 2012)

We have developed a daytime measuring rotational Raman LIDAR system for temperature measurement. To decrease the background signal from sunlight, we have designed and installed narrow band (0.5 nm) and high rejection ( $10^{-6}$ ) rate band pass filter system using a grating and an interference filter. We calibrated our system by comparing our horizontal temperature profile and KMA (Korea Meteorological Administration) data. We have found that our temperature profile has a good correlation with KMA data within our theoretically expected variance. And we have used these calibration values in obtaining a vertical temperature distribution. To check our system, we also have compared our vertical temperature data with US standard atmospheric temperature profile. We also have compared our temperature profile with sonde data.

Keywords: LIDAR(Light detection and ranging), Temperature, Rotational Raman

OCIS codes: (280.0280) Remote sensing and sensors; (010.1350) Backscattering; (010.3640) Lidar

### I. 서 론

대기의 온도변화는 구름의 생성과 소멸에 영향을 주고, 대기의 안정도에 영향을 주며, 대기 중 분자들의 화학적 상태 변화에 중요한 영향을 주기 때문에 기상학에서 습도, 기압, 풍향-풍속과 더불어 중요한 기상요소에 해당된다.

라이다는 레이저를 조사하여 후방산란 된 빛을 이용하여

원거리에 존재하고 있는 입자의 형태, 방향, 크기, 온도, 풍향/풍속 등의 정보를 측정하는 장비로 온도측정에 이용할 수 있는 중요한장치이다. 대기 중 라이다를 이용하여 온도측정을 하는 방법에는 공기 분자의 밀도를 측정하는 진동 라만(Vibration Raman)방법, 공기 분자의 회전 라만 산란을 이용하는 회전라만(Rotational Raman)방법<sup>[1-8]</sup>, 선평의 차이를 이용하는 Rayleigh방법<sup>[9-15]</sup> 등이 있다. 이 중에서 10 km이하

<sup>†</sup>E-mail: dhkim7575@paran.com

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

고도에서는 회전라만방법을 이용하는 라이다를 주로 이용한다. 회전라만라이다는 에어로졸의 영향을 받지 않고 대기의 온도에 따라 공기분자(질소와 산소)의 회전에너지 준위분포(Rotational Energy Level Distribution)가 볼츠만 분포를 하는 관계로 온도에 따라 달라지는 현상<sup>[16-18]</sup>을 이용하는 것으로 현재 대류권 온도 측정 기법으로 가장 많이 사용되고 있는 방법이다. 이 방법은 Cooney<sup>[17]</sup> 등에 의하여 최초로 시도하였고, Kalshoven<sup>[19]</sup> 등은 온도 측정을 위해 두 레이저 파장을 사용하고 산소 및 질소의 흡수선을 사용하여 고도 1 km 까지 대기 온도를 최대 1°C 까지 측정하였다. 또한 Endemann 및 Byer<sup>[20]</sup>는 3파장 차등흡수 라이다 기술 및 수증기 흡수 라인을 사용하여 대기의 온도와 습도를 동시에 측정하여, 2.3°C의 정확도를 보였다.

30 km 이상의 고도에서는 에어로졸의 양이 적기 때문에 Rayleigh라이다를 주로 이용하여 온도를 측정한다. 현재 기상청에서 현업으로 온도측정으로 많이 사용되고 있는 장비는 대표적으로 라디오존데(Radiosonde)가 있다<sup>[21]</sup>. 라디오존데는 60년 이상의 오랜 기간 전 세계적으로 광범위한 지역에서 사용하고 있는 장비로 기구(balloon)에 온도, 습도 등의 기상 관측센서를 장착하여 온도뿐만 아니라 습도, 풍속 등의 대기상태를 알 수 있는 장비이다. 대기 중 많은 종류의 기상 정보를 획득이 가능하다는 장점이 있고, 0.2°C의 작은 오차를 가지고 있는 장점이 있는 반면에 관측 방법의 특성상 1회만 측정이 가능하고 관측 후 수거가 힘들기 때문에 운영비용이 비교적 높은 단점이 있다.<sup>[21]</sup> 반면에 라이다는 운용비용이 적고 시간, 장소에 상관없이 온도측정이 가능하기 때문에 라디오존데와 같이 측정을 하면 시너지 효과를 낼 수 있을 것으로 기대된다.

라이다를 이용한 국내 연구는 지금까지 태양에 의한 배경신호로 인하여 주로 밤 시간에만 이루어지고 있다. 대기의 상태 변화는 밤 시간보다 낮 시간에 더 복잡하고 잦은 횡수로 일어나기 때문에 낮 시간 대기 측정은 반드시 이루어져야 한다.

낮 시간 대기측정을 하기위해서 태양에 의한 배경신호를 줄여야 하고, 온도측정에 적당한 회전 라만 신호를 선택해야 한다<sup>[22]</sup>. 회전 라만 신호는 탄성산란(Mie/Rayleigh) 신호와 파장 차이가 크지 않기 때문에 파장선택에 주의를 필요로 한다.<sup>[23-27]</sup> 일반적으로 354.7 nm의 레이저를 사용할 경우 353.35 nm와 354.2 nm의 파장을 온도에 비례/반비례하는 파장으로 선택하여 두 신호의 비로부터 온도를 구한다. 그러나 탄성산란 신호와 파장 차이가 너무 작아 탄성 산란 신호의 유입에 민감하므로 회절판과 기타 광학계의 기계적 안정성에 의존하여 온도변화에 앞의 두 파장에 비하여 비교적 덜 민감한 353.1 nm와 반비례한 353.9 nm를 회전 라만 신호 파장으로 선정하여 그 비를 구하여 온도를 측정하였다. 개발된 장치의 성능을 검증하기 위하여 본 연구에서는 라이다를 수평으로 조사를 하여 즉 일정한 고도에서 온도를 측정하여 기상에서 발표한 온도와 회전 라만 신호의 상관관계를 알아보았고, 표준 데이터와 비교를 하여 고도에 따라 온도하강속도

가 어떻게 되는지 알아보았다. 그리고 이러한 자료를 근거로 장비를 검증하여 라디오존데(Radiosonde)와 라이다의 데이터를 비교 분석하여 검증을 실시하였다.

