

KAERI/AR - 357/92

技術現況分析報告書

레이저를 이용한 대기 환경관리 기술

Laser Applications for Atmospheric Remote Sensing

KAERI

韓國原子力研究所

提 出 文

韓國原子力研究所長 貴下

이 報告書를 1992 年度 技術現況分析報告書로 提出합니다.

題目 : 레이저를 利用한 大氣 環境管理 技術

1992 年 8 月 日

作成者 : 申 章 秀 (電子光學研究室)

李 詳 睦 (")

金 哲 中 (")

監修委員 : 趙 滿

要 約 文

그동안의 레이저 산업 발전과 이의 활용 영역이 급속히 증대되고 있는 상황에서 공해문제 해결에 레이저를 활용하는 연구는 매우 중요한 연구 분야로 대두되고 있다. 특히 선진국에서도 10 여년 전부터 이 분야의 연구가 활발히 진행중에 있으며, 따라서 국제간의 정보 교류도 용이하리라고 판단된다. 당 연구실은 지난 1984 년부터 레이저의 활용 연구를 수행해온 바, 그동안의 기술력과 관련정보를 바탕으로 레이저 활용 분야중 최첨단 연구 분야중의 하나인 '레이저를 이용한 대기오염 측정기술' 즉, LIDAR ('Laser Identification, Detection and Ranging' or 'Light Detection and Ranging') 기술을 종합 정리하게 되었으며, 앞으로 이 분야 연구의 밑거름으로 사용하고자 한다.

현대사회에서 가장 시급하고 절실하게 해결하여야 할 문제는 역시 자연환경의 극심한 오염 문제일 것이다. 각종 오염원으로부터 다양한 형태로 배출되는 오염물질들 중에서 현재 주로 관심을 끌고 있는 환경문제는 불소화합물의 영향, 질소산화물 또는 황화물의 영향, 이산화탄소 및 화산재에 의한 기후의 변화, 광화학 스모그의 영향, 오일류에 의한 오염, 산성비등 매우 복잡하고 다양하다. 이와같은 환경문제를 해결하기 위한 선결 과제는 무엇보다도 먼저 오염정도의 정확하고 정밀한 측정기술의 확립이라 하겠다.

오염물질의 측정방법으로 여러가지 장비와 기술이 사용되고 있으나 대개의 경우 시료처리 과정이 복잡하거나 인력이 많이 필요하여 매우 큰 측정오차를 유발하게 마련이며, 또한 1 회 측정에 걸리는 시간이 길어서 오염 감시에 한계가 있게 마련이다. 이러한 근본적인 문제점을 해결할 수

있는 방법으로 레이저를 사용하는 측정법을 제시하고, 레이저의 응용 방법과 선진국에서의 환경 분야 활용 예를 종합 검토하였다.

이와같은 환경오염 물질측정에 레이저를 활용하면 다음과 같은 영역에서 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 즉,

1. 오염성분의 농도측정을 통한 오염감시
2. 대기환경의 열적, 구조적 및 동력학적 특성의 평가
3. 오염성분의 Threshold 농도 감시에 의한 Alarm 효과
4. 오염물질의 대기확산에 대한 시간적 · 공간적 Mapping

소련 Kurchatov 원자력 연구소에서 제공한 자료에 의하면 LIDAR 법으로 오존이나 다른 공해물질들의 측정 뿐만아니라 Doppler LIDAR 를 이용하여 바람의 방향과 속도도 측정할 수 있음을 역설하고 있다. 이와같이 LIDAR 기술은 공해물질의 확산특성을 알게함으로써 재해 예방에 큰 역할을 할 수 있을 뿐만아니라 있어서는 안될 일이지만 화학공장에서 사고나 Chernobyl 원전 사고와 같은 사고가 일어났을 경우 이 방법으로 풍향·풍속을 정확히 원격 측정한다면 오염 피해로부터 많은 인명과 재산을 보호할 수 있을 것이다.

ABSTRACT

The applications of lasers to environmental monitoring have been drawing much attention as a development of laser industry. For the last decade, the field of these researches has been studied in many industrialized countries, and many informations are now opening through research papers or periodical magazines. Therefore, the international cooperations are expected to be relatively easy to perform from now on. We have many research experiences on laser applications to academic studies or industries. And, on the bases of the experiences and the related informations, we tried to analyze a state of the art for LIDAR ('Laser Identification, Detection and Ranging' or 'Light Detection and Ranging') technology and to demonstrate a feasibility of the application of laser to environmental remote sensing.

One of the most serious problems faced by many modern industrialized countries must be an environmental pollution. Various pollution sources are generating various types and kinds of pollutions, of which the freon compounds, the nitric oxides, the sulfur compounds, the carbon dioxides, the photochemical smog, oily disposals, acid rain and the volcanic ashes are drawing much attentions. These are disclosed to be the main causes of weather fluctuation.

Primarily, the most important thing to solve the environmental pollution problems are to establish a measurement technique to detect

the kind and the type of pollution timely, quantitatively and qualitatively with accuracy and precision.

The conventional measurement techniques such as wet analysis methods and spectrophotometric methods are generally time-consuming and require many man-powers, so it is apt to induce relatively higher errors in analytical processes. Furthermore, so the methods take much times to do a single batch analytical process that it is limited to perform a real-time analysis. This is the fundamental restriction of the conventional methods.

The application of laser for environmental remote sensing is the most powerful candidate to overcome the above-mentioned drawbacks of the conventional methods.

In this report, we propose the possibility of laser application and analyse the usage of laser for environmental sensing. We expect that the application of laser in this field would bring about the following effects.

1. Concentration measurements including both major and minor constituents, and are therefore well suited to pollution surveillance and monitoring.
2. Evaluation of thermal, structural, and dynamic properties.
3. Threshold detection of specific constituents, and are therefore well suited for alarm purposes.
4. Mapping of effluent plume dispersal as a function of time.

According to a specialist for Kurchatov Institute in USSR, the LIDAR would be a powerful method not only for measurement of pollutants but also for that of weather factors such as temperature profile and wind velocity, etc. Such a function of LIDAR would make us avoidable from unexpected environmental disasters such as nuclear power accident or chemical factory accident by a prediction of damage diffusion.

목 차

제 1 장 서론	1
제 2 장 레이저에 의한 원격 대기 오염 측정의 원리 및 특징	6
1. 기본개념	6
2. 레이저 원격 환경 측정 장치의 구성 및 구성성분별 특징	6
가. 레이저 System	10
나. Output Optics	10
다. Receiver Optics	12
라. Spectrum Analyzer	12
마. 광검출기	13
3. 원격 환경 측정에서 응용되는 물리적 현상의 특성	15
가. 일반적 특성	15
나. 이론적 배경	17
1). 대기중에서의 레이저 투과	18
2). Rayleigh and Mie Scattering	22
3). Raman Scattering	25
4). LIDAR Equation for Scattering and DAS	29
5). Fluorescence 를 측정할 경우의 LIDAR 식	36

제 3 장	대기오염 및 환경인자 측정에서의 LIDAR 활용	38
1.	환경인자에 대한 활용 연구	38
가.	대기 주성분의 변화 측정	38
나.	대기중의 수증기 분포 측정.....	39
다.	기온 분포의 측정	41
라.	환경변화에 영향이 큰 미량 성분의 측정	44
마.	극미량 Sodium 분포의 측정	48
2.	환경감시에서의 활용	52
3.	오염원 감시에서의 활용	58
4.	기타 영역에서의 활용	64
제 4 장	결 론	68
참 고 문 헌	73

표 목 차

표 1. Characteristics of Atmospheric Trace Gases	4
표 2. Optical Interaction of Relevance to Laser Environmental Sensing.	8
표 3. Types of Lasers Relevant to Remote Sensing	11
표 4. Measured Absorption Cross Sections for Gaseous Species	21
표 5. Expected minor pollutants available for CO2 LIDAR.	53
표 6. Absorption parameters for laser remote sensing of several hydrazine rocket fuels.	57
표 7. 단계별 연구·기술 개발 목표	71

그림 목 차

그림 1. Optical interactions of laser environmental sensing.	7
그림 2. Essential elements of laser environmental sensor.	9
그림 3. Telescope configuration : (a) Newtonian; (b) Gregorian; ... (c) Cassegrainian.	13
그림 4. Transmittance through the earth's atmosphere.	19
그림 5. Angular distribution of laser-scattered radiation.	24
그림 6. Schematic representation of Raman vibrational Stokes and .. anti-Stokes scattering.	26
그림 7. Theoretical distribution of vibrational-rotational Raman .. spectrum ($\Delta v=0 \rightarrow 1$ vibrational transition) at 300 K, showing the O-, Q-, and S-branch structures.	27
그림 8. Experimentally measured pure rotational Raman spectrum of Nitrogen. Laser excitation wavelength 488.0 nm.	28
그림 9. Geometric arrangement of basic remote laser sensor.	31
그림 10. Spatial resolution for scattering phenomena as seen from space-time diagram of propagating rectangular-shaped laser pulse.	33

그림 11. LIDAR backscatter signal for R(12), R(18), and R(20) lines	.42
on the 10 μm band of a CO ₂ laser. The R(20) is more strongly absorbed by ambient H ₂ O vapor than is R(12) or R(18).	
그림 12. Vertical distribution of water vapor determined by a DIAL	.42
system.	
그림 13. Upper atmospheric temperature profile deduced from lidar	.44
elastic backscattering measurement	
그림 14. Ozone LIDAR based on 100 W XeCl laser	47
그림 15. The layout of the balloon-borne lidar system.	48
그림 16. The NASA DIAL system.	50
그림 17. Comparison of DIAL and ozonesonde measurements of ozone	.. 51
layers in the vicinity of the tropopause.	
그림 18. Nitric oxide monitoring by resonance absorption.	54
그림 19. LIDAR measured ethylene concentrations corrected for 55
water vapor interference and compared with a point monitor.	
그림 20. Theoretical distribution of Raman volume backscattering	.. 60
coefficient due to a molecular mixture contained in a typical oil smoke as a function of Raman-shifted frequency.	
그림 21. NO ₂ distribution over a chemical factory as derived from	.. 61
DAS measurements performed in the indicated directions at an altitude of about 45 m. The concentrations are given in ppm.	

그림 22. SRI International mobile lidar (a) shows the van with ...	63
receiver telescope, (b) reveals dual laser system and receiver electronics.	
그림 23. Optical and electronic arrangement of a LIDAR system	64
operated by National Swedish Environmental Protection Board.	
그림 24. Principle of operation of the laser fluorosensor.	65
그림 25. Wind measurements by Doppler LIDAR	67

제 1 장 서 론

현대사회의 산업화 과정에서 발생된 여러 문제중에서도 '가장 시급하고 절실하게 해결하여야 할 문제는 역시 자연환경의 극심한 오염 문제일 것이다. 각종 오염원으로부터 다양한 형태로 배출되는 오염물질들은 미묘한 균형에 의해 유지되는 자연 생태계에 영향을 줌으로써 예측하기 어려운 부작용들을 야기하고 있다. 현재 주로 관심을 끌고 있는 환경문제는 불소화합물의 영향, 질소산화물 또는 황화물의 영향, 이산화탄소 및 화산재에 의한 기후의 변화, 광화학 스모그의 영향, 오일류에 의한 오염, 산성비등 매우 복잡하고 다양하다. 이와같은 환경문제를 해결하기 위한 선결 과제는 무엇보다도 먼저 오염정도의 정확하고 정밀한 측정기술의 확립이라 하겠다.

오염물질의 측정방법으로 여러가지 장비와 기술이 사용되고 있으나 대개의 경우 시료처리 과정이 복잡하거나 인력이 많이 필요하여 매우 큰 측정오차를 유발하게 마련이며, 또한 1 회 측정에 걸리는 시간이 길어서 오염 감시에 한계가 있게 마련이다. 이러한 근본적인 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 레이저를 사용하는 측정법이 각광을 받고 있다.

대기환경의 열적 구조는 태양으로부터 들어오는 광에너지와 지구로부터의 방출에너지 사이에 형성되는 열적 평형에 의해 유지되고 있다. 가장 지표에 가까운 대기부분을 대류권(troposphere) 이라하며, 극지방에서는 지상 약 10 km 까지를 적도지방에서는 약 15 km 까지를 의미하고, 이 권역의 끝 경계에서 기온이 가장 낮다. 그다음 권역이 성층권(stratosphere)인데 이권역에 오존층이 형성되어 있으며, 태양으로부터의 자외선 차단 역할을

하고 있다. 대류권과 성층권은 대기오염의 영향권으로서 이곳의 환경 변화는 지구 생태계에 지대한 영향을 미친다.

미국 행정부에서 1962 년에 발행한 '미국의 표준 대기' 라는 보고서에는 고도에 따른 대기중의 구성 성분별 밀도분포를 수록하고 있는데, 여기에는 미량(trace)으로서 인간에게 해를 줄 수 있다고 판단되는 성분을 공해물질(pollutants)로 규정하고 있다. 이 공해물질들 중에는 일산화탄소 처럼 직접 인간에게 영향을 주는 물질도 있지만 chlorofluorocarbon (CFC or freon) 과 같이 직접 피해는 없더라도 화학적 안정성으로 인해 화학적 변화없이 오존층까지 올라가게 되므로써 자외선에 의한 광분해에 의해 2 차적인 영향을 미치는 물질도 있다. 이렇게 생성된 Cl 원자는 오존을 파괴함으로써 지구환경 보존에 지대한 위협이 되고 있는 실정이다.

