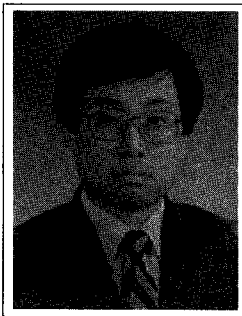


# 원격 대기 분석 기술(LIDAR)

## 개발 현황과 활용 전망

### 차 형 기

한국원자력연구소 양자광학랩 책임연구원



**86** 년에 발생한 옛 소련 체르노빌 원전 사고는 두 번의 연속적 폭발이 발생하면서 핵연료·분진·방사능 가스 등이 상당량 자연계로 유출되는 심각한 사건이었다. 지하 핵실험 때 발생하는 효과와 유사한 극한 환경을 만들면서 분진 구름은 1.5km 고도까지 도달하였고, 36시간 내에 1,200km까지 방사능 물질이 확산되면서, 27종류의 방사능 물질이 대기 중에 존재했다.

따라서 이에 대한 사고 처리를 위해서 사람이 어느 정도 접근할 수 있

는지에 대한 판단도 어려웠다.

이때 옛 소련 정부는 사고 지점에서 수km 떨어진 후방에서 레이저 원격 분석 기술을 이용하여 사고 원자로에서 방출되는 핵연료, 방사능 가스, 수증기의 온도 등을 측정하였고, 아울러 풍향·풍속 등 기류의 변화도 레이저 기술을 이용하여 측정함으로써, 주변 지역으로의 방사능 확산도 예측할 수 있었다.

그리하여 여기에서 얻어진 정보는 사고의 심각성과 대책을 세우는 중요한 기초 자료로 제공되었다.

레이저를 이용한 원격 분석 기술은 최근 들어 선진 여러 나라가 지대한 관심을 보이면서 급속한 발전을 이루고 있다.

LIDAR(Light Detection And Ranging)라 불리는 이 기술은, 역사적으로 레이저 발견 이전인 56년에 Friedland 등에 의하여 조명 등의 빛을 펄스화하여 대기 혼탁도에 대한 측정을 최초로 시도한 것에서 비롯하

여, 레이저 발견 이후에는 63년에 Ficco 등이 단펄스 루비 레이저광을 사용하여 처음으로 초고층 대기의 혼탁도를 측정하였으며, Schotland는 66년 DIAL(Differential Absorption LIDAR) 기술을 최초로 도입하여 수증기의 수직 분포를 관찰하였다.

이후 DIAL 기술은 적외선에서 자외선에 이르는 파장 가변 레이저의 발명과 함께 대기 오염 분석에 널리 활용되는 LIDAR 기술이 되었다.

### LIDAR 기술의 원리

LIDAR 기술은 빛과 물질의 상호 작용 방법에 따라 반사 방법, 산란 방법, 흡수 방법으로 구분한다. 빛의 반사는 큰 물체에 의한 반사광을 원격적으로 계측하는 방법으로, 비행체·위성·달 등을 측정 대상으로 하고 있다. 빛의 산란 방법은 미소 입자에 의한 후방 산란광을 검출하는 방식으로, 후방 산란광의 상태에 따라 Mie

산란, Rayleigh 산란, 라만 산란, 형광 산란으로 구분한다.

이와 같은 반사 방법과 후방 산란 방법은 원칙으로 단일 파장을 사용하여 수신광의 세기를 계측 거리의 함수로 취급하여 대상 물체를 시공간적으로 해석할 수 있다. 그러나 흡수 산란 방법은 계측 대상 물체에 잘 흡수되는 파장의 빛과 흡수되지 않는 또 하나의 빛을 사용하여, 이 두 파장에 의한 후방 산란광의 세기를 비교하여 계측 대상 물체를 분석한다.