## II. 실험 장치 및 온도 측정

### 2.1. 이론적 배경

라이다를 이용하여 원격으로 대기의 온도를 측정하는 기본 이론은 대기의 주성분인 질소와 산소가 들뜬(excited state) 정도에 의존하여 그 신호의 크기가 바뀌는 원리를 이용하는 것이다. 회전라만 천이(transition)가 일어나서 그 빛을 다시 발하는 즉, 회전라만 산란 신호의 크기는 간단히 다음과 같이 쓸 수 있다.<sup>[28]</sup>

$$I_{j \rightarrow j} = PLnF(J, T) \left( \frac{d\sigma_{j \rightarrow j}}{d\Omega} \right) \quad (1)$$

여기서  $P$ 는 레이저의 출력이고,  $L$ 은 측정거리 즉, 라이다의 경우 측정 거리분해능(cm)에 해당한다. 그리고  $n$ 은 대기가 스 즉, 질소와 산소의 밀도(분자 수/cm<sup>3</sup>) 그리고  $F$ 는 분배함수를 나타낸다. 회전에너지의 분배함수는 다시 다음과 같이 표현된다.

$$F(J, T) = Q^{-1} g_J (2J+1) \exp\left(-\frac{E_J}{kT}\right) \quad (2)$$

여기서  $Q^{-1}$ 는  $\sum_j F(J, T) = 1$ 을 만족하도록 정해지며,  $E_J$ 는 양자수가  $J$ 인 공기분자의 회전에너지를 나타내며  $E_J = J(J+1)\beta hc$ 이고  $h$ 는 플랑크 상수,  $c$ 는 빛의 속도,  $\beta$ 는 상수이고 질소의 경우 그 값이 1.98973 cm<sup>-1</sup>이고 산소의 경우 1.4378 cm<sup>-1</sup>이다. 그리고  $T$ 는 온도를 나타낸다.  $g_J$ 는 스핀과 관련된 가중치(weight factor)이고  $k$ 는 볼츠만상수를 나타낸다. 차등 회전 산란단면적  $\frac{d\sigma_{j \rightarrow j}}{d\Omega}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d\sigma_{j \rightarrow j}}{d\Omega} = d\sigma_{zz, j \rightarrow j} / d\Omega ((1-\rho)\cos^2(\phi) + \rho) \quad (3)$$

여기서  $d\sigma_{zz, j \rightarrow j} / d\Omega$ 는 입사빔과 같은 편광으로 회전 라만 산란되는 빛의 산란단면적을 나타내며 일반적으로  $d\sigma_{zz, j \rightarrow j} / d\Omega = \frac{64}{45} \pi^4 b_{j \rightarrow j} (\omega_0 + \Delta\omega_{j \rightarrow j})^4 \gamma^2$ 로 나타내며  $b_{j \rightarrow j}$ 는 선형 모양의 분자의 플라젝-텔러(Placzek-Teller)계수,  $\omega_0$ 는 레이저의 진동수  $\Delta\omega_{j \rightarrow j}$ 는 라만 파장이동 즉, 진동수 이동을  $\gamma$ 는 공기분자의 편광텐서의 비등성 정도를 나타낸다.

온도에 따른 회전 라만 산란신호는 회전양자수( $J$ ) 값이 10보다 큰 것은 온도에 비례하여 그 신호의 크기가 증가하고 반대로 10보다 작은 것은 온도에 반비례하게 그 신호의 크기가 변한다<sup>[29]</sup>. 이러한 이유 때문에 많은 연구자들은 식 (4)의

R값을 많이 이용하여 온도를 구한다.

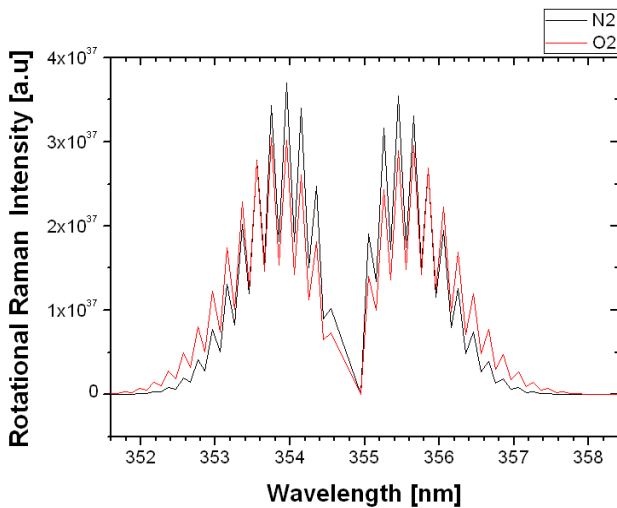
$$R(T,p) = \frac{I_1(T,P) - I_2(T,P)}{I_1(T,P) + I_2(T,P)} \quad (4)$$

식에서  $I_1, I_2$ 는 각각 Fig. 1(b)의 필터1, 2를 통하여 얻은 라이다 신호를 의미한다. 또 다른 방법으로 온도 응답 함수를 정의 할 수 있는데, 본 연구에서는 R을 단순히  $R = I_2(T,P)/I_1(T,P)$ 로 정의하여 사용하였다. 즉, 온도 측정 라이다의 경우 일반적으로 두 개의 파장을 사용하는데, 온도에 대하여 양적으로 (Positive) 민감한 파장과 음적으로(Negative) 민감한 파장을 택하여 그 값을 이용하여 온도를 구한다. 두 파장은 첫째로, 온도에 민감하게 변하는 파장이어야 하며, 둘째는 가능한 신호의 크기가 커야하며, 셋째는 가능한 원래의 탄성산란신호와 파장 차이가 많이 나야 한다. 본 연구에서는 최적의 파장을 얻기 위하여 이론적으로 구해지는 식 (2)를 이용하여 온도에 따른 산란 신호 크기변화의 민감도를 계산