소위 '온실효과(greenhouse effects)' 라고 하는 기온 상승 효과는 주로 화석연료의 연소에 의해 발생하는 이산화탄소에 기인하는 것으로 알려져 있으나, 최근에는 freon-11 이나 freon-12 등도 온실효과에 기여하는 것으로 알려지고 있으며, Varanasi 와 Ko [1] 의 연구에 의하면 ppb 농도 수준에서 0.9 K 정도의 온도 상승효과를 일으키는 것으로 보고하고 있다. 이는 Freon 화합물이 8-10 μm 파장영역에서 강한 광흡수띠를 형성하고 있기 때문으로 판단된다.

NO 와 SO₂ 는 대기중에서 HNO₃ 와 H₂SO₄ 를 생성함으로써 산성비의 주요인이다. SO₂ 는 이미 산업혁명 때부터 주요 오염원으로 주목되었으며, 대부분의 유럽 국가들에서 연간 평균 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (35 ppb) 로 오염수준을 규제하고 있다. 또한 40 년대 말부터 대도시 부근에서 눈을 자극하고, 식물에 악영향을 주며, 맑은 데에서도 시야를 방해하는 새로운 형태의

대기오염 효과가 나타났는데, 이는 탄화수소(HC) 와 질소산화물(NO_x) 의 UV 에 의한 화학작용에 기인하는 것으로 발표되었다[2].

대류권에 존재하고 있는 주된 구성성분과 그의 대류권에서의 환경적 특성을 표 1 에 나타내었다[3](N₂, O₂, H₂O 및 불활성 기체는 제외). 여기에 나타내지 않은 미량 성분들도 많이 있으며, 이중에서도 OH 자유라디칼은 CO 를 CO₂ 로 변화시키는 데에 관여할 뿐만아니라 광화학 스모그의 형성에도 관여하므로 환경관리에서 아주 중요한 관심 물질이다. 현재 ppt 농도수준까지 측정된 보고가 있다[4].

이와같은 환경오염 물질 측정에 레이저를 활용할 수 있는 영역은 다음과 같다. 즉,

1. 오염성분의 농도측정을 통한 오염감시
2. 대기환경의 열적, 구조적 및 동력학적 특성의 평가
3. 오염성분의 Threshold 농도 감시에 의한 Alarm 효과
4. 오염물질의 대기확산에 대한 시간적 · 공간적 Mapping

레이저를 사용하면 원격측정이 가능하며 이러한 농도 측정 행위는 지상에서 뿐만아니라 선박, 헬리콥터, 비행기 또는 인공위성등에서 광범위하게 수행될 수 있다. 특히 자동차에 탑재한 측정장비는 감시대상 지역을 순회하면서 의심이 가는 곳을 집중적으로 관측할 수 있기 때문에 오염감시에 매우 효율적이어서 많은 나라에서 연구 개발하고 있다.

Table 1. Characteristics of Atmospheric Trace Gases

Pollutant	Major Sources				Estimated Emission Rates				Atmospheric Background Concentrations	Calculated Atmospheric Residence Time
	Anthropogenic	Natural	Anthropogenic (10^9 kg yr^{-1})	Natural (10^9 kg yr^{-1})	Polluted-Atmosphere Concentrations	Anthropogenic (10^9 kg yr^{-1})	Natural (10^9 kg yr^{-1})	Atmospheric Background Concentrations		
CO ₂	Combustion	Biological decay; release from oceans	13,000	10 ⁶	350 ppm	320 ppm	2-4 yr			
CO	Auto exhaust; combustion	CH ₄ oxidation	250	3000	5 ppm	0.1 ppm	0.1 yr			
SO ₂	Combustion of coal and oil	Volcanoes	133	Small	1 ppm	0.2-2 ppb	4 days			
H ₂ S	Chemical processes; sewage treatment	Volcanoes, biological action in swamps	2.7	90	4 ppb	0.2 ppb	2 days			
O ₃	Photochemical smog	Photolysis of O ₂ (25-50 km)	Uncertain	Uncertain	0.3 ppm	0.01 ppm	1 day			
NO	Combustion	Bacterial action in soil	48	460	0.2 ppm	0.2-2 ppb	1 day			
NO ₂	None	Conversion of NO	Negligible	Negligible	0.1 ppm	0.5-4 ppb	5 days			
N ₂ O	None	Biological action in soil	Small	540	0.25 ppm	0.25 ppm	4 yr			
NH ₃	Waste treatment	Biological decay	3.6	1000	0.01 ppm	6-20 ppb	7 days			
Hydrocarbons	Combustion exhaust; chemical processes	Biological processes	CH ₄ : 80 Others: uncertain	CH ₄ : 2000 Others: uncertain	CH ₄ : 3 ppm Others: 2 ppm	CH ₄ : 1.5 ppm Others: < 1 ppb	CH ₄ : 1 yr Others: unknown			
HCHO	Combustion exhaust; atmospheric reactions	Biological processes	100	1000	0.05 ppm	1 ppb	1-5 days			
HCl	Chemical processes, rocket engine exhaust	Unknown	Uncertain	Unknown	1-5 ppm	Unknown	Unknown			

본 보고서에서는 최근 선진국에서 대기오염의 측정 및 관리를 위해 연구 개발하고 있는 '레이저를 이용한 대기오염 측정기술'인 LIDAR ('Laser Identification, Detection and Ranging' or 'Light Detection and Ranging') 기술의 기본 원리를 소개하고, 이의 활용 현황을 종합 검토하고자 한다. 레이저를 사용한 대기 성분의 원격 측정법에는 여러가지 방법이 있으므로, 제 2 장에서는 레이저를 사용한 원격 측정방법의 일반적 개념과 특징을 소개하고, 제 3 장에서는 각 방법의 활용 예를 소개하며, 끝으로 제 4 장에서 결론을 도출하고자 한다.

제 2 장 레이저에 의한 원격 대기 오염 측정의 원리 및 특징

1. 기본개념

대기 환경의 레이저 원격 측정에서는 Rayleigh scattering, Mie scattering, Raman scattering, resonance scattering, fluorescence, absorption, differential absorption and scattering(DAS) 등의 물리현상을 이용한다. 각 현상을 일으키는 과정을 표 2 에 나타내었고, 각 과정별 단면적을 그림 1 에 나타내었다.

이러한 물리 현상들중에서 측정하고자 하는 목적과 특성에 따라 적절히 선택하여 사용한다. 측정장치의 전체적인 구성은 그림 2 와 같다. 즉, 전체적인 구성은 광원인 레이저와 레이저빔의 제어에 사용되는 output optics, 그리고 광신호를 수집하는 receiver optics 와 분광용 spectrum analyzer, 광검출기 및 신호처리 system 으로 구성되어 있다. 본 장에서는 레이저 원격 환경 측정에 사용되고 있는 장치 구성상의 구성 부분별 특징을 설명하고, 아울러 각 물리 현상별 특성을 설명하고자 한다.

2. 레이저 원격 환경 측정 장치의 구성 및 구성성분별 특징

가. 레이저 System

원격 환경 감시 체계의 일반적인 구성요소들은 위의 그림 2 와 같다. 레이저는 광원으로서 자외선 영역의 excimer laser 또는 N₂ laser 를

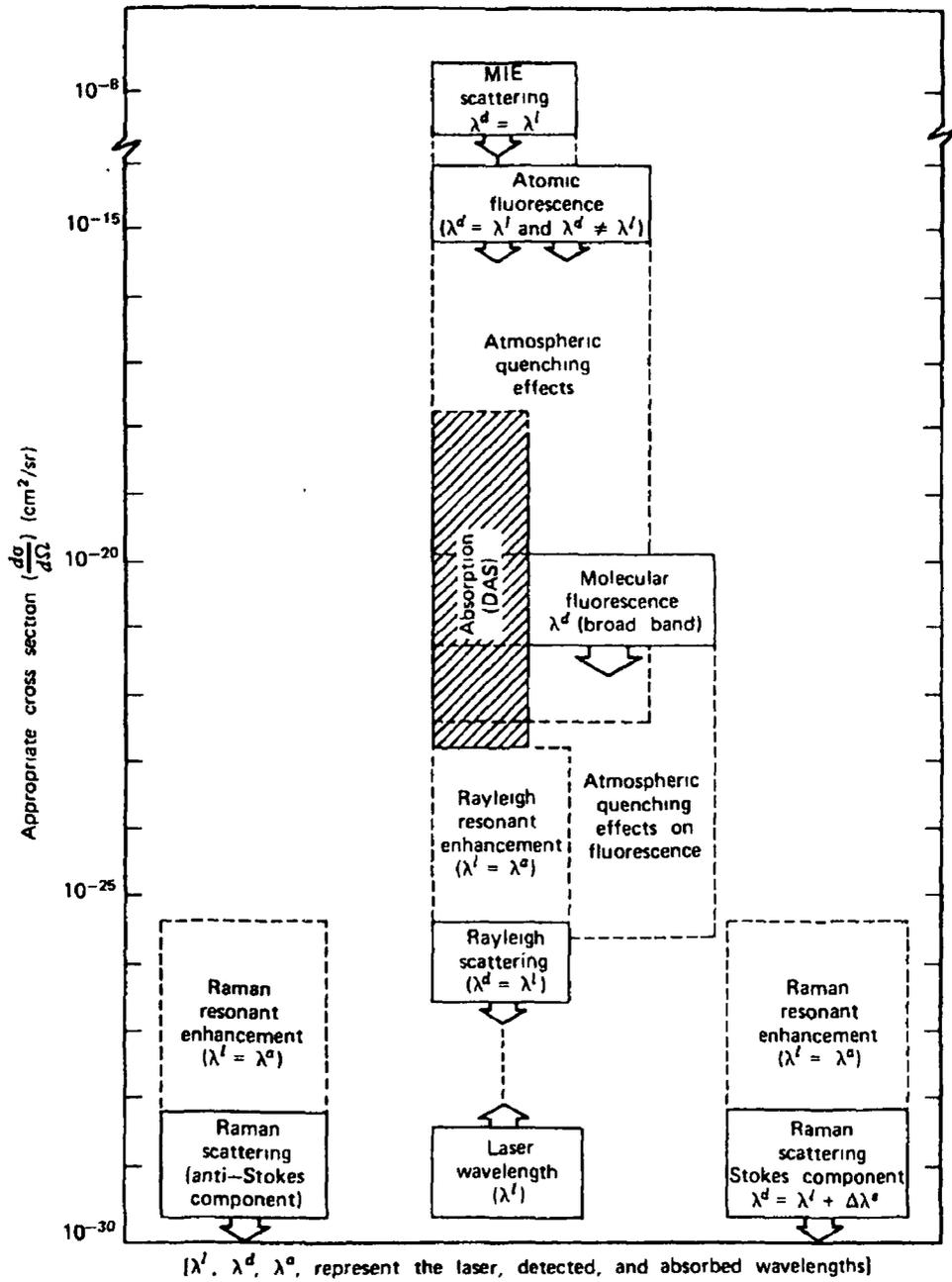
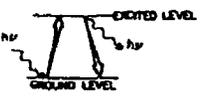
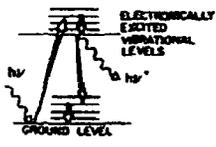
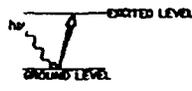
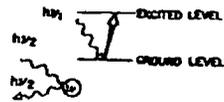


그림 1. Optical interactions of laser environmental sensing.

