

레이저 원력에 의한 대기오염 측정기술

서론

현대사회의 산업화 과정에서 발생하는 여러 가지 부작용 중에서도 최근에 와서 가장 크게 부각되는 문제중의 하나는 대기오염이다. 불소화합물, 질소산화물, 황화물, 이산화탄소, 오존, 메탄가스 등 다양한 종류의 대기오염물질들은 광화학 스모그, 지구온난화, 자연림감소, 성층권 오존홀, 산성비 등의 원인을 제공하며, 자연생태계에 심각한 영향을 줌으로써 예측하기 어려운 불행을 야기하고 있다. 이와 같은 환경문제를 해결하기 위한 선결과제는 무엇보다도 광범위한 오염분포와 정확한 측정값을 실시간으로 제공할 수 있는 감시기술의 확립이라 할 수 있다. 대기오염의 측정방법으로 여러 가지 장비와 기술이 사용되고 있으나 대개의 경우 시료의 전처리 과정이 복잡하거나 인력이 많이 필요하고, 시시각각으로 변하는 대기의 특성상 지역과 고도, 그리고 시간에 따라 매우 큰 측정오차를 유발하게 마련이며, 또한 시료의 취득에서 측정에 걸리는 시간이 길어서 오염감시에 한계가 있다. 이러한 근본적인 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 실시간 측정이 가능한 레이저 측정법이 각광을 받고 있다.



차형기

한국원자력연구소 책임연구원

레이저를 이용한 원격 분석기술은 최근들어 선진 여러나라가 지대한 관심을 보이면서 급속한 발전을 이루고 있다. LIDAR (Light Detection And Ranging) 라 불리는 이 기술은 역사적으로 레이저 발견 이전인 1956년에 Friedland 등에 의하여 조명 등의 빛을 펄스화하여 대기 혼탁도에 대한 측정을 최초로 시도한 것에서 비롯하여, 레이저 발견 이후에는 1963년에 Ficco 등이 단펄스 루비 레이저광을 사용하여 처음으로 초고층 대기의 혼탁도를 측정하였으며, Schotland 는 1966년 DIAL (Differential Absorption LIDAR) 기술을 최초로 도입하여 수증기의 수직분포를 관찰하였다. 이 후 DIAL 기술은 적외선에서 자외선에 이르는 파장가변 레이저의 발명과 함께

대기오염 분석에 가장 널리 활용되는 LIDAR 기술이 되었다. 레이저를 사용하면 원격측정이 가능하며 이러한 농도 측정 행위는 지상에서 뿐만 아니라 선박, 헬리콥터, 비행기 또는 인공 위성 등에서 광범위하게 수행될 수 있다. 특히 자동차에 탑재한 측정장비는 감시대상 지역을 순회하면서 의심이 가는 곳을 집중적으로 관측할 수 있기 때문에 오염감시에 매우 효율적이어서 선진국에서는 이미 오래전부터 연구개발에 심혈을 기울이고 있다.

환경오염 물질 측정에 LIDAR 기술을 활용할 수 있는 영역은 다음과 같다. 즉, (1)오염성분의 농도측정을 통한 오염감시, (2)대기환경의 열적, 구조적 및 동력학적 특성의 평가, (3)오염성분의 허용치(threshold 농도) 감시에 의한 경보(alarm) 효과, (4)오염물질의 대기 확산에 대한 시간적·공간적 mapping 등이다.

LIDAR 시스템의 기본구성

LIDAR 시스템은 레이저 송신장치를 이용하여 직진성이 강한 레이저광을 대기중으로 조사한 후 일정시간 후에 되돌아 오는 후방산란 신호를 대구경의 망원경을 이용하여 수신한다. 이때 사용되는 레이저는 수 나노 (10억분의 1) 초 정도의 짧은 펄스의 레이저광을 사용하며 조사 후 수신되는 광과의 시간적인 차를 거리로 환산한다. 후방산란되는 빛의 광량은 후방산란계수 및 광원에서 후방산란되는 지점까지의 소멸계수(extinction coefficient)에 의하여 결정된다. 즉 후방산란되는 빛은 산란빛의 경로에 존재하

는 공기 분자와 에어로졸에 따라서 변하므로 후방산란되는 빛을 검출하는 것은 그들의 효과를 측정하는 것이다. 특히 광센서는 레이저 조사 후 돌아오는 빛을 수 MHz 로 sampling 하여 검출하므로 각 위치에 따른 후방산란 강도를 얻는 것이 된다. 즉 LIDAR 신호는 공간분해능을 가진다.