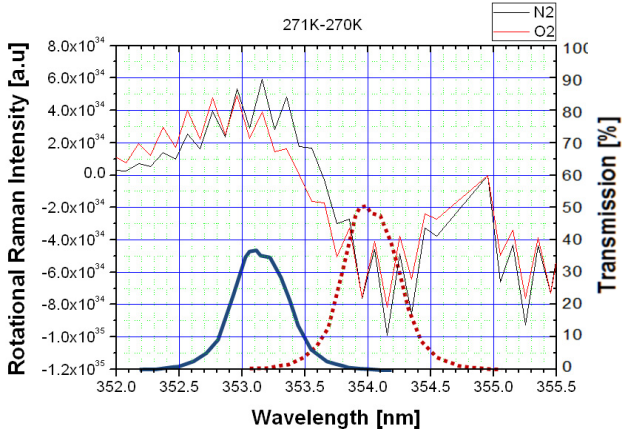
하고 이로부터 최적의 파장을 선택하였다. Fig. 1(a), (b)는 계산 결과를 보여주는 것이다. 그림 (a)는 질소와 산소에 의하여 산란되는 라만 신호의 단순 크기를 나타낸 것이고, 그림 (b)는 온도가 270에서 271 K로 변했을 경우 그 회전 라만 신호 차이를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 353.1 nm 에서는 +값을 가지나, 354.1 nm 근처에서는 -값을 나타낸다는 것을 볼 수 있다.

본 연구에서는 이러한 점을 고려하고 앞에서도 언급하였듯이 탄성라만 신호와 파장차이 등을 고려하여 최적으로 파장으로 353.1 nm와 353.9 nm를 최적의 파장으로 선정하였다. 이러한 파장 선택에 의하여 온도 변화와 신호의 비 변화는 실제 라이다를 설계하는데 매우 중요한 특성 중의 하나이다. Fig. 2는 온도 변화에 따른 두 신호의 비 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 상온에서 영하 13℃까지 변하는데 비(Q)는 약 0.6에서 0.4로 약 0.2에 해당하는 비 변화가 발생한다는 것을 알 수 있다. 대략적으로는 즉 1℃ 변화하는데, 신호비의 변화는 0.2/40 즉 0.005 즉 4%의 신호 변화가 있다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 광자 계수기를 사용하여 신호를 받기 때문에 광자의 통계적 오차는 신호의 크기에 반비례한다. 즉 광자가 10,000개 올 경우 100개 정도의 오차가 발생하며 이는 1%의 오차가 발생한다. 즉 온도 측정 분해능을 높이기 위하여 가능한 많은 광자를 받아야하는데, 레이저의 성능과 망원경의 크기 그리고 센서의 효율 등에 관여 된다. 시간 분해능을 고려하지 않는다면 측정 시간을 늘림으로써 온도 분해능을 올릴 수 있다.

온도 변화 혹은 온도의 오차와 라이다 신호의 변화가 온도 변화 혹은 오차에 미치는 영향을 좀 더 구체적으로 살펴보자. 본 연구에서는 다른 연구자들처럼<sup>[2]</sup> 두 신호의 비 ( $R = P_2/P_1$ ) 측정값으로 하고 그 값과 온도와의 상호관계를 이용하여 온도를 측정하고자 하였다. 그러므로 온도변화는 두 신호의 변화에 의하여 결정되므로 수학적으로는 다음과 같이 표현되고, 배경신호를 포함하고 있다면 다음과 같이 표현된다.



(a) Wavelength dependent rotational Raman signals



(b) Rotational Raman signal difference for two different temperature (271K, 270K)

FIG. 1. Nitrogen and oxygen rotational Raman signal characteristic.

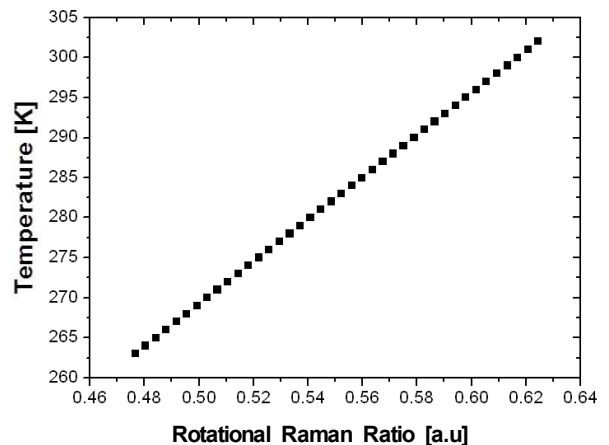


FIG. 2. The relation between two Raman signal ratio and temperature.

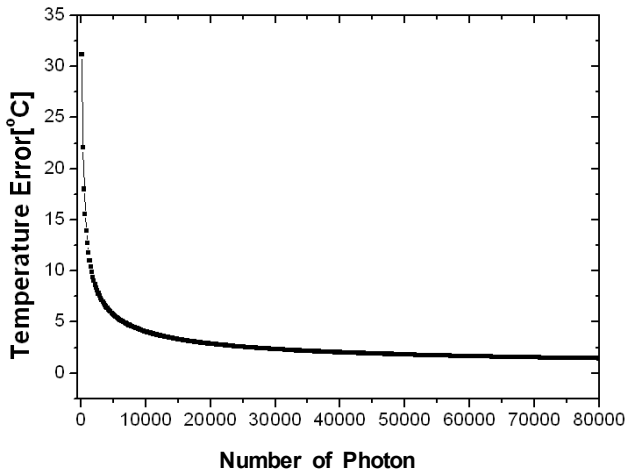


FIG. 3. Statistical temperature measurement errors with signal amplitude.

$$\begin{aligned}
 \Delta T &= \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial P_1} \Delta P_1\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial P_2} \Delta P_2\right)^2} \\
 &= \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial P_1} \frac{\partial T}{\partial R} \Delta P_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial P_2} \frac{\partial T}{\partial R} \Delta P_2\right)^2} \quad (5) \\
 &= \frac{T_1 - T_2}{R_1 - R_2} R \sqrt{\frac{P_1 + P_{B1}}{P_1^2} + \frac{P_2 + P_{B2}}{P_2^2}}
 \end{aligned}$$

여기서  $P_1, P_2$ 는 라이더의 신호,  $P_{B1}, P_{B2}$ 는 각각  $P_1$ 에서의 배경신호,  $P_2$ 에서의 배경신호를 나타낸다.