2. Optical Interaction of Relevance to Laser Environmental Sensing.

Technique	Physical description
Rayleigh scattering	laser radiation elastically scattered from atoms or molecules is observed with no change of frequency 
Mie scattering	laser radiation elastically scattered from small particulates or aerosols (of size comparable to wavelength of radiation) is observed with no change in frequency 
Raman scattering	laser radiation inelastically scattered from molecules is observed with a frequency shift characteristic of the molecule ($h\nu - h\nu' = E$) 
Resonance scattering	laser radiation matched in frequency to that of a specific atomic transition is scattered by a large cross section and observed with no change in frequency 
Fluorescence	laser radiation matched to a specific electronic transition of atom or molecule suffers absorption and subsequent emission at lower frequency; collision quenching can reduce effective cross section of this process: broadband emission is observed with molecules 
Absorption	observe attenuation of laser beam when frequency matched to the absorption band of given molecule 
Differential absorption and scattering (DAS)	the differential attenuation of two laser beams is evaluated from their backscattered signals when the frequency of one beam is closely matched to a given molecular transition while the other's frequency is somewhat detuned from the transition 

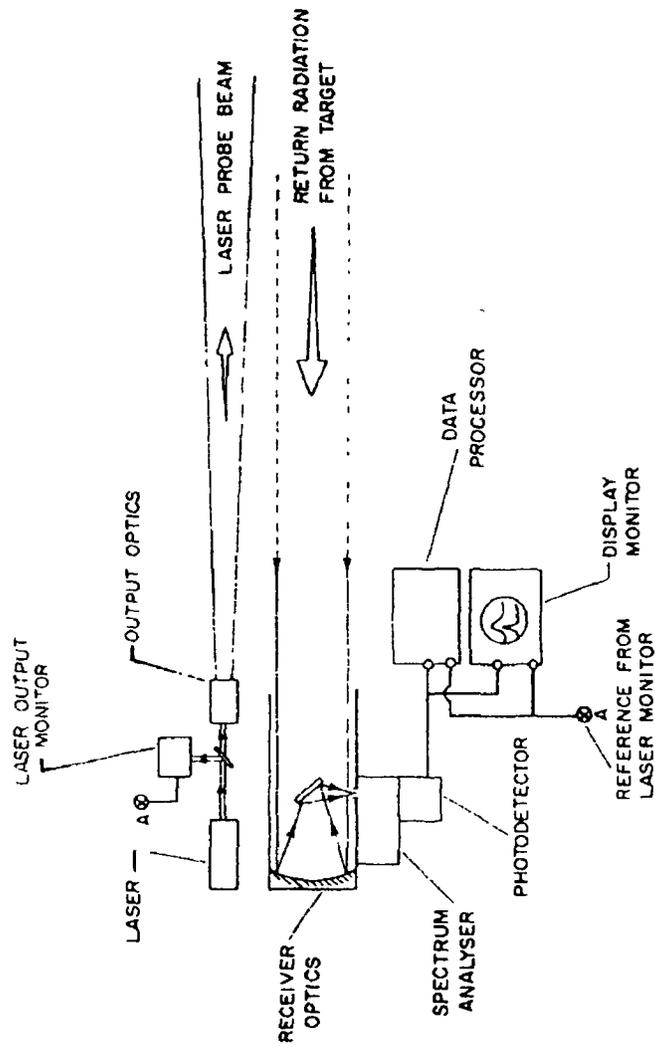


그림 2. Essential elements of laser environmental sensor.

비롯하여 적외선 영역의 CO₂ laser 에 이르기까지 다양한 종류가 사용되고 있다. 레이저는 측정하고자 하는 대상 물질의 특성 및 측정 방법에 따라 다음과 같은 요소를 감안하여 선정한다. 즉, 침투출력, 파장선폭, 출력시간, beam divergence 등이다. 펄스 반복율이 크면 신호가 작은 경우 여러번의 신호를 누적시켜 평균치를 사용할 수 있으므로 신호처리에 효과적이다. 흔히 사용하는 레이저의 종류와 특성을 표 3 에 나타내었다. 가장 널리 사용되는 레이저는 Nd:YAG 레이저인데, 이 레이저는 위에 열거한 조건들을 만족할 뿐만아니라, 2 차 또는 3 차 고조파에 의한 dye laser pumping 이 가능하기 때문에 사용 가능한 파장 영역을 크게 넓힐 수 있는 잇점이 있다^[5].

나. Output Optics

레이저 빔은 적절히 고안된 output optics 를 통하여 목표물 방향으로 보내지는데, 이때 output optics 는 레이저 빔의 collimator 역할과 공간적 filter 역할, 그리고 레이저에서 방출되는 원하지 않는 파장(방전에 의한 자외선등)의 차단 역할을 하게 된다. 레이저 출력의 일부를 beam splitter 를 사용하여 분리한 후 zero-time marker 나 레이저 파장의 reference 로 사용할 수 있으며, 특히 레이저의 출력이 안정하지 못한 경우는 검출 신호의 강도에 대한 normalization reference 로 사용한다.

3. Types of Lasers Relevant to Remote Sensing

	Solid State	Gas	Liquid	Semiconductor
Representative examples	Ruby Neodymium (YAG) Alexandrite	XeCl (rare-gas halide) N ₂ (transient) HgBr ₂ /HgBr (dissociation) CO ₂ (molecular) Intense electrical discharge in gas	Organic dyes such as Rhodamine 6G Coumarin Cresyl violet Flashlamp or laser	GaAs GaAsP InAs Pb _{1-x} Sn _x Sc High current injection leading to <i>n, p</i> radiative annihilation at an <i>np</i> junction GaAsP-Pb _{1-x} Sn _x Sc (550 nm to 32 μm) Tuning possible by changing current, applying pressure or magnetic field
Primary pumping technique	Flashlamp			
Range of wavelengths and tuning	Ruby (694.3 nm)—thermal tuning ±0.4 nm Nd YAG (1.06 μm) Alexandrite—tunable (701–818 nm) Second or third harmonic generation possible with all three kinds	H ₂ (116, 160 nm) Xe ₂ (170 nm) KrF (249 nm) XeCl (308 nm) N ₂ (337 nm) HgBr ₂ /HgBr (502–504 nm) DF or HF (2.7–4.0 μm) CO (5.0–5.7 μm) CO ₂ (9.0–11 μm) HCN (337 μm) Fast discharges lead to pulses that typically range from 1 ns to 1 μs Q-switching possible with certain molecular gas lasers, cavity dumping with others	Large range of dyes provide wavelengths from 340 nm to 1 μm Typical tuning range per dye ≈ 40 nm with widths of 0.1–0.01 nm possible with grating or prism (+ etalon) arrangement When N ₂ laser-pumped pulses are ~ 5–10 ns When flashlamp pumped 0.3–1 μs pulses Cavity dumping of latter can yield 30-ns pulses 10 ⁴ –10 ⁶ W in narrow, tunable bandwidth; 0.1–3 J	
Modes of operation and pulse duration	Q-switching leads to 10–100-ns pulses Mode locking can yield 10-ps pulses			Current pulsed but requires cooling and efficient heat sink 10 ns to 1 μs possible
Peak power and energy/pulse attainable	For ruby and Nd: YAG 10 ⁶ –10 ⁸ W and 1–10 J when Q switched, for Alexandrite lasers 10 ⁷ W and 500 mJ	10 ⁴ –10 ⁷ W and 1 mJ to 1 J		100 W possible from laser diode arrays

다. Receiver Optics

Receiver optics 로는 telescope 가 사용되고 있다. 그림 3 에서 보는 바와같이 Newtonian, Gregorian 또는 Cassegrainian 형태가 있으며, 이중에서 비교적 구조가 간단한 Newtonian 또는 Cassegrainian 형태가 많이 사용되고 있다. 특히 Cassegrainian 형태는 구조도 간단할 뿐만아니라 초점거리도 매우 길어서 인기가 크다. Telescope 의 직경은 사용할 optics 의 제작 기술과 광신호의 강도등에 따라 결정한다. Raman scattering 을 측정할 경우는 대개 직경이 30-40 inch 정도인 telescope 를 사용하고 있다.

라. Spectrum Analyzer

Telescope 에 수광된 빛은 spectrum analyzer 를 거쳐 광검출계로 들어간다. Spectrum analyzer 는 관측 파장대역을 선택하고 불필요한 파장 - 예를들면 레이저 산란광이나 background 태양광등 - 을 제거하는데 사용된다. 흔히 interference filter 가 이용되나 더 좋은 분해능을 얻기 위해서는 Fabry-Perot 간섭계나 grating monochromator 가 사용되며, polychromator 도 많이 사용되고 있다.

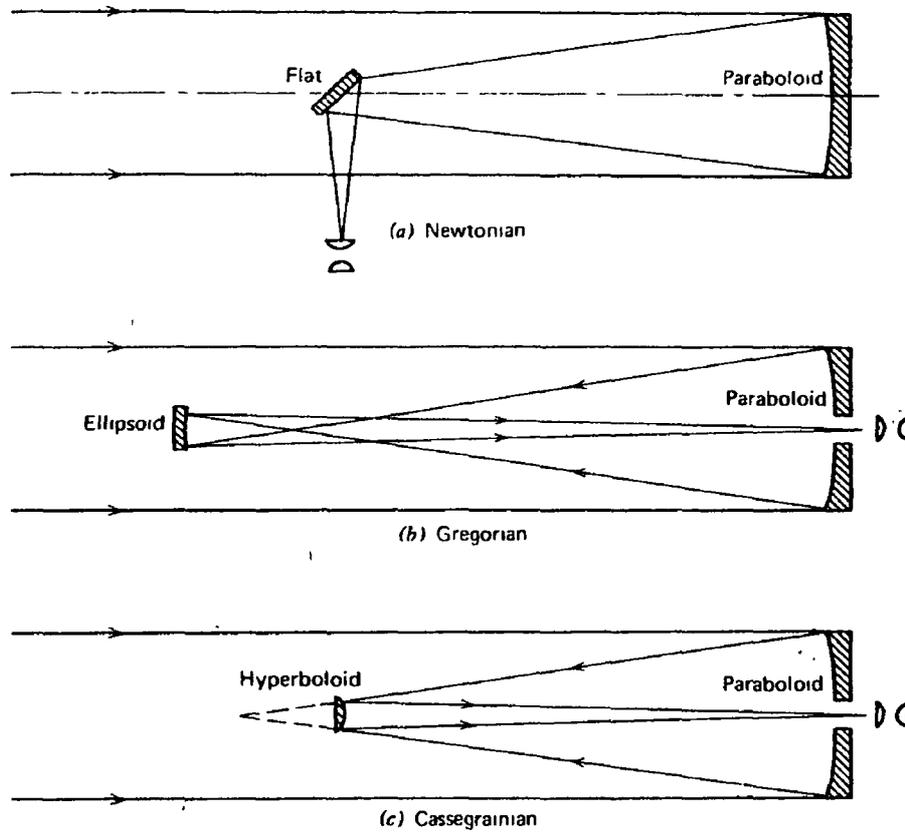


그림 3. Telescope configuration : (a) Newtonian; (b) Gregorian; (c) Cassegrainian.

마. 광검출기

광검출기는 사용할 파장의 영역에 따라 적절한 것을 선택하여야 하는데, spectral response, quantum efficiency, frequency response, current gain, dark current 등을 고려하여 선택한다. 이외에도 크기, 견고성,

가령등도 선택의 주요 요인이다. 이들중에서도 역시 가장 기본이 되는 것은 파장에 맞는 검출기의 선택이라 할 수 있다. 광검출기로부터의 신호는 analog 나 digital 방법에 의해 처리되는데, 최근에는 매우 빠른 waveform digitizer 가 개발되었으므로 실시간 신호처리가 가능하다.

일반적으로 200 nm 에서 1 μm 영역에서는 photomultiplier tube (PM tube) 가 적절하며, PM tube 를 결정하는 요인으로서는 (1) photocathode 의 spectral response, (2) photocathode 의 dark current 특성, (3) dynode chain 에서의 gain, (4) 전자가 dynode 를 거칠 때의 시간 특성, (5) 마지막 dynode 와 anode 사이에서의 시간 경과 특성등이다. 최근에는 gain 이 크고 넓은 spectral 영역에서 감도가 좋은 photocathode 재료가 개발되어 PM tube 의 유용성이 크게 증대되고 있다.

적외선 검출기는 크게 2 가지 형태로 구분할 수 있는데 하나는 photodetector type 이고, 다른 하나는 thermal detector type 이다. 감도가 가장 좋은 적외선 검출기는 반도체로서 빛이 입사하면 quantum interaction 에 의한 charge carrier 가 생성된다. 이러한 photodetector 들은 다시 photovoltaic device 와 photoconductive device 로 나눌 수 있는데, 이중에서 photodiode 와 같은 photovoltaic device 가 더 많이 사용되는 광검출 소자이다. 그러나 출력이 약하기 때문에 증폭과정을 거쳐야하는 단점이 있으며, thermal noise 에 의해 많은 제약을 받는다. 가장 널리 쓰이고 감도가 좋은 적외선 검출기 중의 하나인 liquid-N₂ cooled InSb 검출기는 1-5.5 μm 파장영역에서 매우 유용하다[6.7].

3. 원격 환경 측정에서 응용되는 물리적 현상의 특성

가. 일반적 특성

레이저 원격 환경 측정에서는 앞서 언급한 바와같이 Rayleigh scattering, Mie scattering, Raman scattering, resonance scattering, fluorescence, absorption, differential absorption and scattering(DAS) 등의 물리현상을 이용한다.

Mie scattering 의 단면적은 매우 커서 다른 과정에 의해 생성되는 신호들을 완전히 덮어 버릴 수 있을 정도이며, 따라서 적당한 크기의 dust 나 aerosol 의 극미량 분석에 활용할 수 있다.

Resonance scattering (일명 atomic or resonance fluorescence) 도 비교적 큰 단면적을 가지고 있으나 대기중의 다른 분자들과의 충돌에 의한 quenching 이 크기 때문에 이 경우는 공기가 희박한 더 높은 대기 권역에서의 미량 성분 연구에 활용되고 있다.

Laser-induced fluorescence 는 대개 400 nm 이하의 여기파장에 의해 유도되는 천연 유기물들의 검출에 사용되고 있다. 이러한 원격 측정 형태를 laser fluorosensor 라 칭하는데, 실제로 공중에 인위적으로 설치한 검출기로 바다에 유출된 원유 또는 석유산물들의 검출에 사용한 바 있으며[8], 유출된 유층의 두께를 측정하는데도 사용하고 있다[9].

