

대기 온도 측정용 회전 라만 라이다 시스템의 설계

Designing of Rotational Raman Lidar system measuring Atmospheric Temperature

김덕현, 차형기, 이종민, Serguei Bobronikov*

한국원자력연구소 양자광학팀

dhkim3@kaeri.re.kr

라이다 방법을 이용한 대기의 온도 측정은 크게 1) DIAL 방법을 이용하는 방법 2) 공기분자의 밀도를 측정하는 진동 라만 산란을 이용하는 방법 3) 공기분자의 회전 라만 산란을 이용하는 방법 4) Rayleigh 산란의 선폭을 이용하는 방법 등으로 나누어진다. 이 중에서 대류권의 온도 측정에 적용 가능한 방법은 3 번째의 방법으로 질소나 산소의 회전 라만 산란(RRS:Rotational Raman Scattering)이 가장 흔히 사용되는 기술이다. 질소와 산소의 회전 라만 신호를 이용한 온도 측정 기술은 Cohen¹ 등에 의하여 처음 시도되었으며, 그 후 많은 사람들에 의하여 검증되었다.² 이 방법은 대기의 온도에 따라 공기 분자(질소와 산소)의 회전에너지준위 분포가(Rotational Energy Level Distribution) 불쓰만 분포를 하는 관계로 온도에 따라 달라지는 현상을 이용하는 것이다. 상온에서 라만 산란되는 파장은 아래 그림 1 과 같이 나타나는데, J=6을 기준으로 양자수가 이보다 큰 값을 지니는 분자의 수는 온도가 증가하면 증가하고 반대로 이보다 작은 값을 지닌 분자는 감소한다. 입자의 초기 양자 상태가 J 인 공기분자의 RRS 신호는 양자역학적으로 빛과 상호작용에 의하여 J=J±2 인 상태로 라만 이동이 가능하다. 그러므로 J=6 보다 큰 입자의 RRS 라이다 신호와 J 가 6보다 작은 입자에 의한 RRS 라만 신호를 동시에 측정하여 그 비를 구하면 온도에 따라 민감하게 변하는 값을 얻을 수 있다. K 라는 공기분자 (질소 혹은 산소)에 의하여 RRS 산란되는 라이다 신호는 일반적으로 다음과 같이 표현되는데,

$$P_{\nu,K} = P_0 N_K \Delta r \tau(\nu_0) F_{JK}(T) \sigma_K(\nu_J) \tau(\nu_J) \frac{A}{4\pi r^2} \quad (1)$$

여기서 P_0 는 레이저의 에너지, N_k k 분자의 밀도, Δr 라이다 시스템의 공간분해능, $\tau(\nu_0)$ 레이저 파장의 대기 투과도, $F_{J,k}(T)$ 는 온도 T에서 양자수 J 상태에 있는 대기 분자 K의 비율, $\sigma_k(\nu_J)$ 산란 파장 ν_J 를 내는 RRS 산란단면적, $\tau(\nu_J)$ RRS 산란 파장의 대기 투과도, 그리고 A 는 수신망원경의 단면적을 나타낸다. 여기서 $F_{J,k}(T)$ 는 다시 다음과 같이 온도에 따라 다른 값을 지니게 된다.

$$F_{J,k} = Q_K^{-1} g_{J,K}(2J+1) \exp(-E_{J,k}/kT) \quad (2)$$

여기서 Q_K 는 $F_{J,k}(T)$ 를 정규화(Normalization)시키는 회전분배함수(Ratation partition function), $g_{J,K}$ 는 온도에 비례하여 변하는 양이고($\propto T$), $E_{J,k}$ 는 J 양자 상태에 있는 K 분자의 에너지, 그리고 k는 불쓰만 상수를 각각 나타낸다. 식 (2)에서 알 수 있듯이 라이다 신호는 온도와 파장(ν_J)에 따라 그 크기가 변하는 것을 알 수 있다. 온도 측정 라이다는 이러한 면에서 적절한 파장의 선택에 그 성공 여부가 결정된다고 할 수 있다. 파장의 선택은 대기분자가 내는 형광의 유무, Rayleigh 산란이나 Mie 산

