

DIAL 시스템을 이용한 대기오염 측정시 발생하는 체계적 오차의 보정

Correction of the systematic errors in the measurement of air pollutant by using DIAL System

김덕현, 차형기, 이종민, 최성철*
한국원자력연구소, 양자광학팀, *창원대학교 화학과
e-mail : hkcha@nanum.kaeri.re.kr

대류권 대기오염물질 중에서 이산화황, 이산화질소, 오존, 그리고 분진 등은 매우 중요한 원소들로서 오염의 지표로 자주 사용되고 있다. 특히 분진을 제외한 이들 원소들은 DIAL(Differential Absorption Lidar) 기술을 이용하여 측정되는 가장 대표적인 원소들이다. DIAL 측정에서 발생하는 오차는 광신호나 전기적 신호에 포함된 통계적 오차와 실험환경(송·수신계 및 대기상태)에 의한 체계적 오차로 구분된다. 통계적 오차는 검출한계와 측정거리를 정하는데 중요한 역할을 하며 일반적으로 보정이 불가능하나, 체계적 오차는 시스템의 설계과정과 실험과정에서 발생하는 것으로 실험방법과 software의 보완으로 보정이 가능하다.

이산화황과 이산화질소의 흡수 스펙트럼은 각각 300 nm와 448 nm 영역에서 좁은 선폭의 흡수띠를 가지고 있어서 DIAL로 사용되는 두 파장의 간격을 매우 좁게 (1 nm 이하) 설정할 수 있어서, DIAL 방법에서 발생하는 차등후방산란효과(differential backscattering effect)와 차등소광효과(differential extinction effect)가 무시할 수 있을 정도로 작다. 그러나 미세신호를 숫자화하는 과정에서 생기는 ADC(Analog to Digital Converter)의 비선형 효과⁽¹⁾, 비선형 결정을 통과하면서 생기는 프리즘 효과, 근거리에서 산란된 광과 원거리에서 산란된 광의 영상(image)의 위치차이에 의한 오차, 공명파장과 비공명파장의 파장변화에 의한 효과, 간섭필터의 면에서 생기는 공명파장(λ_{on})과 비공명파장(λ_{off})의 정렬상태와 발산각이 달라서 생기는 기하학적 효과, 대기의 상태 변화에 의한 효과, 그리고 선단증폭기와 같은 증폭기의 비선형성에 의한 오차 등은 항상 존재한다. 한편, 오존과 같이 흡수선폭이 넓어 공명파장과 비공명파장의 차이를 크게 하여야 하는 경우는 차등후방산란효과와 차등소광효과에 의해 발생하는 오차가 다른 요인들에 의해 발생하는 오차보다 크게 작용한다⁽²⁾.

이산화황과 이산화질소는 오차발생 요인이 유사하므로 본 논문은 이산화황의 오차발생 및 그 보정방법에 대하여 상술한다. 기하학적 효과를 최소화하기 위하여 두 파장의 레이저가 교대로 발진하는 두 파장발진 색소레이저를 이용하였으며, 색소레이저가 비선형결정(KDP)을 통과하면서 발생하는 색소레이저 파장과 제 2 조화파 사이의 프리즘 효과를 없애기 위하여 KDP의 wedge를 최대한 줄였다. 신호의 선단증폭기와 ADC의 비선형성에 의한 효과를 최소화하기 위하여 레이저의 공명파장과 비공명파장의 수신 신호 크기를 가능한 같게 하였다. 공명파장과 비공명 파장의 정렬상태에 따른 기하학적 효과를 최소화하기 위하여 레이저를 대기중에 조사하기 전에 광속확대기와 구경(aperture)의 크기를 조절하여 레이저의 발산각과 두 빛의 기우러짐에 의한 효과를 보정하였다. 광속확대기의 배율과 구경의 크기를 정하기 위하여 태양광이 없는 밤시간에 구경을 0.5~5 mm 이상으로 충분히 크게 하면서 최소 구경 크기를 정하고 낮시간의 실험에 이 값을 사용하였다. 여러 가지 오차의 크기는 같은 파장의 레이저를 대기중에