Raman scattering 은 분자가 빛에 의해 가상적인 여기 상태로 여기되었다가 약 10^{-14} 초 이내에 빠르게 감쇄하면서 여기파장과는 다른 파장의 빛을 방출하는 비탄성 scattering 과정으로 이해되고 있다. 언급한

바와같이 방출파장이 여기파장과 다른 것이 특징이며, 이러한 파장 차이는 분자의 진동양자와 대응되므로 특정분자의 분석에 활용된다. 많은 분자들의 진동-회전 Raman spectra 가 Inaba 와 Kobayasi 에 의해 종합 정리되어 발표되었다[10].

일반적으로 '광흡수' 단면적은 fluorescence 나 Raman scattering 단면적에 비하여 매우 크다. 따라서, 특정 분자의 흡수 파장에 정확히 tuning 된 레이저 빔의 강도 감쇄를 측정함으로써 분자의 평균 농도를 알 수 있다. 특정 분자의 광흡수에 의한 레이저빔 감쇄를 다른 원인에 의한 감쇄와 구분해 내기 위해서는 두개의 레이저 파장을 사용하는 differential 방법을 사용한다. 즉, 하나의 파장은 분자의 흡수띠 대역의 중앙에 일치시키고, 다른 파장은 흡수띠의 가장자리에 놓이게 선택하면 두 파장의 감쇄되는 정도에 따라 특정 분자의 농도를 분석할 수 있다. 몇몇의 예외를 제외하고 대부분 분자의 진동-회전 전이에 기인한 분자 흡수 파장은 적외선 영역에 놓여 있다[11-17].

공간 분해능도 좋으면서 비교적 높은 감도를 얻을 수 있는 방법이 Schotland[18] 에 의하여 제안되었는데, 이 방법은 differential absorption 과 scattering 을 함께 사용하는 방법(DAS)이다. 이 방법에서는 특정 분자의 흡수파장에 tuning 된 레이저 파장과 detuning 된 레이저 파장을 사용하며, Mie scattering 에 의해 되돌아 오는 빛의 강도를 측정하여 differential absorption 을 알아내는 방법이다. 따라서 differential absorption 에 의해 측정대상 분자의 농도를 알 수 있고, Mie scattering 에 의해 공간적 분포를 알 수가 있다. 이 방법은 여러 분자종에 대하여 공간적으로 넓은 영역에 걸쳐 좋은 감도로 측정이

가능하기 때문에 매우 유용하게 사용되고 있다[18-27].

검출기의 감도 문제로 인하여 visible 이나 근자외선 영역에서의 DAS 가 주 관심 분야로 연구되어 왔으나, 적외선 영역의 검출기가 비약적으로 발전해 오고 있기 때문에 적외선 영역에서의 DAS 도 점점 각광을 받고 있다[28, 29].

최근에는 differential absorption 에 기초한 DIAL(differential absorption lidar) 방법이 행해지고 있는데, 여기서는 DAS 에서와 같이 scattering 된 빛을 이용하기도 하고, 설치된 target 에서 반사되어 오는 빛의 감쇄를 이용하기도 한다.

나. 이론적 배경

LIDAR 에 적용되는 수식은 측정방법에 따라 다르다. 레이저 빔의 backscattering 을 이용할 경우 이것이 탄성이건 비탄성이건 간에 비교적 간단히 표현할 수 있다. 그러나 laser-induced fluorescence 를 이용하는 경우는 식이 복잡해 지는데, 이때는 target media 의 optical depth 나 detector 의 integration period 및 laser pulse duration 등을 고려하여야 한다[30]. 일반적으로 LIDAR 신호를 해석하는데는 레이저빔과 receiver optics 간의 기하학적인 배열이 문제가 되므로 이에 대한 고려도 중요하다. Measures[31] 는 LIDAR 식을 자세히 정리하여 발표하였으며, 여러가지 조건에서도 폭넓게 사용할 수 있도록 단순화 시켰다.

1). 대기중에서의 레이저 투과

레이저가 대기를 통과할 때에 탄성 또는 비탄성 산란이나 빛의 흡수등으로 인하여 레이저빔은 퍼져 진행하게 되고 또한 감쇄한다. z 방향으로 진행되는 레이저 빛에 대하여 빛의 강도 변화를 다음 식으로 나타낼 수 있다. 즉,

$$I(\lambda, z) = I(\lambda, 0) \exp \left\{ - \int_0^z \kappa(\lambda) dz \right\} \text{----- (1)}$$

여기서, $I(\lambda, 0)$ 는 입사된 파장 λ 의 빛의 초기강도이고, $I(\lambda, z)$ 는 volume attenuation coefficient 가 $\kappa(\lambda)$ 인 매질속을 통과한 빛이 거리 z 에서 나타내는 빛의 강도이다. 일반적으로 attenuation coefficient, $\kappa(\lambda)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\kappa(\lambda) = \sum \{ \kappa_i^E(\lambda) + \kappa_i^R(\lambda) + \kappa_i^A(\lambda) \} + \kappa^M(\lambda) \text{----- (2)}$$

여기서, i 는 경로에 존재하는 각가지 구성성분을 의미하며, $\kappa^E(\lambda)$, $\kappa^R(\lambda)$, $\kappa^A(\lambda)$ 및 $\kappa^M(\lambda)$ 는 각각 elastic scattering, Raman scattering, absorption 그리고 Mie scattering 계수를 나타낸다. 이중에서 Raman scattering 의 기여는 무시할 수 있을 정도로 작다. 매질의 구성 성분중에 레이저 파장에서 강한 흡수를 이루키는 성분이 소량이라도 존재할 때에 κ^A 의 기여에 의한 감쇄가 두드러지게 나타난다. 200 nm 이하의 파장에서 대기는 산소의 Schumann-Runge band 의 영향으로 완전히 불투명하다. 파장이 증가하여 250 nm 정도가 되면, 산소에 의한 흡수는 미약해지고

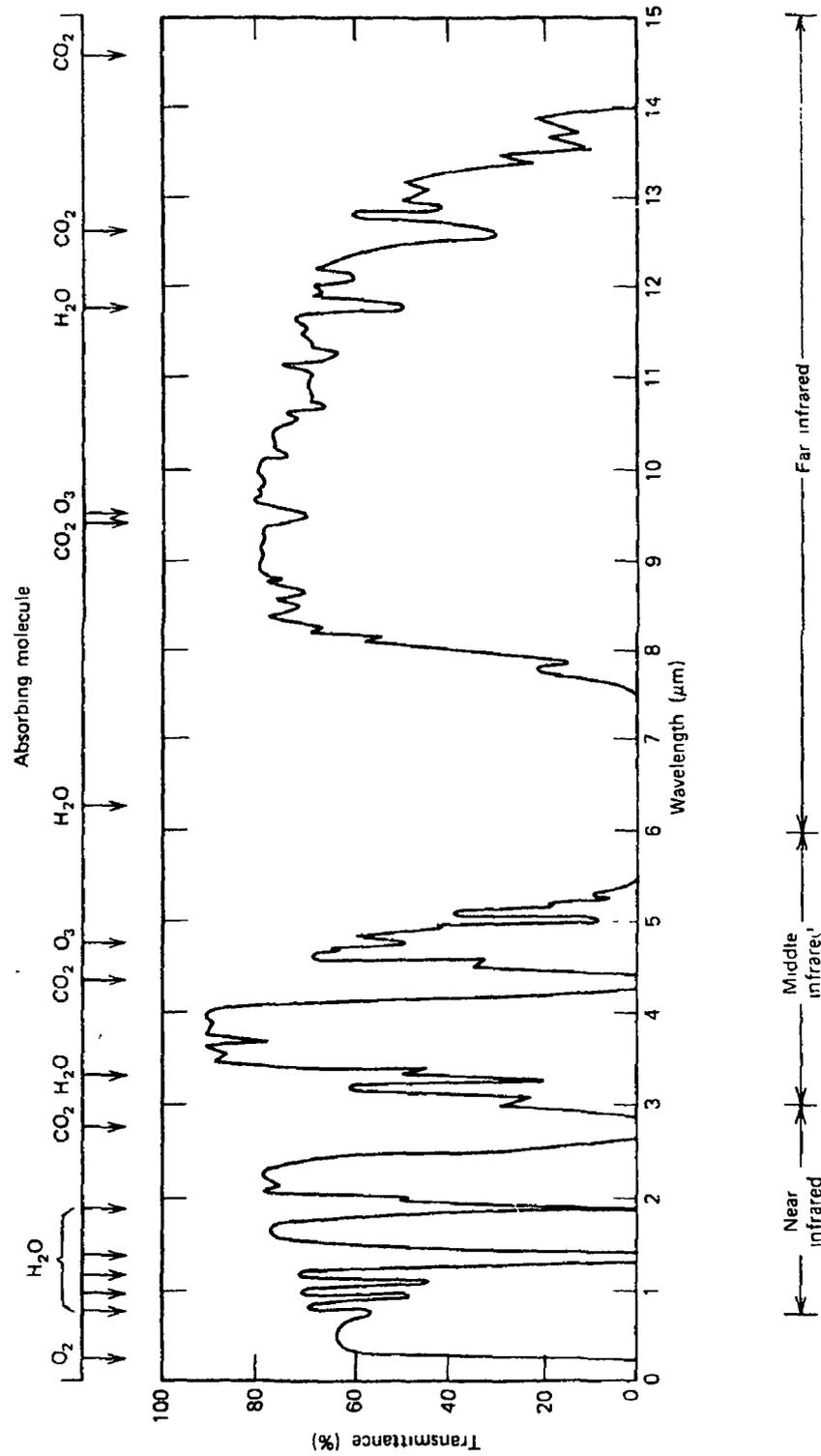


그림 4. Transmittance through the earth's atmosphere

대기중에 소량 존재하는 오존에 의한 흡수가 나타난다[32]. 적외선 영역에서는 빛의 흡수에 기여하는 대기중의 성분이 너무 많기 때문에 광학적으로 사용할 수 있는 window 가 상당히 제한되어 있다. 그림 4 에 대기중에서의 빛의 투과 스펙트럼과 광흡수에 기여하는 구성 성분을 나타내었다[33].

그림 4 에 의하면 오염되지 않은 대기중에서 주로 광흡수를 이루는 성분은 H_2O 와 CO_2 임을 알 수 있다. 300 nm 와 1 μm 사이의 영역에 수개의 흡수띠가 있는데, 이는 Rayleigh-Mie scattering 에 기인하는 것으로 알려져 있다.

O_3 , SO_2 , NO_2 등을 제외한 대부분의 분자들에서는 이들의 전자전이에 의한 광흡수가 185 nm 이하의 원자외선 영역에 존재하며, H_2O 의 진동-회전 전이에 의한 강한 흡수는 6.27 μm 근처에서 일어난다. 따라서 5.5 μm 에서 7.5 μm 영역에서는 모든 전자파가 차단되고 있음을 알 수 있다. 또 다른 H_2O 의 진동-회전 전이 흡수띠는 2.73, 2.66, 1.87, 1.38, 1.10, 0.94, 0.81, 0.71 μm 에서 일어난다. H_2O 는 쌍극자 모멘트가 매우 크기 때문에 강한 회전전이 흡수띠를 보이고 있으며, 이는 8 μm 에서부터 원적외선 영역까지 이르고 있다.

CO_2 분자는 4.3 μm 와 15 μm 에서 강한 적외선 흡수띠가 있는데, 이외에도 overtone 이나 combination 또는 hot band 에 의해 10.4, 9.4, 5.2, 4.3, 2.7, 2.0, 1.6, 1.4 μm 에서 흡수를 보이고 있으며, 14 μm 이상에서 나타나는 흡수도 주로 CO_2 의 광흡수에 기인하고 있다.