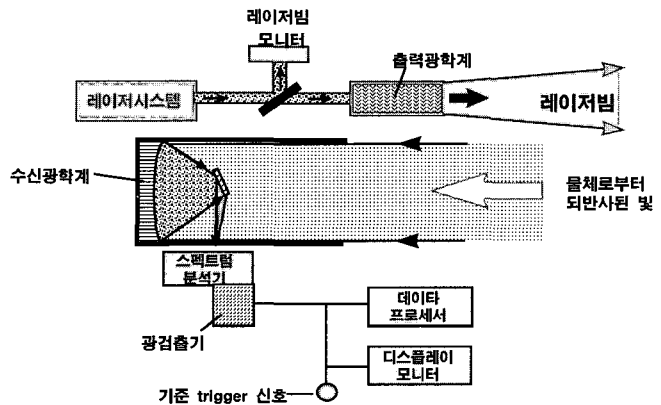


그림 1. LIDAR 시스템의 기본 구조

LIDAR 시스템은 그림 1 에서 보듯이 레이저 송신장치, 수신광학계, 스펙트럼 분석기, 신호처리계 등으로 구성된다. 레이저는 자외선 영역의 엑시머 레이저나 질소 레이저를 비롯하여 적외선 영역의 탄산가스 레이저에 이르기까지 다양한 종류가 사용되고 있다. 레이저는 측정하고자 하는 대상물질의 특성 및 측정방법에 따라 다음과 같은 요소를 감안하여 선정한다. 즉, 침투출력, 파장선폭, 출력시간, 빔퍼짐도(divergence) 등이다. 펄스 반복율이 크면 신호가 작은 경우 여러 번의 신호를 누적시켜 평균치를 사용할 수 있으므로 신호처리에 효과적이다. 레이저의 세기는 일반적으로 측정거리 및

농도범위 (dynamic range) 에 관계하며, 후방산란신호와 비례관계만 존재하므로 측정물질의 물리화학적 특성 (농도, 온도, 압력) 과는 큰 관계가 없다. 그러나 평균출력이 일정한 레이저를 LIDAR에 이용할 경우 S/N 비를 높이기 위하여 펄스반복율과 펄스에너지를 적절히 조절하여야 한다. 레이저 파장의 선택은 후방산란단면적, 레이저 혹은 후방산란된 빛의 흡수계수, 광센서의 파장에 따른 민감도 등과 밀접한 관계가 있다. 그러므로 레이저 파장은 주의 깊게 선택되어야 한다. 일반적으로 레이저 파장이 짧을수록 후방산란되는 빛의 양은 많으나 흡수계수 또한 크므로, 광센서로 입사되는 광량은 후방산란되는 빛의 광경로에 존재하는 공기의 상태에 크게 의존한다. 그러나 300 nm 이하에서는 산소와 오존의 흡수계수가 커지므로 원거리 측정은 불가능하다. 파장이 길어지면 측정거리는 크나 배경잡음이 많이 존재하는 단점 때문에 적외선 영역의 레이저빔은 흔히 간섭형 LIDAR에 많이 활용된다.

대류권의 대기오염 측정

지표에서 가까운 경계층 (지표면에서에서 2~3km 이내) 안에서 환경오염 물질을 실시간으로 광범위하게 측정·감시하는 것은 매우 중요하다. 대류권에서의 물질이동은 시간에 따라 매우 급격히 변하고 있어 고정된 지점에서 좁은 영역의 농도변화를 측정하는 것은 곤란 그릇된 정보를 제공하며, 오염원을 감시하는데는 한계가 있다. 레이저를 이용한 원격측정법 중에서 DIAL 방법은 성층권의 오존을 측정하는데 유용한 수단일 뿐만 아니라 대류권의 대기오염을 측정하는데도 매우 유용하다. 일반적으로 DIAL

기술은 그 감도 (sensitivity)가 매우 높아 대부분의 기체의 경우 그 측정한계값이 1ppb 정도에 달한다. 또한 파장가변 레이저를 사용할 경우 자외선에서 적외선에 이르는 다양한 파장을 선택할 수 있으므로 많은 기체에 대해 선택성이 아주 뛰어나다.