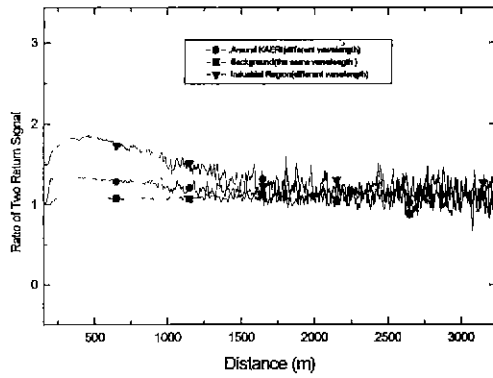


그림 1 체계적 오차에 의하여 생긴 신호비와 이산화황에 의하여 발생한 신호비

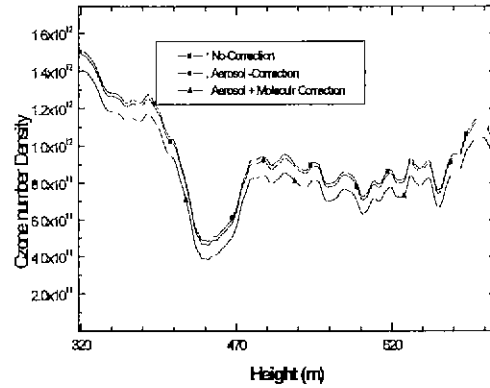


그림 2 오차가 보정된 오존의 밀도분포(cm^{-3})

조사하고 (레이저의 에너지, PMT의 전압, 기타 여러 가지 광학계를 실제 측정상태와 같게 하고) 이것에 의한 라이다 신호를 이용하여 이산화황 밀도의 요동을 계산하면 전체 시스템의 체계적 오차의 크기를 알 수 있다. 그림 1은 여러 지역에서 레이저의 공명파장과 비공명파장의 파장을 같게 혹은 다르게 설정하고 공명파장과 비공명파장의 라이다 신호를 획득한 후 그 비를 계산한 것이다. 그림에서 기울기의 절대 크기는 이산화황의 밀도와 비례한다. 같은 파장으로 얻은 신호비는 체계적 오차에 의한 보정값으로 이용하였다. 이러한 보정값은 DIAL을 구성하는 송·수신 광학계, 대기상태, 그리고 실험 변수 (레이저의 에너지, PMT의 전압, 정렬상태 등)에 따라 달라지므로 각 방향의 실험에서 이런 보정상수값을 구하고 이를 보정해야 하는 번거러움이 있다. 그러나 보정상수값이 측정 장소(공단, 청정지역)나 거리(그림 1의 x 축)에 따라 크게 변화하지 않고 그 크기가 수 ppb 이하로 작기 때문에 공단지역과 같은 지역에서 배경밀도의 측정에는 큰 오차요인으로 작용하지 않음을 알 수 있었다. 굴뚝과 같이 이산화황의 밀도가 높은 지역을 통과한 신호에서 얻은 이산화황의 밀도도 같은 방법으로 오차를 보정할 수 있었다.

오존과 같이 흡수선폭이 넓은 경우에 발생하는 차등후방산란효과와 차등소광효과를 보정하기 위하여 Nd:YAG 레이저의 제 4 조화파를 광원으로 사용하고 질소와 산소에 의하여 라만산란되는 283 nm 와 277.7 nm를 비공명파장과 공명파장으로 사용하는 새로운 형태의 Raman-DIAL 시스템을 구성하였다. 구성된 라이다 시스템에서는 비탄성 산란신호를 이용하기 때문에 DIAL에서 생기는 전형적인 체계적 오차항을 보정할 수 있다. 시스템 구성에서 가장 중요한 요소인 탄성 산란신호의 제거는 특수하게 제작된 흡수필터와 3 nm의 선폭을 지닌 간섭필터를 이용하였다. 그림 2는 두 라만 신호를 이용하여 분진의 차등후방산란효과와 차등소광효과를 보정한 오존의 밀도곡선을 나타낸 것이다. 분진에 의한 체계적 오차가 10% 이내로 미미함을 알 수 있으며, 분진의 소광계수는 두 라만 신호중에서 계산하여 보정한 것이다.



1. A. O. Langford, Appl. Opt. 34, 8330 (1995)
2. A. Papayannis, G. Ancellet, J. Pelon and G. Megie, Appl. Opt. 29, 457 (1990)