O_3 의 전자전이는 340 nm 이하에 Hartley and Huggins 띠라고 하는 강한 자외선 흡수가 있고, 또한 450 - 740 nm 사이에는 비교적 약한 Chappius

4. Measured Absorption Cross Sections for Gaseous Species

Molecule	(cm ⁻¹)	λ	σ^a (λ) (10 ⁻¹⁸ cm ²)	κ_a (λ) at STP [(ppm cm) ⁻¹]
Acetylene, C ₂ H ₂	719.9	13.89 μ m	9.2	2.48 $\times 10^{-4}$
Ammonia, NH ₃	1.084.6	9.220 μ m	3.6	9.68 $\times 10^{-5}$
Benzene, C ₆ H ₆	1.037.5	9.639 μ m	0.09	2.42 $\times 10^{-6}$
1,3-Butadiene, C ₄ H ₆	1.609.0	6.215 μ m	0.27	7.26 $\times 10^{-6}$
1-Butene, C ₄ H ₈	927.0	10.787 μ m	0.13	3.50 $\times 10^{-6}$
Carbon monoxide, CO	2.123.7	4.709 μ m	2.8	7.53 $\times 10^{-5}$
Carbon tetrachloride, CCl ₄	793.0	12.610 μ m	4.8	1.29 $\times 10^{-4}$
Ethylene, C ₂ H ₄	949.5	10.531 μ m	1.34	3.60 $\times 10^{-5}$
	950	10.526 μ m	1.70	4.57 $\times 10^{-5}$
Fluorocarbon-11, CCl ₃ F (Freon-11)	847	11.806 μ m	4.4	1.18 $\times 10^{-4}$
	1,084.6	9.220 μ m	1.24	3.34 $\times 10^{-5}$
Fluorocarbon-12, CCl ₂ F ₂ (Freon- 12)	920.8	10.860 μ m	11.0	2.96 $\times 10^{-4}$
	923.0	10.834 μ m	3.68	9.90 $\times 10^{-5}$
Fluorocarbon-113, C ₂ Cl ₃ F ₃	1,041.2	9.604 μ m	0.77	2.07 $\times 10^{-5}$
Methane, CH ₄	2,948.7	3.391 μ m	0.6	1.61 $\times 10^{-5}$
	3,057.7	3.270 μ m	2.0	5.38 $\times 10^{-5}$
Nitric oxide, NO	1,900.1	5.265 μ m	0.6	1.61 $\times 10^{-5}$
	1,917.5	5.215 μ m	0.67	1.80 $\times 10^{-5}$
Nitrogen dioxide, NO ₂	1,605.4	6.229 μ m	2.68	7.21 $\times 10^{-5}$
	22,311.0	448.2 nm	0.2	5.38 $\times 10^{-6}$
Ozone, O ₃	1,051.8	9.508 μ m	0.9	2.42 $\times 10^{-5}$
	1,052.2	9.504 μ m	0.56	1.51 $\times 10^{-5}$
	39,425.0	253.6 nm	12.0	3.23 $\times 10^{-4}$
Perchloroethylene, C ₂ Cl ₄	923.0	10.834 μ m	1.14	3.07 $\times 10^{-5}$
Propane, C ₃ H ₈	2,948.7	3.391 μ m	0.8	2.15 $\times 10^{-5}$
Propylene, C ₃ H ₆	1,647.7	6.069 μ m	0.09	2.42 $\times 10^{-6}$
Sulfur dioxide, SO ₂	1,108.2	9.024 μ m	0.25	6.73 $\times 10^{-6}$
	1,126.0	8.880 μ m	0.2	5.38 $\times 10^{-6}$
	2,499.1	4.001 μ m	0.02 ^b	5.38 $\times 10^{-7}$
	33,330.0	300.1 nm	1.0	2.69 $\times 10^{-5}$
Trichloroethylene, C ₂ HCl ₃	944.2	10.591 μ m	0.56	1.51 $\times 10^{-5}$
Vinyl chloride, C ₂ H ₃ Cl	940.0	10.638 μ m	0.4	1.08 $\times 10^{-5}$

^aBased on the data presented by Hinkley et al (88)

^bRecent measurements (36) indicate an absorption cross section of 0.416×10^{-18} cm² for SO₂ at 3.9843 μ m, corresponding to the P₁(6) line of a DF laser.

띠들이 있다. 주 진동-회전전이는 9.0, 14.1, 9.6 μm 에 있으며, 이외에도 5.75, 4.75, 3.59, 3.27, 2.7 μm 에 약한 흡수띠가 존재한다. 이밖에도 주요 대기오염 물질들의 광흡수띠를 표 4 에 나타내었다.

이러한 광투과 특성은 매우 청명한 날씨에 측정된 것이지만 안개나 아지랭이등의 기상 조건이 매우 심대한 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. 따라서, 이러한 scattering 의 복잡성과 지엽적인 scatterer 의 편중으로 인하여 $\mu^M(\lambda)$ 의 영향을 옳게 평가한다는 것은 거의 불가능한 일이다.

2). Rayleigh and Mie Scattering

일반적으로 분자나 입자에 의해 산란된 산란광은 그림 5 에서 보는 바와같이 비등방성을 나타낸다. 따라서 기준을 정한 후에 이에 대한 미분단면적(differential cross section)을 $\sigma(\theta, \phi) = d\sigma/d\Omega$ 와 같이 정의하여 표현하고 있다. 편편광된 레이저광이 분자에 의해 산란된 경우 미분단면적은 다음식과 같다.

$$\frac{d\sigma^R}{d\Omega} = \frac{\pi^2 (\mu^2 - 1)^2}{N^2 \lambda^4} \{ \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \sin^2 \phi \} \quad (3)$$

여기서 σ^R 은 Rayleigh 산란단면적을 μ 는 분자의 background 매질에 대한 상대적인 굴절율을 나타내며, N 은 분자의 수밀도를 λ 는 입사광의 파장을 θ 는 산란각을, 그리고 ϕ 는 그림에서 보는 바와같은 편광각을 의미한다. 등방성 산란의 경우에 $d\sigma/d\Omega = \sigma/4\pi$ 가 되며, 이때의 σ 는 산란과정에서의 total cross section 을 나타낸다. 비편광 레이저광의 경우에는 ϕ 각에 대한 인자가 평균적으로 기여하여 식의 뒤 항목이 $(\cos^2 \theta + 1)/2$ 로

간단히 표현할 수 있다. 4π steradian 에 대하여 적분한 전체적인 Rayleigh 산란단면적은 다음과 같다.

$$\sigma^R(\lambda) = \frac{8\pi}{3} \left[\frac{\pi^2 (\mu^2 - 1)^2}{N^2 \lambda^4} \right] \text{ ----- (4)}$$

또한 backscattering 단면적은 다음식으로 표현된다.

$$\sigma^R(\pi, \lambda) = \frac{\pi^2 (\mu^2 - 1)^2}{N^2 \lambda^4} = \frac{3}{8\pi} \sigma^R(\lambda) \text{ ----- (5)}$$

일반적으로 aerosol 이나 입자들에 의해서 산란이 일어날 때는 입자의 크기에 따른 인자, $a=2\pi r/\lambda$, 를 곱해 주어야 한다. 여기서 r 은 입자의 반경이다. 매우 작은 dielectric 구형 입자 ($a < 0.5$)의 경우 Rayleigh 산란은 다음과 같이 표현된다[34].

$$\frac{d\sigma^R}{d\Omega} = r^2 \left[\frac{2\pi r}{\lambda} \right]^4 \left[\frac{\mu^2 - 1}{\mu^2 + 2} \right]^2 \{ \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \sin^2 \phi \} \text{ -- (6)}$$

$a \geq 1$ 이상이 되면 단면적 계산이 매우 복잡해지게 되며 이 경우에 Mie 는 무한급수 전개 기법을 사용하여 단면적을 표현하고자 하였다[35]. Mie 산란을 취급할 때에는 입자의 크기와 모양을 충분히 고려하여야 한다.

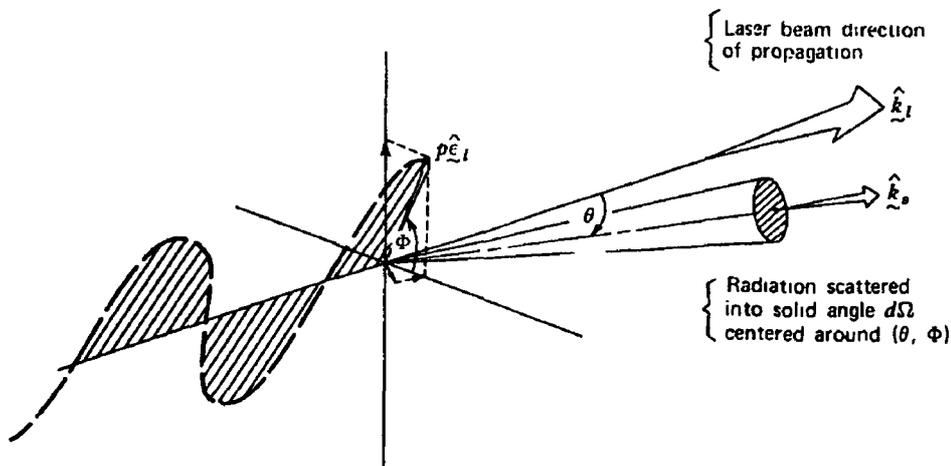


그림 5. Angular Distribution of Laser-scattered Radiation.

실제로 완전 구형 입자로부터의 산란을 보더라도 전방 및 후방으로의 강한 산란특성 이외에도 다양한 방향으로의 복잡한 산란을 관측할 수 있다. 이와같이 Mie 산란은 매우 다양한 형태로 이루어지기 때문에 그림 1 에서 보는 바와같이 산란단면적의 크기 영역도 폭넓은 차수로 분포하고 있다.

윗식 (4) 에서 보듯이 Rayleigh 산란은 파장의 4 승에 역비례하지만 Mie 산란은 그다지 크게 파장의 영향을 받지 않는다. 따라서, Rayleigh 산란은 파장이 짧은 경우에 중요하지만 Mie 산란은 가시광 영역이나 근적외선 영역에서 중요하다.

Nilsson^[36] 은 0.2-40 μm 파장영역에서 여러가지 기상조건에 따른 대기 감쇄 현상을 계산해 내었다.

단순화된 모델을 사용하여 평균 대기 감쇄계수 $x^M(\lambda)$ 을 visibility 와 관련지어 실험적으로 다음과 같은 관계를 유도한 결과가 발표되었다^[37].

$$x^M(\lambda) = \frac{3.91}{R_0} \left\{ \frac{550}{\lambda} \right\}^q \text{ km}^{-1} \quad \text{-----} \quad (7)$$

$$q = 0.585 R_0^{1/3} \quad \text{for } R_0 \leq 6 \text{ km}$$

$$* 1.3 \quad \text{for average seeing conditions}$$

여기서, λ 는 nanometer 로 표시된 빛의 파장이고, R_0 는 kilometer 로 표시된 가시거리로서 550 nm 의 빛이 수평으로 진행하여 2 % 의 transmission 을 보이는 데 까지로 정의되어 있다. Woodman^[37] 에 의하면 (7) 식은 2 μm 이상의 적외선에 대하여는 적용하기가 곤란하지만 가시광 영역에서는 정밀도에서 만족스럽지는 못하지만 R_0 로부터 $x^M(\lambda)$ 을 추정하는데 유용함을 발표하였다. 그러나 이식을 일반적인 상황에 적용하기에는 아직 한계가 있는 것으로 판단하고 있다.

3). Raman Scattering

Raman 산란의 단면적은 Rayleigh 산란 단면적보다 약 $1/10^3$ 정도에 불과하고 산란된 빛의 파장도 분자의 내부 에너지 상태에 따라 약간

천이되어 나타난다. 이러한 천이의 정도가 분자의 특성을 나타내는 척도로 쓰일 수 있기 때문에 Raman 분광학은 대기중의 미량 성분 분석에 매우 유용한 수단이다. Raman 산란 과정의 개략도를 그림 6 나타내었다.

Raman spectrum 은 2 원자 분자라 할지라도 매우 복잡하다. 전자 모멘트가 0 인 매우 단순한 분자 모델의 경우에 진동-회전천이에 관한 선택율은 다음과 같다.

$$\Delta v = 0, \pm 1$$

$$\Delta J = 0, \pm 2$$

이 경우에 Raman spectrum 은 여기파장을 중심으로한 순수 회전천이 spectrum 이외에 3 개의 추가적인 가지로 구성되게 되는데 회전천이에 따라 S ($\Delta J = +2$), Q ($\Delta J = 0$), O ($\Delta J = -2$) 로 구분한다. Inaba 와

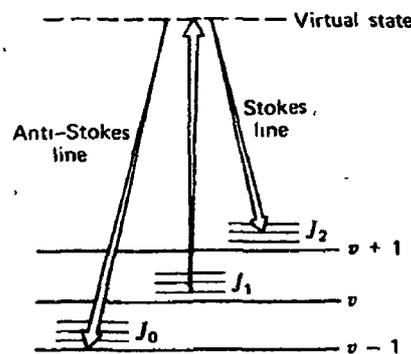


그림 6. Schematic representation of Raman vibrational Stokes and anti-Stokes scattering

Kobayasi^[10] 는 300 K 의 질소에 대하여 Stoke shift ($\Delta\nu = +1$) spectrum 을 이론적으로 계산하였으며 이를 그림 7 에 나타내었다. 그림에서 보듯이 Q-branch ($\Delta J = 0$) 의 모든 선들은 매우 근접해 있기 때문에 상호간 분해가 불가능하다. 그러나 S- 와 O-branch 는 강한 $\Delta J = 0$ 전이선을 중심으로 양쪽에 잘 분리되어 나타나고 있음을 볼 수 있다. S- 와 O-branch 의 강도는 온도의 영향을 많이 받지만 Q-branch 는 온도의 영향을 크게 받지 않는 것으로 알려져 있다.

