

## 라만 Lidar 기술을 이용한 대류권 수증기와 물방울 입자의 밀도 측정 (Detection of tropospheric water vapor and liquid water density by using Raman lidar technique )

김덕현, 차형기, 이종민, 최성철\* 김영상\*  
한국원자력연구소, 양자광학기술개발팀,\*고려대학교 화학과  
dhkim3@kaeri.re.kr

대기 중에 존재하는 수증기(water vapor)와 물방울 입자(liquid water)는 대기의 열 순환 과정에서 이산화탄소와 함께 매우 중요한 역할을 하는 중요한 변수이다. 대류권의 수증기 밀도를 라만 라이다 기술을 이용하여 원격으로 측정하려는 시도는 오래 전부터 있었으나, 물방울 입자의 밀도 측정은 최근에 연구가 시작되었으며, 특히 수증기의 밀도 측정에서 물방울 입자의 라만 신호가 심각한 오차요인으로 알려지면서 이에 대한 연구가 구체적으로 진행되었다.[1-2] 라만 라이다 연구는 대기 중에서 비교적 흡수가 적고 산란단면적이 큰 레이저 광원의 선택이 매우 중요하다. 본 연구에서는 경계층(boundary layer) 이상까지 수증기와 물방울 입자의 라만 신호를 얻기 위하여 대기 투과도가 좋은 Nd:YAG 레이저의 제 3 조화파(355nm)를 광원으로 사용하였고, 물방울 입자와 수증기에 의하여 라만산란되는 402 nm와 408nm 신호를 수신하였다. 탄성산란 신호와 두 라만 신호를 분리하기 위하여 간섭 필터, 반도체 흡수 필터, 그리고 이색성 거울을 사용하였는데, 아래 표는 사용된 광학계의 투과도와 레이저 파장에서 탄성 산란신호(355nm)의 제거율을 각각 나타낸다. 간섭 필터와 이색성 거울 그리고 반도체 흡수 필터를 함께 사용할 경우 탄성산란 신호의 총 제거율은  $10^7$  이상으로 충분하다. 그림 1 은 수증기와 물방울 입자의 파장에 따른 산란 단면적(20 °C 에서)과 두 필터의 투과도를 나타낸 것이다. 두 필터에서 얻어지는 산란광은 질소에 의한 라만 신호에 의하여 규격화되고(normalizing), 이 값은 일반적으로 밀도에 비례하는 양이다.

|                            | 투과도 (%) | 탄성신호 제거율 |
|----------------------------|---------|----------|
| 간섭필터                       |         |          |
| 386.7 nm (nitrogen)        | 42      | $>10^5$  |
| 401.5 nm (liquid water)    | 12      | $>10^5$  |
| 407.8 nm (for water vapor) | 29      | $>10^5$  |
| 이색성 거울                     | 93      | 200      |
| 386.7 nm                   | 88      |          |
| 401.5 nm                   | 88      |          |
| 407.8 nm                   |         |          |
| 반도체 흡수필터                   | 0.1     | $>10^5$  |
| 386.7 nm                   | 14.2    |          |
| 401.5 nm                   | 21.7    |          |
| 407.8 nm                   |         |          |

표 1. 사용된 광학계의 투과도 및 레이저 파장 제거율

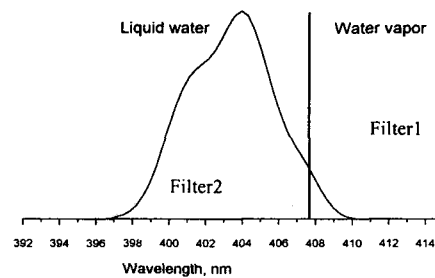


그림 1. 파장에 따른 수증기와 물방울 입자(liquid water)의 라만 신호 및 필터의 투과도

그림 2 는 맑은 날 측정된 수증기와 물방울 입자의 라만 신호를 질소의 라만 신호로 나눈 값을 고도에 나타낸 것으로, 에어로졸의 소광계수(extinction coefficient)도 함께 나타내었다. 고도 1.3 km 이상에서는 수증기의 밀도와 에어로졸의 소광계수가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있고, 맑은 날의 경우 물방울 입자의 라만 신호는 수증기의 그것에 비하여 10배 정도 작으나 흐린 날의 경우는 비슷한 정도의 산란 신호를 얻을 수 있다. 그러나 비가 온 직후에도 맑은 날과 비슷한 정도의 물방울 입자 라만 산란 신호를 얻을 수 있는데, 이것은 비가 온 직후 대기 중에는 대부분 물이 수증기 상태로 환원되기 때문이다. 수증기와 물방울 입자에 의한 라만 신호의 광학적 차이를 알아보기 위하여 수증기와 물방울 입자의 라만 산란 신호를 PMT에 입사시키기 전에 편광 광분해기를 설치하여 필터를 통과한 빛의 편광 특성을 동시에 관측하였다. 편광 특성을 관측하는 것은 두 산란 신호가 물리적으로 다른 특성을 지니고 있다는 것을 증명하는 것과 동시에 여러 광학계( 필터, 흡수필터, 이색성 거울)를 통하여 관측되는 물방울 입자와 수증기의 두 라만 신호에 탄성 산란신호나 기타 다른 질소에 의한 라만 신호가 포함되지 않는 것을 반증하는 것이라 할 수 있다. 그림 3 은 각 신호( 탄성, 질소, 수증기, 물방울 입자)의 비편광도를 나타낸다. 일반적으로 각 신호의 비편광도는 각각 0.2, 0.7, 0.1 그리고 0.05 정도의 비편광도를 나타내었다. 질소, 수증기 및 탄성 신호의 경우 산란과정에서 편광이 보존되는 반면 물방울 입자의 경우는 편광이 보존되지 않음을 알 수 있다.

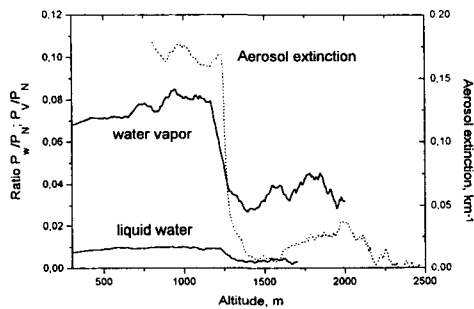


그림 2. 맑은 날에 측정된 대표적인 수증기, 물방울 입자 그리고 에어로졸의 신호( 질소의 라만 신호로 규격화함)

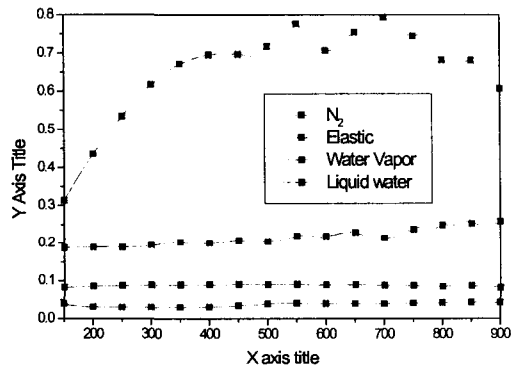


그림 3. 수증기, 물방울 입자, 질소의 라만 신호의 비편광도와 에어로졸의 비편광도

- [1] A. Ansmann, M. Riebesell, U. Wandinger, C. Weitkamp, E. Voss, W. Lahmann, and W. Michaelis, Appl Phys.B 55, 18 (1992).
- [2] D. N. Whiteman, G. E. Walrafen, Wen-Huang Yang, and S. H. Melfi, Appl. Opt. 38, 2614 (1999).