식 (5)로부터 라이더 신호의 크기( $P_1, P_2$ )에 따른 온도 오차의 특성을 조사해 볼 수 있다. Fig. 3은 신호의 크기(포톤수의 양)에 따른 온도측정 오차를 나타낸 것이다. 그림은 식 (5)를 이용하여 구한 것으로 광자는 일반적으로 푸아송(Poisson) 분포를 하기 때문에 그 통계적 특성을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 포톤의 양이 증가할수록 오차범위는 32°C에서 2°C까지 줄어드는 것을 알 수 있다. 10,000번의 레이저의 펄스를 누적하여 측정을 하게 되면 평균 50,000개의 포톤이 산란되어 돌아오는데, 라이더를 이용하여 온도측정을 할 경우 오차범위는 2°C라는 것을 알 수 있다.

2.2. 장비 구성

본 연구에서는 낮 시간에 측정을 하기 위해 송신부에서는 레이저의 발산각을 최소화시키기 위하여 광속확대기(beam expander)를 사용하고, 망원경의 시야각(Field Of View)은 이러한 주어진 레이저의 발산각에 맞추어 최소화 시켰다. 그리고 수신부에서는 작은 구멍, 회절판, 광섬유, 간섭필터를 사용하여 배경신호를 줄였다. Table 1은 연구에 사용된 장비의 사양이다.

언급한 것처럼 레이저의 발산각은 매우 중요하며, 본 연구에서는 빔 확대기를 2개의 렌즈(Negative Lens와 Positive Lens)로 구성하여 음렌즈를 움직여서 레이저의 발산각을 조절할 수 있게 하였다. 제작된 빔 확대기는 음렌즈를 나사가

TABLE 1. Technical characteristics of the LIDAR system

|       |             |                       |
|-------|-------------|-----------------------|
| 레이저   | 파장          | 354.7 nm              |
|       | 에너지         | 230 mJ                |
|       | 반복율         | 10 Hz                 |
| 빔 확장기 | 배율, 발산각     | 5배, 100 $\mu$ rad     |
|       | 망원경         | 시야각 (Field Of View)   |
| 회절판   | 초점거리        | 3,556 mm, f/10        |
|       | 크기          | 102 $\times$ 102 mm   |
|       | Grooves     | 1649.5 g/mm           |
|       | Blaze angle | 18°                   |
| 필터    | F1          | 353.1 nm (밴드폭 0.5 nm) |
|       | F2          | 353.9 nm (밴드폭 0.5 nm) |
|       | F3          | 360 nm (밴드폭 17.3 nm)  |
| 센서    | PMT         | Hamamatsu R9880U-210  |

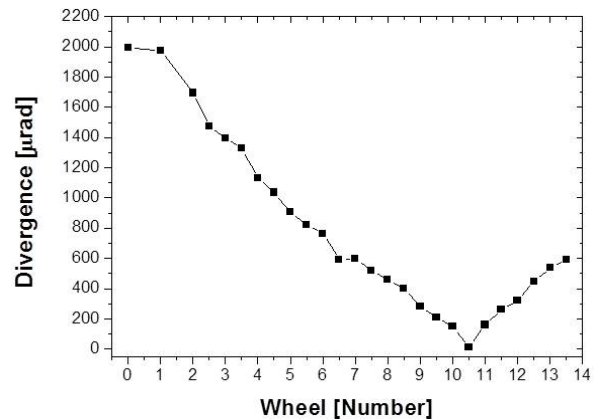


FIG. 4. Beam divergence changes with beam expander adjustment.

달린 마운트에 결속하고 나사를 돌려서 그 간격을 조절할 수 있는 장치로 구성되어있는데, Fig. 4는 나사를 14회전 정도 회전시켰을 경우 레이저의 최종 발산각을 나타낸 것이다. 1회전은 약 0.18 mm에 해당하며 100  $\mu$ rad을 유지하는데 기계적으로 1.8 mm를 안정적으로 움직이고 유지할 수 있어야 하는데, 이는 충분히 제작이 가능하고 충분히 제어 할 수 있는 값에 해당한다. 그림에서 알 수 있듯이 나사를 10.5회 정도 회전하였을 때 그 발산각이 최소가 되고, 결국 발산각은 100  $\mu$ rad이하게 된다. 이러한 발산각의 대기의 자연스런 요동(fluctuation)에 근접한 값으로 더 이상 값을 줄여도 소용이 없다.

수신부에서는 태양광에 의한 배경신호를 줄이고 탄성산란 신호를 10<sup>-6</sup>이상 줄이기 위하여 회절판과 간섭필터를 사용하였다. 또한 망원경의 초점면에 400  $\mu$ m 크기의 작은 구멍을 설치하여 망원경을 통하여 포집되는 빛 중에서 레이저의 방향에서 후방산란 된 빛만 입사되도록 하였다. 망원경의 초점거리(3,556 mm)를 고려한다면 망원경의 FOV는 112  $\mu$ rad으로 레이저의 발산각과 거의 같다. 망원경으로 통하여 포집된