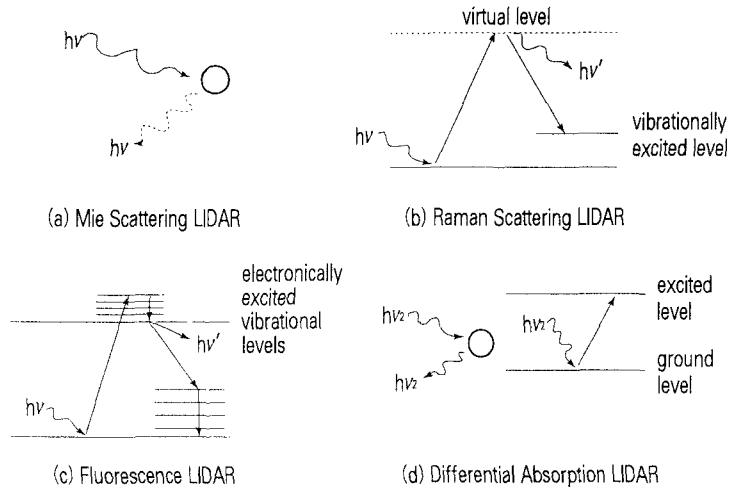
〈그림 1〉은 대표적인 LIDAR 기술의 분광학적 원리를 보여준다.

일반적으로 라만 산란 신호는 물체 선택성(species selectivity)은 탁월하나 신호의 세기가 매우 약하여, 대상 물체의 밀도가 비교적 커야 하며 측정 거리가 비교적 짧은 편이다.

Mie 산란의 경우, 물체 선택성은 없으나 신호의 세기가 커서 에어로졸의 분포 연구에 많이 사용된다.

흡수 산란 방법은 물체 선택성이 아주 높아, 대기 중에 존재하는 미량 성분 분석에 탁월한 성능을 제공한다.

형광 산란의 경우도 미량으로 존재하는 원자 상태의 대기 성분 분석에 많이 사용되며, 물체 선택성이 매우 탁월하여 원거리 측정이 가능하나, 형광을 발생시키는 레이저 파장을 얻어야 하는 제한성이 있다. 〈표 1〉은 여러 가지 분광 신호의 종류에 따른 LIDAR 기술의 응용성을 보여준다.



〈그림 1〉 분광학적 특성에 따른 대표적인 LIDAR 기술

〈표 1〉 분광 신호의 종류와 이를 이용한 LIDAR 기술의 특성

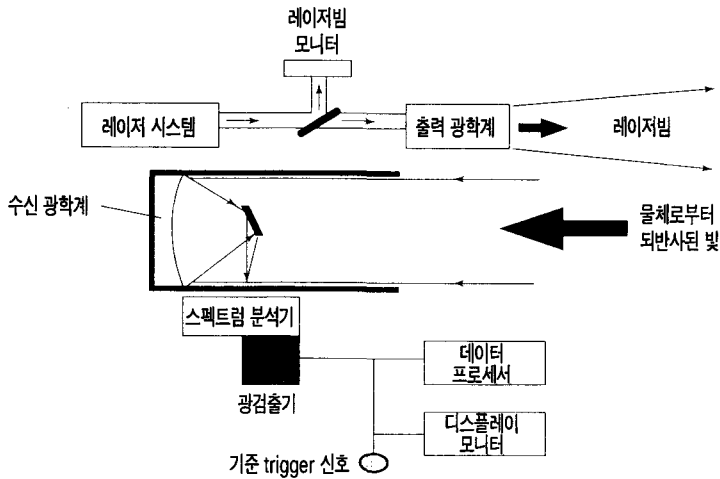
LIDAR 신호의 성격	신호의 상대 세기	선택성	응용 분야
Incoherent Raman Scattering	very weak	species specific	pollutant detection at short distance, humidity medium dist.
Rayleigh Scattering	weak	non-specific	molecular density determinations
Mie Scattering	high	non-specific	aerosol investigations, mirror for DIAL
Absorption	very high	species specific	trace analysis, pollution, radicals
Fluorescence	high for atoms under low pressure	species specific	trace atoms at high altitude : Na, K, Hg

### LIDAR 시스템의 기본 구성

LIDAR 시스템은 레이저 송신 장치를 이용하여 직진성이 강한 레이저 광을 대기 중으로 조사한 후 일정 시간 후에 되돌아 오는 후방 산란 신호를 대구경의 망원경을 이용하여 수신한다. 이때 사용되는 레이저는 수 나

노(nano, 10억분의 1)초 정도의 짧은 펄스의 레이저광을 사용하며 조사 후 수신되는 광파의 시간적인 차를 거리로 환산한다.