란과 같은 탄성 산란의 크기, 그리고 온도에 대한 라이다 신호의 민감도 등에 의하여 결정된다. 특히 RRS 산란 신호는 탄성 산란 신호에 비하여 산란단면적이 약 10^{-4} 정도로 작고, 또한 탄성산란 신호와의 파장 차이가 $10\text{--}50 \text{ cm}^{-1}$ 정도로 작기 때문에 라만 신호를 얻는 수신광학계에 탄성산란 신호가 개입될 가능성이 크다. 이러한 현상은 온도 측정에서 오차로 작용하는데, 본 연구에서는 라이다 시스템 개발을 위하여 이러한 탄성산란 신호의 효과가 온도 측정에 미치는 영향을 고려하였으며, 또한 수신 파장에 따른 라이다 신호의 크기를 계산하고 이로부터 수신 파장에 포함된 신호의 통계적 잡음을 고려하여 온도 계산에서 오차의 크기를 계산하였다. 이를 바탕으로 레이저의 파장에 따른(355nm, 532 nm) 최적의 RRS 파장을 선정하였으며, 각각의 경우 측정 오차의 크기를 계산하였다. SSR 파장과 탄성산란 파장을 구별하기 위하여 광섬유로 구성된 수신광학계를 설계하고 이를 이용하여 이로부터 신호를 획득 할 수

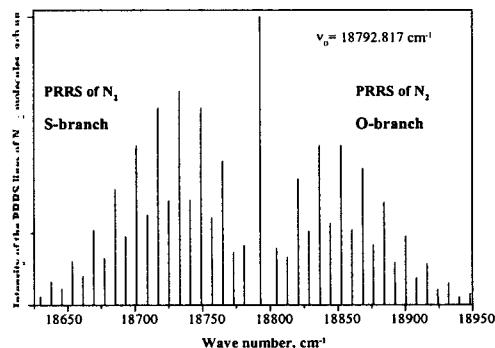


그림 1. RRS 신호의 크기

있도록 하였다. 수신 광학계는 두 개의 회절판과 광섬유로 구성되며 전체 수신광학계의 주요 구성성분은 표 1에 나타내었다. 광학계의 설계는 최고 측정거리의 예측에서 망원경의 수신 단면적을 결정하고, 수신망원경의 단면적과 초점거리에 의하여 수신광의 F 수를 결정한 후에, 광섬유를 통하여 회절판으로 입사되는 수신광의 크기를 F 수가 결정된다. 온도에 가장 민감한 RRS 파장이 이론적으로 결정되면 탄성산란 신호와의 파장 차이에 의하여 필요한 회절판의 사양이 결정된다. 여기서 가장 중요한 사항은 회절판의파장에 따른 분산도(dispersion)가 중요하게 고려되어야 하므로 회절판의 브레이즈각도(blaze angle)와 분해능이 선택된다. 수신광의 F 수와 회절판의 분해능이 결정되면 수신광학계에 사용되는 렌즈의 크기와 회절판의 크기도 결정된다. 그림 2는 고려된 광학계를 이용하여 설치되는 수신장치의 개략도이다.

망원경 직경	500mm	Aff-Axis Mirror	
망원경의 F#	12	Fiber	0.6mm, 1.2mm
Ruled (Grating	60*120mm, 600 l/mm, Blaze angle=51 degree		

표 1. 주요 수신 광학계의 사양

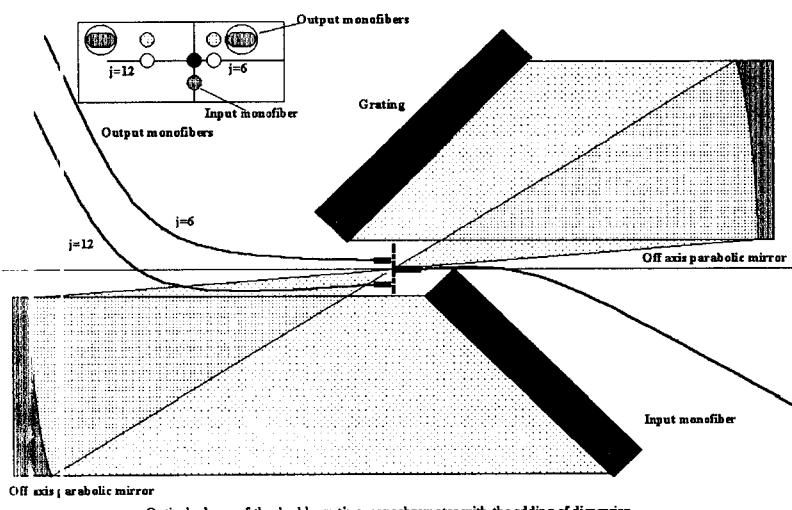


그림 2 . 온도 측정용 회전 라만 시스템의 구성

1. A. Cohen, J. A. Cooney, and K. N. Geller, Applied Optics 15, 2896(1976)
2. G. Vaughan, D. P. Wareing, S. J. Pepler, and L. Thomas, Applied Optics 32, 2758(1993)