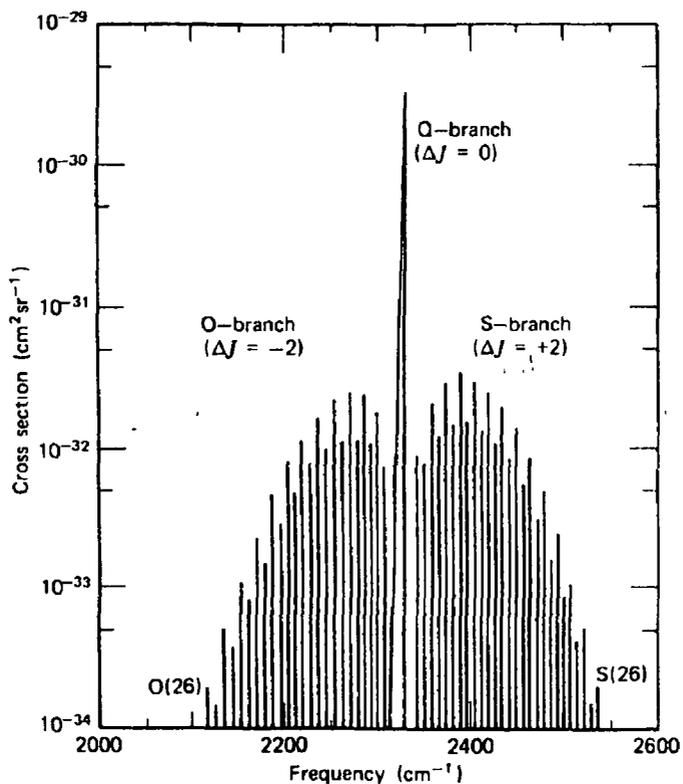


그림 7. Theoretical distribution of vibrational-rotational Raman spectrum ($\Delta\nu=0\rightarrow 1$ vibrational transition) at 300 K, showing the O-, Q-, and S-branch structures.

불행히도 농도가 높은 scatterer 로 부터의 S- 나 O-Raman side band 는 미량성분의 Q-branch 를 가려버릴 수도 있으며, 실제로 원격 환경감시에 있어서 나타날 수 있는 현상이기 때문에 이점이 문제점으로 인식되고 있다.

다음 그림 8 에는 488 nm 의 레이저를 여기광원으로 사용하였을 때의 질소의 Raman spectrum 을 제시하였다.

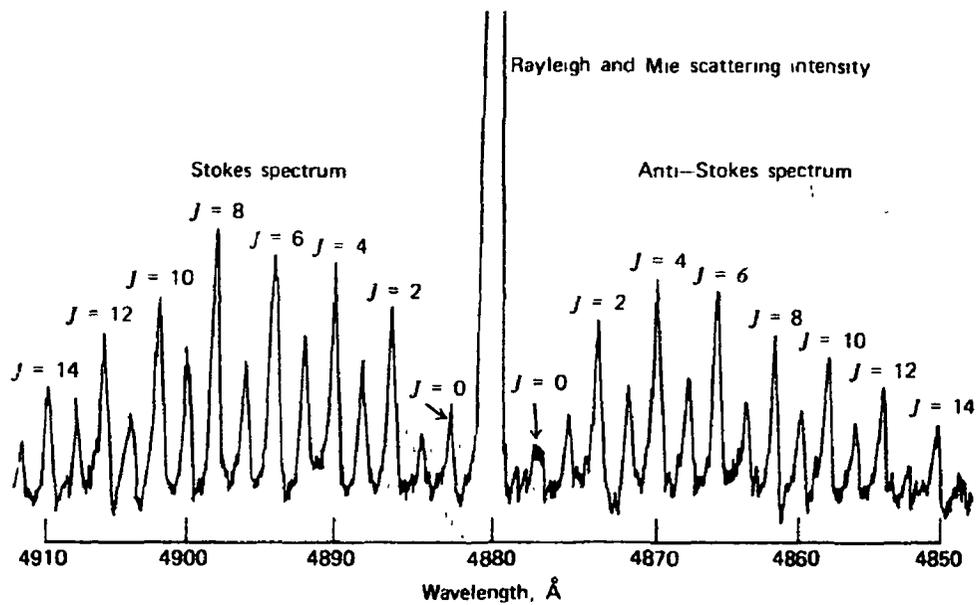


그림 8. Experimentally measured pure rotational Raman spectrum of Nitrogen. Laser excitation wavelength 488.0 nm.

4). LIDAR Equation for Scattering and DAS

펄스 형태로 작동하고 있는 system 에서 거리 R 과 ΔR 사이에서 발생한 광신호가 광검출기에 도달할 때의 signal power 는 다음 식으로 표현된다.

$$P(\lambda, R) = I(R) \zeta(R) A_E(R) \Delta R \frac{A_r}{R^2} \times \sum_i N_i(R) \left[\frac{d\sigma(\lambda, \lambda_1)}{d\Omega} \right]_i \int T_r(\lambda') T_r(\lambda', R) L(\lambda') d\lambda' \quad (8)$$

여기서 $I(R)$ ($W \text{ cm}^{-2}$) 은 거리 R (cm) 에서의 레이저빔의 power density, $N_i(R)$ (cm^{-3}) 은 R 에서 i 종의 number density, $[d\sigma(\lambda, \lambda_1)/d\Omega]_i$ ($\text{cm}^2 \text{ sr}^{-1}$) 은 i 종에 대하여 laser 파장 λ_1 로 조사시켰을 때에 파장 λ 를 중심으로 방출되는 emission band 의 integrated differential cross section 을 의미한다. $L(\lambda') d\lambda'$ 는 emission 파장이 $(\lambda', d\lambda')$ 사이에 놓인 분율을 나타내고, $\zeta(R)$ 은 R 에서 field-of-view 내에 놓인 레이저빔의 분율과 관련한 기하학적인 overlap factor 를 나타낸다. $A_E(R)$ (cm^2) 은 거리 R 에서 레이저에 의해 조사되는 면적을 나타내고, ΔR 은 검출기에 동시에 신호가 도달했다고 인정할 수 있는 실제적인 거리 변위를 나타낸다. A_r (cm^2) 은 receiver optics 의 effective aperture, $T_r(\lambda', R)$ 은 공기중에서의 transmission factor, $T_r(\lambda')$ 은 receiver optics 의 transmission efficiency 를 나타낸다. 이와 관련한 내용을 그림 9 에 나타내었다.

Receiver optics 의 bandwidth 가 interaction process (scattering or absorption) 에서의 bandwidth 보다 훨씬 큰 경우 (대부분의 경우가

그러함)에는 $L(\lambda')$ 은 delta function, $L(\lambda') = \delta(\lambda - \lambda')$, 으로 가정할 수 있으며, 이때 윗식은 다음과 같다.

$$P(\lambda, R) = I(R) \zeta(R) A_E(R) T_r(\lambda) T(\lambda, R) \Delta R \frac{A_r}{R^2} \sum_i N_i(R) \times \left[\frac{d\sigma(\lambda, \lambda_1)}{d\Omega} \right]_i \quad \text{---(9)}$$

펄스 레이저의 출력 에너지를 E_1 이라하고 time duration 을 τ_1 이라하면

$$I(R) = \frac{E_1 T(\lambda_1, R)}{\tau_1 A_E(R)} \quad (\text{W cm}^{-2}) \quad \text{--- (10)}$$

여기서 $T(\lambda_1, R)$ 는 대기중에서의 transmission factor 로써 $T(\lambda_1, R)$ 와 $T(\lambda, R)$ 을 각각 파장 λ_1 과 λ 의 빛이 대기중에서 투과하는 투과율을 나타내고, 레이저빔의 강도가 대기내에 어떤 섭동도 일으키지 않을 만큼 충분히 작다고 가정하면 다음과 같은 Beer-Lambert 법칙을 적용할 수 있다.

$$T(\lambda_1, R) = \exp \left\{ - \int_0^R \kappa(\lambda_1, R) dR \right\} \quad \text{--- (11)}$$

$$T(\lambda, R) = \exp \left\{ - \int_0^R \kappa(\lambda, R) dR \right\} \quad \text{--- (12)}$$

여기서 $\kappa(\lambda_1, R)$ 과 $\kappa(\lambda, R)$ 은 각각 대기중에서의 레이저 파장 λ_1 과 측정파장 λ 의 감쇄계수(attenuation coefficient)를 의미한다.

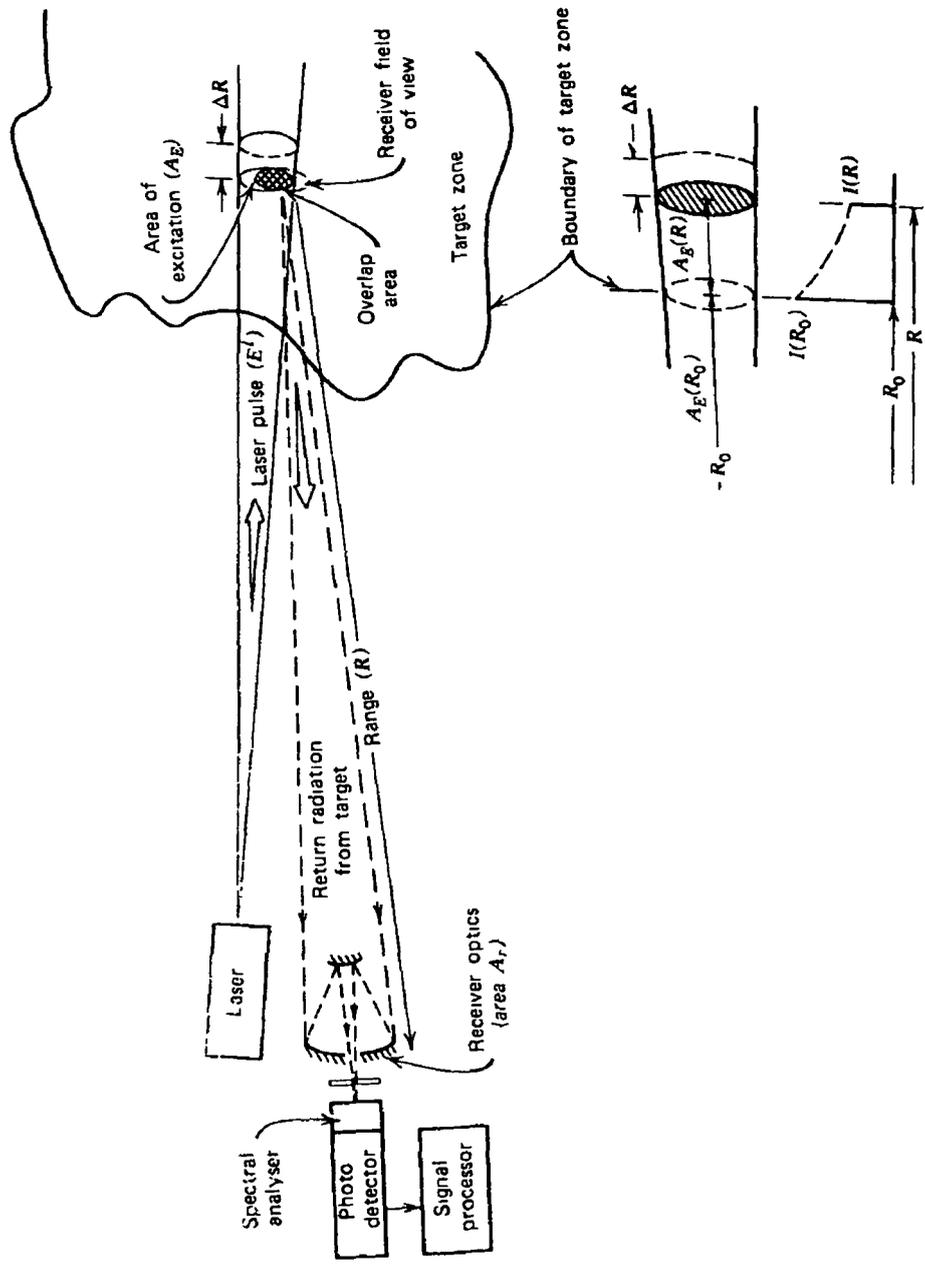


그림 9. Geometric arrangement of basic remote laser sensor.

상호작용이 매우 빠르게 일어나는 Rayleigh, Raman 또는 Mie scattering 과 같은 현상을 측정할 때에는 ΔR 은 $c\tau_1/2$, 즉 그림 10 에서 보는 바와같이 레이저 펄스 길이의 반이라고 가정할 수 있으므로 (9)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(\lambda, R) = \frac{c}{2} E_1 T(\lambda_1, R) T(\lambda, R) T_r(\lambda) \zeta(R) \frac{A_r}{R^2} \sum_i N_i(R) \times \left[\frac{d\sigma(\lambda, \lambda_1)}{d\Omega} \right]_i \quad \text{--- (13)}$$

실제로 검출기들은 일정한 감응시간 (response time)을 가지고 있기 때문에 일정한 시간 사이 ($t, t+\tau_d$) 에서 검출기의 integration time (τ_d) 동안에 검출기에 도달한 radiative energy $E(\lambda, R)$ 를 측정하는 것이 더 일반적이다. $t(=2R/c)$ 는 레이저가 발진한 시간과 거리 R 에서 되돌아온 신호와의 시간간격을 나타낸다. $E(\lambda, R)$ 은 다음식으로 표현된다.

$$E(\lambda, R) = \int_t^{t+\tau_d} P(\lambda, R) dt \approx P(\lambda, R) \tau_d \quad (J), \text{ 또는}$$

$$E(\lambda, R) = E_1 \frac{c\tau_d}{2} T(\lambda_1, R) T(\lambda, R) T_r(\lambda) \zeta(R) \frac{A_r}{R^2} \sum_i N_i(R) \times \left[\frac{d\sigma(\lambda, \lambda_1)}{d\Omega} \right]_i \quad \text{---(14)}$$

그림 10 에서 보는 바와같이 이때의 거리 분해능은 $c(\tau_d+\tau_1)/2$ 이다.