최근 한국원자력연구소에서는 대류권에 존재하는 여러 가지 오염기체중에서 SO_2 , NO_2 , O_3 , 분진 등의 대기오염물질을 원격으로 측정할 수 있는 이동형 LIDAR 시스템이 개발되었다. 이 장치는 측정거리는 약 3~5 km이며, 측정시간은 10분 이내이며 검지범위는 ppb(part per billion)에서 수%에 달한다.



그림 2 대기오염분석용 이동형 LIDAR 시스템

그림 2는 대기오염분석용 이동형 LIDAR 시스템의 구성도를 보여준다. 차량탑재형 방식으로 실외용 발전기를 항상 탑재하도록 되어있다. 사용된 레이저는 Q-스위칭 Nd:YAG 레이저로서 0.5~1.0 J 정도의 펄스 에너지에 반복율은 30 Hz 이다. 색소 레이저는 이중파장 공진기와 두 개의 증폭기로 구성되어 있고, 펄프레이저의

반복율에 맞춰서 chopper는 두 개의 다른 파장의 레이저를 발진시킨다. 그림에서 빔분리기에 의해 갈라진 레이저빔은 거울에 의해 grating에 입사되는데, 이 때 입사되는 각도를 조절함으로써 두 레이저빔간의 파장간격을 조절한다. 일반적으로 레이저를 대기중으로 조사할 때 빔 퍼짐도를 감소시키기 위해 망원경을 이용하여 10배 이상 확대시킨다. 대기에서 되반사(backscattered) 되는 빛은 망원경을 통해 모아지고, 스펙트럼 분석기를 통해 검지된다. 낮에 측정할 경우 하늘로부터 발생하는 배경광을 제거하기 위해 좁은 선평 (3-nm 이하) 의 간섭필터를 사용한다.

그림 3은 대도시 중심부의 이산화질소 농도 분포를 보여 준다. 그림에서 검게 표시된 부분의 농도는 상대적으로 높은 지역인데, 주로 대형 아파트 주변이나 차량 정체 지역이 이에 해당된다. 이 농도값은 청정지역의 배경 농도에 비해 20배 이상 높은 값이다.

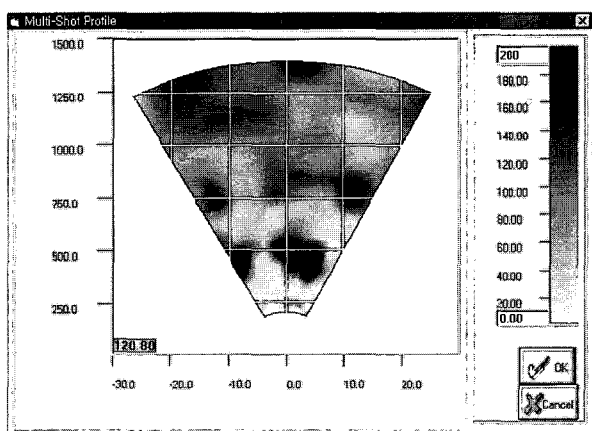


그림 3. 대도시 주변의 이산화질소 농도 분포

활용전망

LIDAR 기술은 대기오염 측정뿐만 아니라, 대기의 기상관측에도 탁월한 성능을 제공한다. 풍속으로 움직이는 분진(에어로졸)들에 레이저 광이 조사될 경우 도플라 효과에 의해 되반사되는 빛은 미세한 주파수 이동값을 가지며, 이러한 원리에 의해 개발된 레이저 도플라 속도계는 대류권의 풍속에 대한 원격 정밀측정이 가능하게 한다. 대기 중에 다량으로 존재하지만 대기압에 의해 그 밀도가 변하는 산소 분자의 차분흡수 현상을 이용하여 대기압의 분포를 측정할 수 있으며, 또한 이와 유사한 방법을 이용하여 대기 온도 분포도 측정가능하다. 이 밖에도 레이저 원격 형광장치를 비행기에 탑재하여 이용하여 해양에 오염된 기름의 유출을 검지할 수 있었으며, 우리나라를 비롯한 광역탐사나 해양의 어군탐사 등 광범위한 영역에 걸친 자원탐사에도 활용된다. 최근에는 우주선에 탑재하여 태풍의 경로추적 등 지구 전체를 대상으로 기상관측에 활용하고 있는 등 그 활용범위가 급격히 증대되고 있다.