후방 산란되는 빛의 광량은 후방 산란 계수 및 광원에서 후방 산란되는 지점까지의 소멸 계수(extinction coefficient)에 의하여 결정된다.



〈그림 2〉 LIDAR 시스템의 기본 구조

즉 후방 산란되는 빛은 산란빛의 경로에 존재하는 공기 분자와 에어로졸에 따라서 변하므로 후방 산란되는 빛을 검출하는 것은 그들의 효과를 측정하는 것이다.

특히 광센서는 레이저 조사 후 돌아오는 빛을 수 MHz로 샘플링하여 검출하므로 각 위치에 따른 후방 산란 강도를 얻는 것이 된다. 즉 LIDAR 신호는 공간 분해능을 가진다.

LIDAR 시스템은 레이저 송신 장치, 수신 광학계, 스펙트럼 분석기, 신호 처리계 등으로 구성된다(그림 2).

레이저는 자외선 영역의 엑시머 레이저나 질소 레이저를 비롯하여 적외선 영역의 탄산 가스 레이저에 이르기까지 다양한 종류가 사용되고 있다. 레이저는 측정하고자 하는 대상 물질의 특성 및 측정 방법에 따라 다음과 같은 요소를 감안하여 선정한다.

즉 침투 출력, 파장 선포, 출력 시간, 빔 퍼짐도(divergence) 등이다.

펄스 반복률이 크면 신호가 작은 경우, 여러 번의 신호를 누적시켜 평균치를 사용할 수 있으므로 신호 처리에 효과적이다.

레이저의 세기는 일반적으로 측정 거리 및 농도 범위(dynamic range)에 관계하며 후방 산란 신호와 비례 관계만 존재하므로, 측정 물질의 물리 화학적 특성(농도·온도·압력)과는 큰 관계가 없다.

그러나 평균 출력이 일정한 레이저를 LIDAR에 이용할 경우 S/N비를 높이기 위하여 펄스 반복률과 펄스 에너지를 적절히 조절하여야 한다.

레이저 파장의 선택은 후방 산란 단면적, 레이저 혹은 후방 산란된 빛의 흡수 계수, 광센서의 파장에 따른 민감도 등과 밀접한 관계가 있다. 그

러므로 레이저 파장은 주의 깊게 선택되어야 한다. 일반적으로 레이저 파장이 짧을수록 후방 산란되는 빛의 양은 많으나 흡수 계수 또한 크므로, 광센서로 입사되는 광량은 후방 산란되는 빛의 광경로에 존재하는 공기의 상태에 크게 의존한다.

그러나 300nm 이하에서는 산소와 오존의 흡수 계수가 커지므로 원거리 측정은 불가능하다. 파장이 길어지면 원격 측정 거리는 크나, 배경 잡음이 많이 존재하는 단점 때문에 적외선 영역의 레이저빔은 흔히 간섭형 LIDAR에 많이 활용된다.

국내 개발 현황

국내의 LIDAR 분야에 대한 연구 현황은 아직 초기 상태지만, 일부 분야는 기초 연구 단계를 벗어나 응용 개발 단계에 접어들고 있다.

90년대에 들어와 몇몇 대학에서 실험실 수준의 기초·기반 연구를 먼저 수행하여 왔으며, 90년대 중반부터 한국원자력연구소를 중심으로 방사능 물질의 대기 확산에 대한 원격 탐지 기술 확보를 목적으로 본격적인 투자가 시작되었다.

현재는 러시아·미국·중국·일본 등과의 기술 협력을 바탕으로 단기간에 괄목할 만한 성장을 이루었다.

94년 오존을 비롯한 분자들의 원격 분석이 가능한 실증 시스템 개발을 완료하였으며, 원격 신호 분석용

소프트웨어 개발에도 많은 노력을 기울였다. 특히 성층권 오존에 대하여는 DIAL 기술을 사용하여 공간 분해능 250m 정도를 유지하면서 10~40km 영역의 오존 밀도를 측정하고 있다.