빛은 작은 구멍을 통과한 후 45도 꺾인 미러를 통하여 4인치 시준렌즈를 통과하여 평행 빔 상태로 된 후 회절판으로 입사한다. 회절판은 배경신호를 줄이고 온도측정에 필요한 회전 라만 신호(353.1 nm, 353.9 nm)와 탄성 신호(354.7 nm)만 나누어서 받기위하여 사용하였다. 회전 라만 신호와 탄성 신호의 파장 간격은 회절판과 시준렌즈에 의하여 결정되는데 계산과 이론적 배경을 통하여 결정하였는데, 두 신호의 간격은 700 μm이며 이 값 역시 기계적으로 제작이 가능한 값이다. 본 연구에 사용한 회절판은 Richardson Gratings사의 제품으로 크기는 102 × 102 mm이고, 1649.5 g/mm, 블레이즈 각도는 18°이다. 회절판을 통하여 분리된 빛은 4인치 시준렌즈를 통과한 후 다시 초점이 맺히는데, 초점이 맺히는 부분에 400 μm의 광섬유 뭉치를 놓아 회전 라만 신호와 탄성 신호만 선택적으로 받아들일도록 구성 하였다. 광섬유 뭉치에 있는 353.1 nm와 353.9 nm 용 광섬유는 서로 광축으로부터 대칭이 되도록 설치하여 기하학적 중첩효과(overlap factor)에 의한 근거리 측정 오차를 줄이도록 하였다. 광섬유 뭉치를 통하여 수집한 빛을 평행광으로 바꾸기 위하여 렌즈군을 설치하였으며 353.1 nm 빛을 투과시키기 위하여 353.9 nm의 필터를 기울여 사용하였다. 회전 라만 신호를 얻기 위한 간섭 필터는 BARR사의 Narrow band filter 2개(F1, F2)를 서로 다른 각도로 투과 시켜서 원하는 파장만을 얻을 수 있도록 하였으며, 탄성 산란 신호를 얻은 채널은 Semrock사의 FF01-360/12-25 filter(F3)를 사용하였다. 본 연구에 사용된 센서는 354.7 nm파장부근에서 양자 효율이 40%로 좋은 Hamamatsu사의 Bi-Alkali계통의 R9880U-210의 PMT(Photomultiplier Tube)를 사용하였다. 실험장치의 전체 구성도는 Fig. 5와 같다.

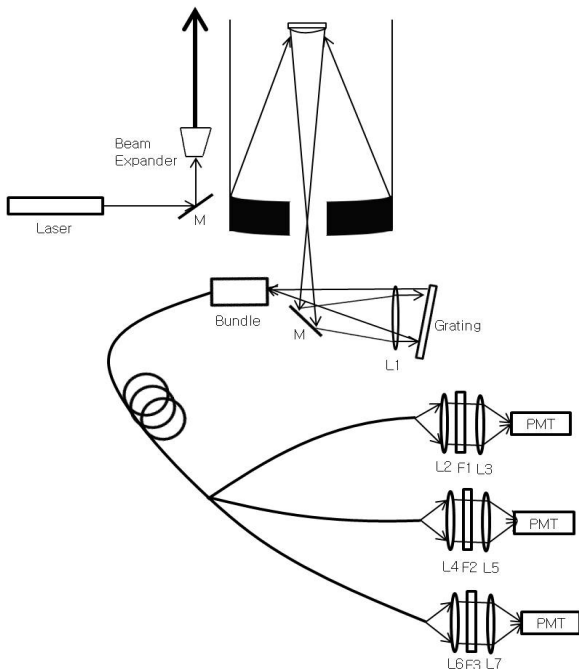


FIG. 5. Experimental setup for measuring rotational Raman LIDAR system.

### III. 결과 및 토의

본 연구는 낮 시간 온도측정이 가능한 라이다를 자체 제작하여 측정을 하였다. Fig. 6은 낮 시간 온도측정을 위하여 오전 10시 30분부터 오후 5시까지 광자의 적분시간(Bin-Time)을 200 nsec로 평균을 1,000번 하여 태양에 의한 배경신호 크기를 측정한 것이다. 본 배경신호는 라이다를 실험하는 조건과 같은 조건에서 실험한 것으로 라이다의 FOV와 필터의 물리적 상태 등이 실제 라이다 신호를 측정하는 경우와 같은 상태로 측정한 것이다. 오후 1시에서 1시 30분에는 구름으로 인하여 태양광이 약해져 포톤의 개수가 줄어들었지만, 낮 시간에는 1,600개의 광자가 배경신호로 들어오는 것을 알 수 있는데, 이 값은 푸아송(Poisson statistics)통계에서 통계적으로 40개 정도의 값이 요동 된다는 것을 의미한다. 실제 야간에 얻어지는 라이다 신호에서 광자의 수가 약 40개 정도 얻어지는 거리가 S/N비가 1이 되는 지점이고 최대 측정거리가 된다. 만약 레이저 펄스수를 100,000번으로 한다면 배경신호는 160,000개가 되고 이때 신호의 요동은 400개가 되는 곳까지 측정을 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

온도측정을 하기위해 회전 라만 신호와 탄성 산란 신호의 구분은 낮 시간 배경 신호를 줄이는 것만큼 중요하다. Fig. 7은 2011년 12월 23일 구름이 낀 흐린 날씨에 측정한 데이터로 회전 라만 신호가 탄성 신호의 영향을 받는지 알아보기 위하여 10,000번의 레이저 펄스를 누적하여 측정을 하였다. 탄성 산란 신호(354.7 nm)를 보면 1,800 m의 고도에 구름에 의한 신호변화가 있음을 알 수 있지만, 회전 라만 신호에서는 탄성 신호와 같은 신호변화가 생기지 않았다. 이를 통하여 탄성 산란 신호에 영향을 받지 않는 회전 라만 신호만 수집한다는 것을 알 수 있다.

라이다를 이용하여 획득한 회전 라만 신호의 비와 온도의 상관관계를 알아보기 위하여 라이다를 수평으로 조사하여 수평구간의 온도를 측정하였다.

Fig. 8은 2012년 4월 24일과 4월 28일에 100,000번의 펄스

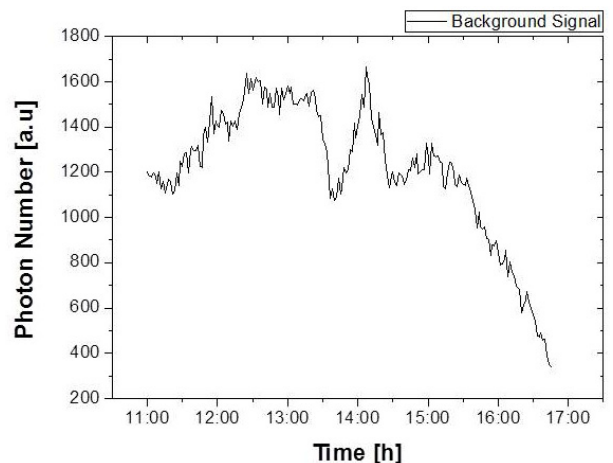


FIG. 6. Background signal from sunlight (2011. 12. 5).