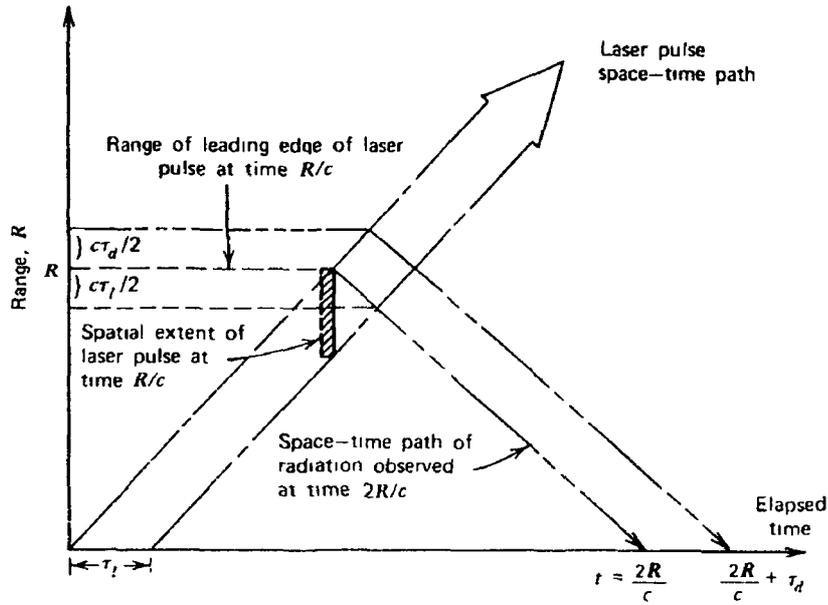


그림 10. Spatial resolution for scattering phenomena as seen from space-time diagram of propagating rectangular-shaped laser pulse

거리 R_0 에서 R 까지 i 종 하나만 레이저와 상호작용을 한다고 하고, 매질 전체의 감쇄계수 $\kappa = \kappa(\lambda) + \kappa(\lambda_1)$ 이 위치에 무관하며, scattering 이 등방성을 유지한다고 가정했을 때 윗식은 다음과 같이 표현된다.

$$E(\lambda, R) = E_i T_r(\lambda) T(R_0) \zeta(R) \frac{c\tau_d}{2} \frac{A_r}{R^2} N_i \frac{\sigma_i(\lambda, \lambda_1)}{4\pi} \times \exp[-\kappa(R-R_0)] \quad \text{--- (15)}$$

여기서 $\sigma_i(\lambda, \lambda_1)$ 는 전체의 산란단면적이고,

$$T(\lambda_1, R) T(\lambda, R) = T(R_0) \exp[-\kappa(R-R_0)] \text{ 이며,}$$

$$T(R_0) = T(\lambda_1, R_0) T(\lambda, R_0) \text{ 이다.}$$

Mie 산란의 경우 $N_i \sigma_i(\lambda, \lambda_1)$ 는 Mie volume backscattering coefficient $\beta^M(\lambda_1)$ 로 대체할 수 있으며, 윗식은 다시 다음과 같이 표현된다.

$$E(\lambda_1, R) = E_1 \frac{c \tau_d}{2} \frac{A_r}{R^2} T_r(\lambda_1) \zeta(R) \frac{\beta^M(\lambda_1)}{4\pi} \exp \left\{ -2 \int_0^R \kappa(\lambda_1) dR \right\} \quad (16)$$

이 경우에 돌아오는 빛의 파장은 바뀌지 않는 것으로 간주하였다.

파장 λ_1 에서의 전체 감쇄계수 $\kappa(\lambda_1)$ 는 앞서 언급한 바와같이 다음과 같은 성분들로 구성되어 있다.

$$\kappa(\lambda_1) = \kappa^M(\lambda_1) + \kappa^R(\lambda_1) + \sum \kappa_i^A(\lambda_1) \quad (17)$$

DAS의 경우에는 흡수파장의 center line으로 선정된 λ_1 과 흡수파장에서 멀리 떨어진 또하나의 레이저 파장 $\lambda_1 + \delta\lambda$ 두개의 레이저 파장을 사용하므로 이때는

$$\kappa(\lambda_1) = \bar{\kappa}(\lambda_1) + \kappa_i^A(\lambda_1) \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \kappa(\lambda_1 + \delta\lambda) &= \bar{\kappa}(\lambda_1 + \delta\lambda) + \kappa_i^A(\lambda_1 + \delta\lambda) \\ &\approx \bar{\kappa}(\lambda_1) + \kappa_i^A(\lambda_1 + \delta\lambda) \quad (19) \end{aligned}$$

여기서 $\bar{\kappa}(\lambda_1)$ 은 측정대상 물질의 흡수에 의한 기여를 배제한 나머지에 의한 감쇄계수를 의미한다. 이식이 의미를 갖기 위해서는 레이저 파장 λ_1 과 두 레이저 간의 파장 차이 $\delta\lambda$ 이 i 종에 대하여 오직 흡수계수에서만

서로 차이를 보일 수 있도록 선택되어야 한다는 것이다. 또한 두 파장에 대한 receiver transmission efficiency $T_r(\lambda)$ 와 대기중에서의 volume back-scattering coefficient β 은 $\delta\lambda$ 의 범위에서 λ 에 무관하다고 가정할 수 있어야 한다. 즉,

$$T_r(\lambda_1 + \delta\lambda) \approx T_r(\lambda_1)$$

$$\beta(\lambda_1 + \delta\lambda) \approx \beta(\lambda_1)$$

이러한 상황을 적용하여 다음식을 유도할 수 있다.

$$\frac{E(\lambda_1 + \delta\lambda, R)}{E(\lambda_1, R)} = \exp \left\{ -2 \int_0^R [\kappa_i^A(\lambda_1 + \delta\lambda) - \kappa_i^A(\lambda_1)] dR \right\} \quad (20)$$

두 파장에서 도달된 파장의 비를 $J(R, \lambda_1, \delta\lambda)$ 라고 하면 다음과 같이 i 종의 density 를 구할 수 있는 식이 유도된다.

$$N_i(R) = \frac{1}{2 \varepsilon_i(\lambda_1, \delta\lambda)} \frac{d[\ln J(R, \lambda_1, \delta\lambda)]}{dR} \quad (21)$$

여기서 $\varepsilon_i(\lambda_1, \delta\lambda)$ 는 차등흡수단면적으로서 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon_i(\lambda_1, \delta\lambda) = \sigma_i^A(\lambda_1) \left[1 - \frac{L^A(\lambda_1 + \delta\lambda)}{L^A(\lambda_1)} \right] \quad (22)$$

$\sigma_i^A(\lambda_1)$ 는 레이저 파장 λ_1 에서의 peak 흡수단면적을 의미하며, $L^A(\lambda_1 + \delta\lambda)/L^A(\lambda_1)$ 은 두파장에서의 흡수단면적비를 의미하고 있다.

5). Fluorescence 를 측정할 경우의 LIDAR 식

Fluorescence 를 측정할 경우에는 fluorescence signal 이 이완되어 나가는 현상을 고려하여야 한다. Kildal 과 Byer^[38] 가 이러한 현상을 고려하여 다음 (13) 식을 유도하였다. 즉, 광검출기의 검출시간 간격(t, τ_d) 과 검출파장 영역($\lambda, \Delta\lambda_0$)에서 검출되는 광에너지는 다음과 같다.

$$E(\lambda, R) = E_i K_0(\lambda) T(R) \zeta(R) \frac{A_r}{R^2} \frac{N_F(R) \sigma^F(\lambda_i, \lambda)}{4\pi} \frac{c\tau_d}{2} \gamma(R) \quad (23)$$

여기서, $\Delta\lambda_0$ 는 전체적인 파장선평이고, $K_0(\lambda)$ 는 receiver 와 광검출기의 filter function, $N_F(R)$ 과 $\sigma^F(\lambda_i, \lambda)$ 는 각각 fluorescence 를 방출하는 물질의 수밀도와 fluorescence 단면적을 나타낸다. Receiver system 에서 검출할 수 있는 파장의 선평이 fluorescence 파장선평보다 작을 때 filter function 은 다음 (24) 식으로 표현된다.

$$K_0(\lambda) \equiv \int_{\Delta\lambda_0} \zeta(\lambda) d\lambda \quad (24)$$

$\gamma(R)$ 은 fluorescence 측정에 영향을 주는 거리상의 여러 복잡성을 종합적으로 표현하고 있으나, 매질이 광학적으로 thin 하고, 또한 레이저 펄스 duration 이 여기분자의 lifetime 보다 큰 경우 1 로 가정할 수 있다^[30].

광학적으로 thick 한 매질에서는 (23) 식을 다음 (25) 식으로 변환시킬 수 있으며, 이식은 습도분포의 측정등에 유용하고 특별히 laser

fluorosensor equation 이라 부른다.

$$E(\lambda, R) = E_1 K_0(\lambda) T(R) \zeta(R) \frac{A_r}{R^2} \frac{N_F(R) \sigma^F(\lambda_1, \lambda)}{4\pi\{\kappa(\lambda_1) + \kappa(\lambda)\}} \quad (25)$$

지금까지 본 바와같이 LIDAR 식은 집광된 레이저빔과 관련 광학계의 특성 그리고 빛이 통과하는 매질의 특성간의 관계를 보여주고 있다. 수광된 광신호를 이용하여, 사용하고 있는 광학계를 제대로 평가하기 위하여는 LIDAR 식을 풀어야 한다[39]. 그러나 이식을 정확히 풀기 위해서는 매우 많은 정보가 요구되고 있다. 태양광에 의한 background 잡음도 심대한 영향을 미치는 요인이다. 또한 10 μ m 근처에서는 열적 잡음에 의한 영향도 크게 작용하며, airborne LIDAR 의 경우 검출기가 지구쪽을 향하고 있으면 지표에서 반사 또는 산란된 태양광의 영향이 상당히 크게 나타나고 있는 실정이다[40].

제 3 장 대기오염 및 환경인자 측정에서의 LIDAR 활용

레이저를 이용한 원격 측정 기술이 급속히 발전해 오면서 원격 환경 감시에서의 레이저 활용 가능성이 증대되고 있을 뿐만 아니라, 이미 미약하나마 부분적인 실용화를 이루고 있는 상황에 있다. 이와같은 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. 본 장에서는 LIDAR 를 환경인자들의 변화 측정과 공해물질의 감시에 사용한 예를 분석하고자 한다.

1. 환경인자에 대한 활용 연구

가. 대기 주성분의 변화 측정

대기는 질소와 산소가 주성분으로 존재하며 CO_2 의 함량도 매우 크다. 대기중의 산소-질소 균형은 산소를 생산해 내는 주 원천인 녹색식물과 바다의 해초류 변화를 파악하는 척도이며, 산소의 감소속도의 변화는 인구증가나 화석연료의 사용 정도에 영향을 받는다. Schwiesow 와 Derr 는 Laser Raman scattering 측정 방법을 사용하여, 대기중의 O_2-N_2 균형을 측정하였다. 그들이 측정한 결과는 여타의 다른 방법에 비해 100 배 이상 정밀한 것이었으며, 산소-질소 비의 측정은 0.3 ppm 까지 탄산가스-질소 비의 측정은 0.006 ppm 까지의 정밀도를 얻었다고 발표하였다[41]. 이방법은 대기중의 산소-탄산가스-질소 간의 균형을 장기적으로 측정하는

데 매우 유용한 방법으로 제시되었다.

질소레이저(337 nm)를 사용한 Raman scattering 측정법으로 대기중의 질소(365.9 nm)와 산소(355.7 nm)를 주변 1 km 에 대한 측정된 결과가 Leonard 에 의해 발표되었으며[42], 25 MW, Q-switched Ruby 레이저를 이용한 대기 밀도 측정이 Cooney 에 의해 행해졌다[43]. Garvey 와 Kent 는 이 방법을 사용하여 성층권(지상 약 40 km)까지의 질소 밀도를 측정 발표하였고, 그 결과는 U.S. Standard Atmosphere 에 기술되어 있는 값과 balloon-mounted radiosonde 측정법으로 측정된 값과 잘 일치하는 결과를 얻었다[44].

나. 대기중의 수증기 분포 측정

대기중에서의 수증기 역할은 매우 중요하다. 물이 상변화를 이룰 때 방출하는 잠열은 대기 순환의 원동력이 되고 있다. 또한 수증기는 대기중에서 적외선을 흡수하는 주요 원천이기도 하다[45, 46]. 그러므로 수증기는 CO₂ 와 더불어 지구의 온도를 따뜻하게 하는 중요한 역할을 담당하고 있다[47]. 기후 변화에서의 이와같은 중요한 물의 역할이 미국 Easton 에서 열린 workshop 에서도 새롭게 강조된 바 있다[48].