현재 다양한 종류의 대기 오염 물질을 3차원 공간적으로 매핑(mapping)할 수 있는 이동형 LIDAR 시스템의 시제품이 완성된 상태에 있으며, 기업체와의 상품화 개발을 모색 중에 있다.

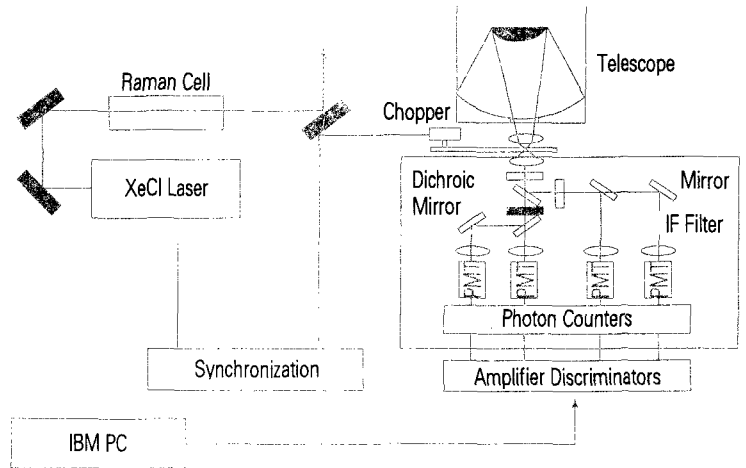
### 1. 성층권의 오존 측정

지상에서 약 10~40km 대기 상공에 해당되는 성층권의 오존 측정에 주로 사용되는 레이저는 XeCl 엑시머 레이저로서, 이 레이저의 파장은 308nm이다. 기준 파장으로 사용되는 353nm 파장의 빛은 308nm의 Raman shift된 파장을 이용하는데, 353nm는 1st Stoke 파장이다.

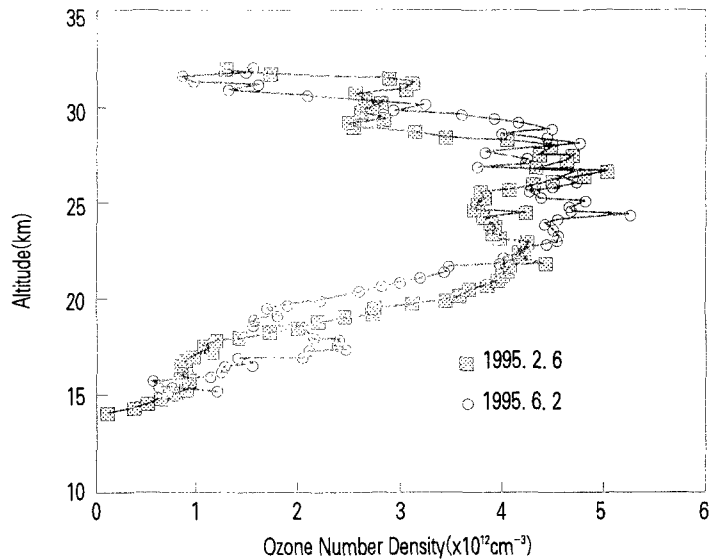
성층권 오존 측정용 DIAL 시스템의 구성도는 <그림 3>과 같다.

후방 산란 신호를 PMT에 집광하기 위해서 직경 60cm의 Cassegrain형 망원경을 사용한다. 스펙트럼 분석기는 4개의 PMT로 구성되어 있으며, 광량에 따른 PMT의 선형성을 고려하여 근거리 및 원거리에서 후방 신호를 분리할 수 있도록 하였다.

입사된 초기의 빛은 자외선 필터를 통과하게 되고, 다시 유전체 빔분리기를 통과하면서 353nm는 반사되고 308nm는 그대로 투과한다.