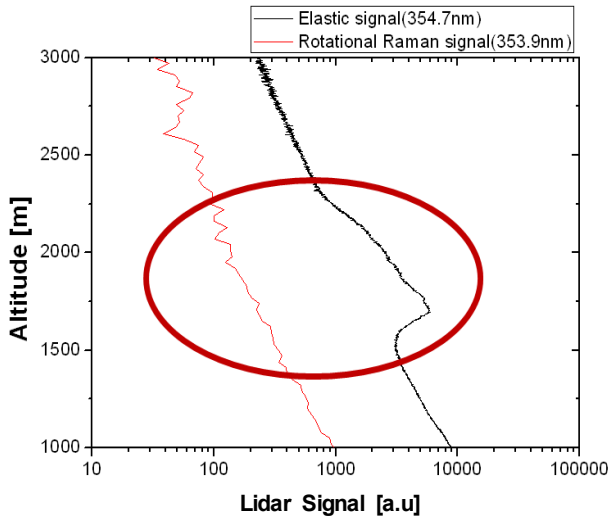


FIG. 7. Rotational Raman signal and elastic signal on the cloud atmosphere (2011. 12. 23).

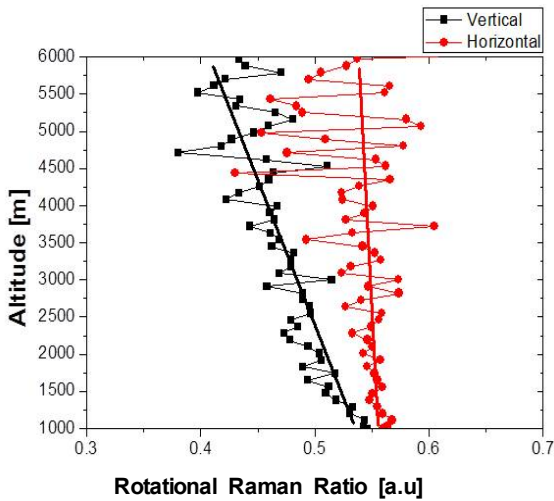


FIG. 8. Rotational Raman signal ratio for two horizontal and vertical directions (2012. 4. 24, 4. 28).

를 누적하여 측정된 수평과 수직구간의 데이터이다. 수직으로 조사한 경우의 회전 라만 신호의 비는 0.6에서 0.5로 고층으로 올라 갈수록 감소하는 경향을 보이고 있고, 수평으로 조사한 경우에는 0.5의 값을 일정하게 유지하는 것을 알 수 있다. 이는 대기 온도의 분포가 일정한 고도에서 일정하다는 것을 말하며, 본 연구에서 측정된 라이다 신호가 정상적으로 동작하고 있음을 보여준다. Fig. 9는 2012년 5월 22일 20시부터 5월 23일 3시까지 측정된 회전 라만 신호의 비와 온도이다. 실험 당시 온도는 23°C에서 18.2°C로 4.8°C의 온도의 변화가 있었고, 회전 라만 신호의 비는 0.755에서 0.722까지의 0.030의 변화가 있음을 알 수 있다. 식 5와 Fig. 3의 광자수에 따른 온도측정 오차값에 따르면 본 실험에 경우 30,000번의 포톤이 들어오면 식 5에 의하여 통계적으로 약 2°C의 오차가 있는 것을 알 수 있는데, Fig. 9는 이렇게 이론적으로

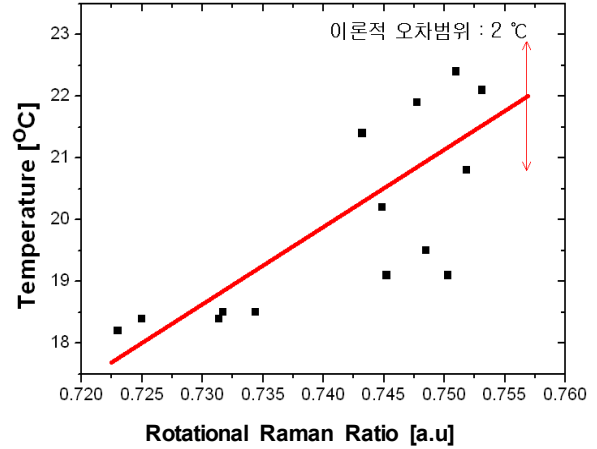


FIG. 9. Correlation between rotational Raman ratio and the KMA temperature (2012. 5. 22~5. 23).

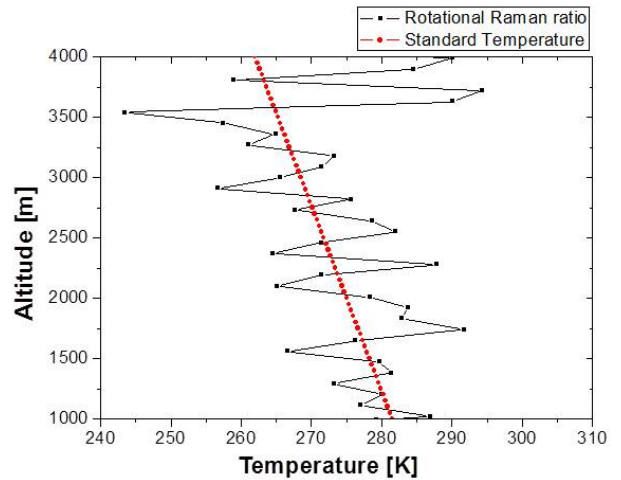


FIG. 10. Comparison between LIDAR data and US standard temperature profile (2012. 4. 24).

계산한 온도변화와 라이다 실험을 통해서 구한 회전라만신호의 변화값이 오차범위 내에서 나온다는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 상관관계를 통하여 라이다 신호 비(R)와 온도의 상관관계를 얻었으며 차후 온도 그래프는 라이다 비만 얻어서 온도를 알 수 있도록 하였다.

Fig. 10은 2012년 4월 24일 100,000번의 레이저 펄스를 누적하여 수직으로 조사를 하여 얻은 라이다 데이터와 고도별 표준 온도 데이터이다. 표준 온도 데이터를 보면 고도가 100 m 상승할수록 0.6°C의 온도가 하강하여 1,000 m~3,300 m에서의 온도 변화가 10°C~5°C인 것을 알 수 있고, 1,000 m~3,300 m 부근의 라이다 데이터 또한 요동이 있지만 표준 온도 데이터와 유사한 기울기로 온도가 떨어지는 것을 알 수 있다.

라이다로 측정된 온도의 데이터를 검증을 위하여 포항기상대에 있는 라디오존데와 동일한 시간에 같은 장소에서 실험을 하였다. Fig. 11은 2012년 1월 6일에 측정된 라이다와 라

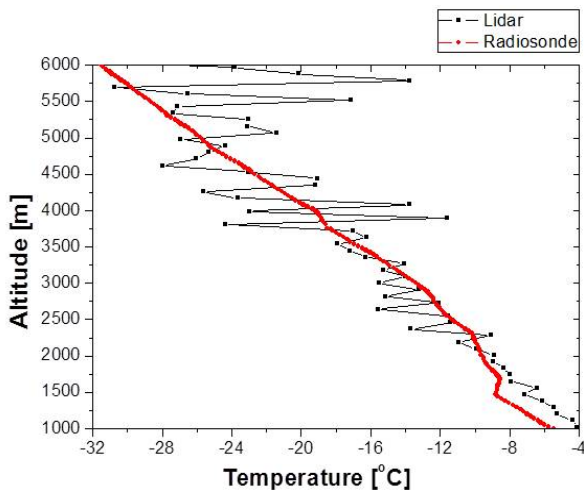


FIG. 11. Comparing between LIDAR with Radiosonde (2012. 1. 6).

디오존데의 데이터이다. 회전 라만 신호는 최대 6,000 m 거리까지 측정이 가능하였고, 또한 회전 라만 신호에 탄성 라만 신호가 영향을 주지 않는 것을 알 수 있었다. 본 라이더 신호는 2시간 동안 얻은 신호를 모두 적분하여 얻은 것이다. 라디오존데의 데이터와 비교를 해보면 고도가 높아짐에 따라 온도가 낮아지는 것을 볼 수 있다. 1,000 m에서 1,500 m 까지의 고도에서는 기하학적 현상(Geometry Factor)과 많은 양의 포톤으로 인하여 생기는 포화현상(Saturation)의 영향으로 인하여 가까운 곳에서는 오차가 발생하기 때문에 약간의 차이가 있지만, 1500 m 이후의 데이터를 비교해보면 라디오존데와 라이더의 데이터가 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 온도측정 라이더를 자체 개발하여, 대기의 온도를 측정하였다. 낮 시간에는 태양에 의한 배경신호로 인하여 측정 거리 및 온도분해능에 한계점을 갖고 있었는데, 본 연구에서는 이 한계점을 보완하기 위하여 첫째, 송신부에서 레이저의 발산각을 100  $\mu$ rad으로 줄이고 둘째, 수신부에서는 회절판, 광섬유 뭉치, 간섭필터를 이용하여 배경신호를 줄이고 셋째, 온도측정에 필요한 파장의 회전 라만 신호와 탄성 신호만 선택적으로 얻을 수 있도록 장비를 구성하였으며, 이를 통하여 밤 시간에는 물론 낮 시간에도 온도 측정이 가능하도록 제작하였다.

연구에 사용한 파장은 Nd:YAG 레이저의 3차 조화파(354.7 nm)를 사용하였는데, 다른 연구자들의 경우 일반적으로 354.7 nm의 레이저를 사용할 경우 353.35 nm와 354.2 nm의 파장을 온도에 비례/반비례하는 파장으로 선택하여 신호의 비로 온도를 구할 수 있었다. 그러나 본 연구에서는 탄성산란 신호와 파장차이가 회전 라만 신호가 탄성 신호의 영향을 받을 수 있기 때문에 회절판과 기타 광학계의 기계적 안정성에 의존하여 앞의 두 파장보다 온도변화에 민감도는 약간 떨어지지만 탄성산란신호의 영향을 받지 않는 353.1 nm와 353.9

nm의 파장을 선택하여 두 신호의 비로부터 온도를 구하였다. 낮 시간 특히 태양광의 효과가 최대인 12~13시 사이에도 3 km 이상 라이더 신호를 얻을 수 있었다. 라이더를 통하여 측정된 데이터의 검증을 위하여 수평으로 조사를 하여 얻은 회전 라만 신호의 비와 기상청에서 발표한 온도의 상관관계를 알아보았고, 이를 바탕으로 장치를 검증하였으며, 검증된 값을 이용하여 고도에 따른 온도를 측정하였다. 고도에 따른 온도분포는 표준데이터와 라디오존데의 데이터와 비교하여 구축된 장비의 성능을 검증하였다. 개발된 장비를 라디오존데 장비와 같이 사용한다면, 두 장비의 장단점을 서로 보완 할 수 있을 것이며, 실시간으로 정확한 온도를 측정이 가능하고, 더 많은 시너지 효과가 기대된다.

#### 감사의 글

이 논문은 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2012-6170)의 지원으로 수행되었습니다.