<그림 3> 성층권 오존 측정용 DIAL 시스템 구성도

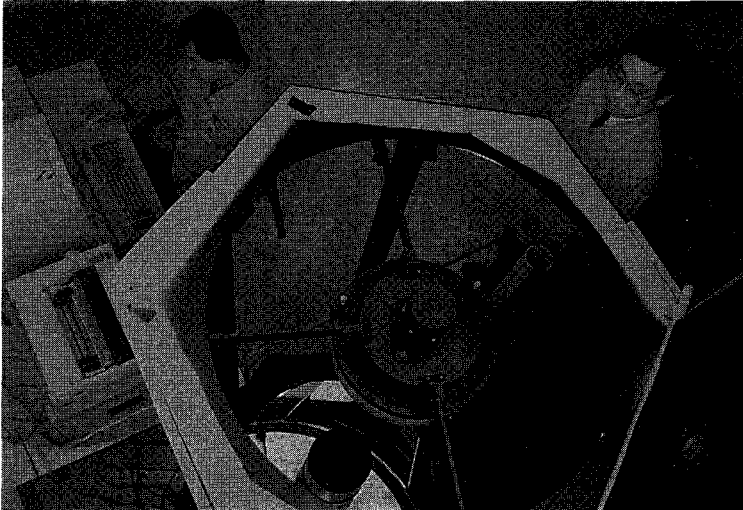


<그림 4> DIAL 방법으로 측정된 대전 상공의 오존 밀도

투과된 빛은 다시 빔분리기에 의하여 나누어진다. 일부 반사된 빛은 근거리 측정을 위하여 사용되며, 나머지는 원거리 측정에 사용된다.

<그림 4>는 이러한 방법으로 측정

하여 얻은 대전 상공의 오존 밀도 곡선으로서 초여름과 겨울의 오존 밀도를 나타내고 있는데, 여름철의 오존층 두께가 겨울에 비해 상대적으로 두껍다는 것을 알 수 있다.



60cm Cassegrainian형 수신 망원경으로 성층권 오존 밀도를 측정하고 있는 모습



대전 공단 주변에서 LIDAR 시스템을 이용하여 대기 오염을 측정하고 있는 모습

## 2. 대류권의 대기 오염 측정

지표에서 가까운 경계층(지표면에서 2~3km 이내) 안에서 환경 오염 물질을 실시간으로 광범위하게 측

정·감시하는 것은 매우 중요하다.

대류권에서의 물질 이동은 시간에 따라 매우 급격히 변하고 있어, 고정된 지점에서 좁은 영역의 농도 변화

를 측정하는 것은 곧잘 그릇된 정보를 제공하며, 오염원을 감시하는 데는 한계가 있다.

레이저를 이용한 원격 측정법 중에서 DIAL 방법은 성층권의 오존을 측정하는 데 유용한 수단일 뿐만 아니라, 대류권의 대기 오염을 측정하는 데도 매우 유용하다. 일반적으로 DIAL 기술은 그 감도(sensitivity)가 매우 높아 대부분의 기체의 경우 그 측정 한계값이 1ppb 정도에 달한다.

또한 파장 가변 레이저를 사용할 경우 자외선에서 적외선에 이르는 다양한 파장을 선택할 수 있으므로, 많은 기체에 대해 선택성이 뛰어나다.

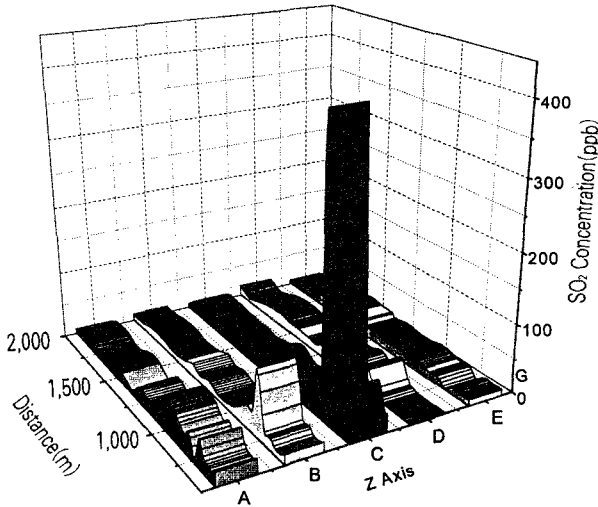
최근 대류권에 존재하는 여러 가지 오염 기체 중에서 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, 분진 등의 대기 오염 물질을 원격으로 측정할 수 있는 이동형 LIDAR 시스템이 개발되었다.

이 장치의 측정 거리는 약 3~5km로서, 측정 시간은 10분 이내이며, 검지 범위는 ppb(part per billion)에서 수 %에 달한다.

대기 오염 분석용 이동형 LIDAR 시스템은 트레일러 방식으로 실외용 발전기를 항상 탑재하도록 되어 있다.

사용된 레이저는 Q-스위칭 Nd : YAG 레이저로서 0.5~1.0J 정도의 펄스 에너지에 반복률은 30Hz이다.

색소 레이저는 이중 파장 공진기와 두 개의 증폭기로 구성되어 있고, 펄프 레이저의 반복률에 맞춰서 chopper는 두 개의 다른 파장의 레이



〈그림 5〉 대전 공단 굴뚝 주변의 이황산가스 밀도 분포

저를 발진시킨다.

빔 분리기에 의해 갈라진 레이저 빔은 거울에 의해 grating에 입사되는데, 이때 입사되는 각도를 조절함으로써 두 레이저 빔간의 파장 간격을 조절한다. 일반적으로 레이저를 대기 중으로 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 발생되는 배경광을 제거하기 위해 좁은 선폭(3nm 이하)의 간섭 필터를 사용한다.

〈그림 5〉는 대전 공단의 대형 굴뚝 주변(LIDAR 시스템에서 약 700m 거리에 위치하고 있음)의 SO<sub>2</sub> 농도

를 측정된 것이다. 레이저 빔이 굴뚝에 가까워질수록 SO<sub>2</sub> 농도가 현격하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

이 농도는 주변에 비해 약 20배 이상 높으며, 바람이 부는 방향으로 SO<sub>2</sub>가 확산되어 가고 있는 것을 알 수 있다. 그림에서 C 측정값은 굴뚝 위로 바로 레이저 빔이 지나가도록 한 경우이며, 측정 당시 바람이 C지점에서 B지점으로 불고 있었기 때문에 B지점의 농도가 D지점의 농도보다 다소 높게 측정되었다.

**활용 전망**

레이저를 이용한 원격 측정 기술이 급속히 발전해 오면서 원격 환경 감시에서의 LIDAR 기술의 활용 가능성이 증대되고 있을 뿐만 아니라, 이

미 미약하나마 부분적인 실용화를 이루고 있는 상황에 있다. 레이저의 활용은 대기에 영향을 주는 제반 현실적인 기상 변화 요인을 분석할 수 있을 뿐만 아니라, 지구나 인류의 생성 기원을 밝히는 연구에도 활용하고 있는 것으로 알려지고 있다.

LIDAR 기술은 대기 오염 측정뿐만 아니라, 대기의 기상 관측에도 탁월한 성능을 제공한다.

풍속으로 움직이는 분진(에어로졸)들에 레이저 광이 조사될 경우, 도플러 효과에 의해 되반사되는 빛은 미세한 주파수 이동값을 가지며, 이러한 원리에 의해 개발된 레이저 도플러 속도계는 대류권의 풍속에 대한 원격 정밀 측정이 가능하게 한다.

대기 중에 다량으로 존재하지만 대기압에 의해 그 밀도가 변하는 산소 분자의 차분 흡수 현상을 이용하여 대기압의 분포를 측정할 수 있으며, 또한 이와 유사한 방법을 이용하여 대기 온도 분포도 측정 가능하다.

이 밖에도 레이저 원격 형광 장치를 비행기에 탑재하여 해양에 오염된 기름의 유출을 검지할 수 있으며, 우라늄을 비롯한 광맥 탐사나 해양의 어군 탐사 등 광범위한 영역에 걸친 자원 탐사에도 활용된다.

최근에는 우주선에 탑재하여 태풍의 경로 추적 등 지구 전체를 대상으로 기상 관측에 활용하고 있는 등 그 활용 범위가 증대되고 있다. ☼