#### References

1. S. H. Melfi, "Remote measurements of the atmosphere using raman scattering," *Appl. Opt.* **11**, 1605-1610 (1972).
2. J. Mao, L. Hu, D. Hua, F. Gao, and M. Wu, "Pure rotational raman LIDAR with fiber bragg grating for temperature profiling of the atmospheric boundary layer," *Opt. Applicata* **38**, 715-726 (2008).
3. M. Radlach, A. Behrendt, and V. Wulfmeyer, "Scanning rotational raman LIDAR at 355 nm for the measurement of tropospheric temperature fields," *Atmos. Chem. Phys.* **8**, 159 (2008).
4. A. Behrendt and J. Reichardt, "Atmospheric temperature profiling in the presence of clouds with a pure rotational raman LIDAR by use of an interference-filter-based polychromator," *Appl. Opt.* **39**, 1372-1378 (2000).
5. J. Zeyn, W. Lahmann, and C. Weikamp, "Remote daytime measurements of tropospheric temperature profiles with a rotational raman LIDAR," *Pot. Lett.* **21**, 1301 (1996).
6. P. Di Girolamo, R. Marchese, D. N. Whiteman, and B. B. Demoz, "Rotation raman LIDAR measurements of atmospheric temperature in the UV," *Geophys. Res. Letters* **31**, 1106 (2004).
7. D. Kim, H. Cha, J. Lee, and S. Bobronikov, "Pure rotational Raman LIDAR for atmospheric temperature measurements," *J. Korean Phys. Soc.* **39**, 838 (2001).
8. D. Kim, S. Park, H. Cha, J. Zhou, and W. Zhang, "New multi-quantum number rotational Raman LIDAR for obtaining temperature and aerosol extinction and backscattering scattering coefficients," *Appl. Phys.* **82**, 1-4 (2006).
9. M. R. Gross, T. J. McGee, R. A. Ferrare, U. N. Singh, and P. Kimvilakani, "Temperature measurements made with a combined Rayleigh-Mie and raman LIDAR," *Appl. Opt.* **36**, 24 (1997).

10. G. Baumgarten, "Twin Doppler Rayleigh/Mie/Raman LIDAR for wind and temperature measurements in the middle atmosphere up to 80 km," *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* **3**, 2779 (2010).
11. M. Alpers, R. Eixmann, C. Fricke-Begemann, M. Gerding, and J. Hoffner, "Temperature LIDAR measurements from 1 to 105 km altitude using resonance, Rayleigh, and Rotational Raman scattering," *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* **4**, 923 (2004).
12. G. Baumgarten, "Dopper Rayleigh/Mie/Raman LIDAR for wind and temperature measurements in the middle atmosphere up to 80 km," *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* **3**, 1509 (2010).
13. K. V. Chance and R. J. D. Spurr, "Ring effect studies : Rayleigh scattering, including molecular parameters for rotational Raman scattering, and the Fraunhofer spectrum," *Appl. Opt.* **36**, 5224 (1997).
14. W. Huang, W. Huang, X. Chu, J. Wiig, B. Tan, C. Yamashita, T. Yuan, J. Yue, S. D. Harrell, C.-Y. She, B. P. Williams, J. S. Friedman, and R. M. Hardesty, "Field demonstration of simultaneous wind and temperature measurements from 5 to 50 km with a Na double-edge maneto-optic filter in a multi-frequency Doppler LIDAR," *Opt. Lett.* **34**, 1552 (2009).
15. A. J. Mcdonald, Botan, and X. Chu, "Role of gravity waves in the spatial and temporal variability of stratospheric temperature measured by COMIC/FORMOSAT-3 and Rayleigh LIDAR observations," *Geophys. Res.* **115**, 19128 (2010).
16. X. Chu, "Temperature LIDAR (6) integration technique," <http://superLIDAR.colorado.edu/Classes/LIDAR2011/LIDARLecture16.pdf> (2011).
17. A. Cohen, M. Kleiman, and J. Cooney, "LIDAR measurements of rotational raman and double scattering," *Appl. Opt.* **17**, 1905-1910 (1978).
18. J. E. Kalshoven Jr., C. L. Korb, G. K. Schwemmer, and M. Dombrowski, "Laser remote sensing of atmospheric temperature by observing resonant absorption of oxygen," *Appl. Opt.* **20**, 1967-1971 (1981).
19. M. Endemann and R. L. Byer, "Simultaneous measurements of atmospheric temperature and humidity using a continuously tunable IR LIDAR," *Appl. Opt.* **20**, 3211 (1981).
20. C. G. Park, J. H. Baek, and J. H. Cho, "Analysis on characteristics of radiosonde bias using GPS precipitable water vapor," *J. Astron. Space Sci.* **27**, 213-220 (2010).
21. J. Ha and K. D. Park, "Estimation of water vapor vertical profiles in the atmosphere using GPS measurements," *Atmosphere* **19**, 289-296 (2009).
22. D. Renaut and R. Capitini, "Boundary-layer water vapor probing with a solar-blind Raman LIDAR: validations, meteorological observations and prospects," *J. Atmos. Ocean. Technol.* **5**, 585 (1988).
23. D. H. Kim, H. K. Cha, and S. Bobronikov, "Measurement of aerosol backscattering coefficient using multichannel rotational raman scattering," *J. Korean Phys. Soc.* **39**, 838 (2001).
24. D. Hua, J. Liu, K. Uchida, and T. Kobayashi, "Daytime temperature profiling of planetary boundary layer with ultraviolet rotational raman LIDAR," *Appl. Phys.* **46**, 5849-5852 (2007).
25. A. Hauchecorne, M. L. Chanin, P. Keckhut, and D. Nedeljkovic, "LIDAR monitoring of the temperature in the middle and lower atmosphere," *Appl. Phys.* **55**, 29-34 (1992).
26. M. Jiandong, X. Zhen, W. Min, H. Dengxin, and G. Fei, "Ultraviolet rotational raman LIDAR for high accuracy temperature profiling of the planetary boundary layer," *Proc. SPIE* **7130**, 71301E, 1-6 (2008).
27. D. Kim and H. Cha, "Rotational Raman LIDAR: design and performance test of meteorological parameters (aerosol backscattering coefficients and temperature)," *J. Korean Phys. Soc.* **51**, 352 (2007).
28. D. Nedeljkovic, A. Hauchecorne, and M.-L. Chanin, "Rotational raman LIDAR to measure the atmospheric temperature from the ground to 30 km," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **31**, 1 (1993).
29. D. Kim, S. Kwon, H. Cha, Y. Kim, and J. Sunwoo, "A newly designed single etalon double edge Doppler wind LIDAR receiving optical system," *Rev. Sci. Instrum.* **19**, 123111 (2008).