미국 NASA 에서는 1980 년대 초반부터 대기에서의 물의 중요성을 인식하고 대기중 수증기의 분포를 지상에서 측정할 수 있는 Raman LIDAR 를 개발하였다[49-50]. Raman 측정법을 사용하여 대기중의 수증기 분포를 측정할 초창기 인물은 Melfi[51] 와 Cooney[52, 53] 로서 이들은

frequency-doubled, Q-switched ruby laser 를 사용하여 수증기로부터 되돌아 오는 광신호를 검출하였고, 질소의 진동모드에 의한 Raman 신호의 강도를 기준으로 정규화하여 수증기의 량을 측정하였다. 이들이 측정한 값도 radiosonde 측정법으로 측정한 값과 잘 일치하는 결과를 보였다. 대부분의 Raman 측정에 기초한 LIDAR 측정은 낮에는 햇빛에 의한 심한 잡음으로 인하여 야간에만 측정해야 하는 제약이 있다. 이러한 문제점을 극복할 수 있는 한가지 방법은 측정파장을 소위 solar blind 라고 불리는 230-300 nm 대역에서 측정장비를 운용하는 것이다. 그러나 이 대역에서는 대기중의 오존에 의한 심한 광흡수로 인해 측정 레이저의 강도도 줄일 뿐만아니라 Raman-back scattered 신호도 역시 감소하므로 또 다른 새로운 약점이 발생한다. 그러므로, Raman scattering 을 이용한 수증기의 측정에는 한계가 있으며 주로 3 km 이내의 근거리 측정에 활용되고 있다. 레이저의 출력을 크게하면 측정 거리를 멀리할 수 있으나 이때는 이 파장 영역이 눈에 영향이 큰 영역이므로 눈의 보호 측면에서 문제가 된다. 한편, Rayleigh 또는 Mie scattering 과 같은 탄성산란을 이용할 경우 H₂O Raman scattering 을 이용할 때 보다 10⁵ 배 이상 신호가 강하므로 원거리 측정에서는 이러한 방법을 이용한 differential absorption and scattering (DAS) 측정 방법이 훨씬 유용하다. Murray 등은 1 J/pulse 의 TEA CO₂ 레이저를 이용한 DAS 법으로 수평거리 1 km 에서의 수증기 함량을 측정하였다^[54]. Murray 가 측정한 LIDAR 신호를 그림 11 에 나타내었다.

이 그림에 의하면 R(20) 에서 H₂O 에 의한 흡수로 인해 검출된 신호가 다른 line 에 비해 작게 나타나고 있음을 볼 수 있다.

근적외선 영역 (724.37 nm 의 H₂O 흡수선)에서 작동하는 훨씬 감도가

좋은 differential absorption lidar (DIAL) 가 Browell 등^[55]에 의해서 개발되었는데, 이 장치는 1.5 J Q-switched ruby laser 를 사용하고 있으며, beam splitter 를 사용하여 일부는 H₂O 에 대한 off-line(694.3 nm) 으로 사용하고, 일부는 dye laser 의 pumping source 로 사용하여 on-line 파장 (724.37 nm) 을 발전시키는데 사용한다. 수직적인 H₂O 의 분포를 전형적으로 잘 보여주고 있는 자료를 그림 12 에 나타내었다^[55].

Zuev^[56] 등은 temperature-tuned ruby laser 를 사용하여 H₂O 의 흡수파장인 694.38 nm 에서 지상 약 17 km 까지 측정영역을 확대하였다. 그밖에도 비행기나 shuttle 등에 탑재된 DIAL 장비를 이용한 H₂O 측정 결과가 많이 발표된 바 있으며, 이러한 자료를 통하여 대류권과 성층권 사이의 유체 흐름의 관계나 거시적 또는 미시적 생태계 변환과정을 연구할 수 있다.

다. 기온 분포의 측정

온도 분포의 측정은 기후에 대한 모델 설정이나 기상 예보등을 위하여 매우 중요하다. 예를들면, 폭풍우의 강도는 온도구배와 밀접한 관계가 있으며, 구름의 높이나 가시거리등도 습도와 온도의 영향을 받는다. 특히 대도시 상공에서 일어나는 온도 역전 현상은 매우 심각한 공해문제를 야기한다. 최초로 빛에 의한 공기 밀도 측정으로 온도를 추정하는 실험이 Elterman 에 의하여 제안되었다^[57,58]. 그는 탐조등을 사용하였으며, Rayleigh scattering 을 측정하여 지상 10-67 km 사이의 온도를 계산해내는

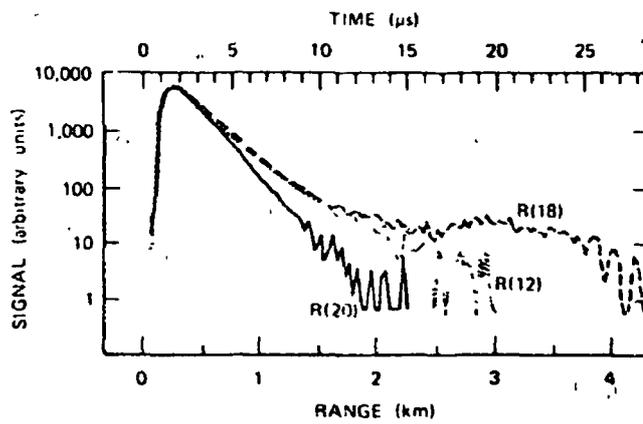


그림 11. LIDAR backscatter signal for R(12), R(18), and R(20) lines on the $10\ \mu\text{m}$ band of a CO_2 laser. The R(20) is more strongly absorbed by ambient H_2O vapor than is R(12) or R(18).

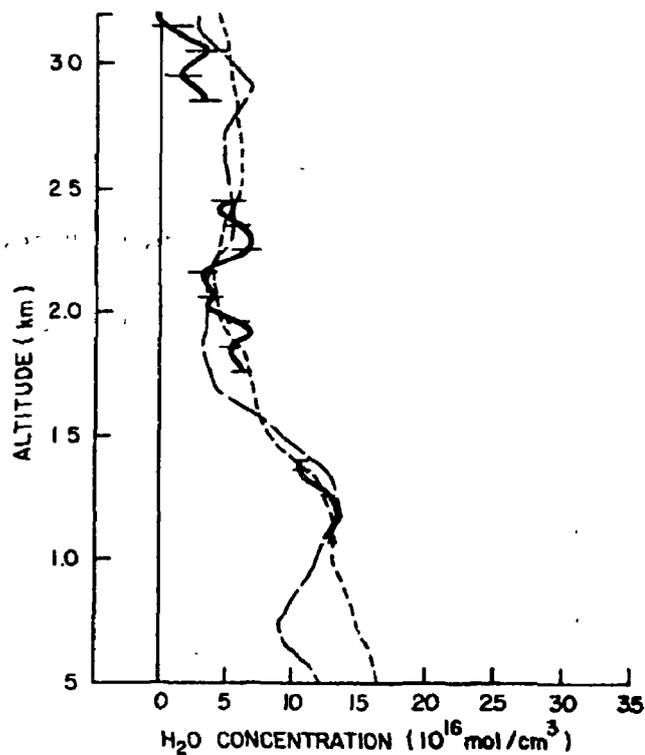


그림 12. Vertical distribution of water vapor determined by a DIAL system.

방식을 사용하였다. Sandford^[59] 는 강력한 레이저를 사용하여 같은 방식의 과정을 거쳐 온도를 측정하였으며, 결과를 그림 13 에 나타내었다. 이 결과는 U.S. Standard Atmosphere 에 잘 일치하는 결과이다.

Cooney^[60] 는 N₂ 의 회전 Raman scattering 을 이용하는 방법이 온도 분포를 측정하는데 매우 유용한 수단임을 제안하였는데, 이는 회전 Raman spectrum 이 온도에 대한 감도가 매우 좋고 scattering 강도도 비교적 크기 때문이라고 주장하였다. 또한 differential 방법을 사용할 때 더 좋은 감도를 얻을 수 있고, 다른 외적인 인자들의 변화 영향을 상쇄시킬 수 있으므로 differential 방법의 사용을 권하고 있다. Salzman^[61] 이 differential 방법을 사용하여 실내의 온도 분포를 -20 °C 에서 30 °C 까지 측정할 때 100 m 범위에서 거리분해능은 5 m, 측정 정밀도는 ± 3 °C 이었다. 측정시에는 2 개의 interference filter 를 사용하여 하나는 여기파장에 가까운 파장선을, 다른 하나는 wing 에서 나타나는 회전 anti-Stokes 선을 측정하여 상호 비교하였다. 두 파장선의 강도의 비는 온도에 의존하여 나타난다.

그외에도 수증기의 1.9 μm 흡수띠를 이용하는 differential absorption 방법도 사용되는데, 이때는 Nd:YAG 레이저에 optical parametric oscillator 를 부착하여 파장을 tuning 하여 사용하였고, 산소의 770 nm A-band 에서의 흡수를 이용하는 DIAL 도 있다. 산소를 측정할 때는 연속발전 krypton 레이저를 pumping 광원으로 사용하여 두개의 dye 레이저를 발전시키며, 하나는 산소의 768.38 nm 에 맞추고, 다른 하나는 이 선으로부터 5.9×10^{-2} nm 만큼 떨어진 선을 reference 선으로 선택 사용한다. 산소를 사용한 경우 1 km 의 측정 거리에서 1.0 °C 이내의

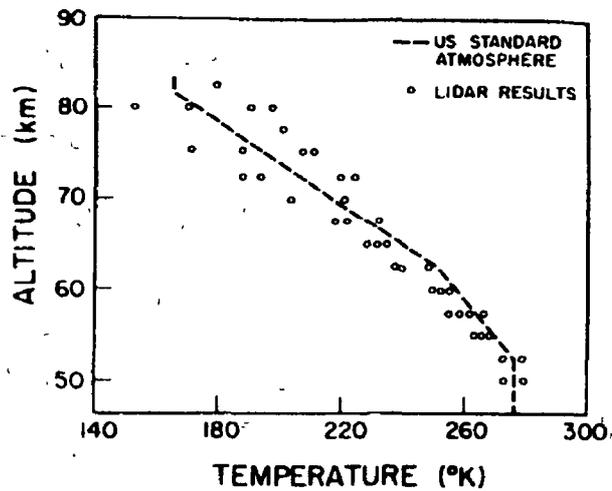


그림 13. Upper atmospheric temperature profile deduced from lidar elastic backscattering measurement.

분해능으로 측정이 가능하였으며, 잡음 수준은 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 정도였다. 그러나 이러한 흡수 측정법은 거리에 대한 분해능이 없기 때문에 단지 측정 거리내에서의 평균값만을 알 수 있다.

라. 환경변화에 영향이 큰 미량 성분의 측정

대기중에 포함되어 있는 미량 성분도 대기 환경 변화에 많은 영향을 미친다. CO_2 는 지구환경의 열적 평형에 관여하며, O_3 는 파장 300 nm 이하의 자외선을 차단하여 생명체를 보호하며, OH radical 은 여러가지 화학작용을 일으키므로써 자연환경의 균형 유지에 기여하고 있다. 그러므로 이들의 지속적인 측정은 매우 중요하다.

Schofield^[62] 는 이러한 미량 성분의 측정에 laser-induced

fluorescence 방법이 유용하다고 주장하였다. 그러나 대류권 영역에서는 분자 밀도가 크기 때문에 fluorescence quenching 현상이 두드러지므로 사용에 한계가 있다. 따라서, 이 방법은 주로 성층권에서의 미량 성분 분석에 유용하다. McIlrath^[63] 는 성층권에서 laser-induced fluorescence 방법으로 측정할 수 있는 미량 성분에 대하여 그 측정법과 분광학적 특징을 종합 발표하였다.

OH radical 은 화학적인 활성이 매우 크므로 대기중에서 여러가지 화학작용을 일으키는 미량 성분이다. 또한 이것은 CO 를 CO₂ 로 변환시키는 역할을 한다고 믿어지고 있으며, 광화학 스모그를 일으키는 중간 매개물로 여겨지고 있다. 또한 성층권에서는 O₃ 의 파괴에도 관여하여 중간권 (mesosphere) 하부와 성층권 상부에서의 O₃ 농도 균형 유지에 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 이와같은 O₃ 의 농도 분석에 laser-induced fluorescence 방법이 사용되고 있다. 그림 14 는 소련의 Kurchatov 원자력연구소에서 100 W 급 XeCl excimer laser 를 사용하여 구성된 오존 분석용 LIDAR 개략도이다. 특히 최근에는 excimer 레이저나 기타 광학적 장비들이 크게 발전하였으므로 이 방법의 이용은 나날이 증가할 전망이다.

Heaps^[64] 등은 지상 34-37 km 에 대하여 정오부터 해가 진후 약 2 시간까지 OH 를 시간에 따라 측정하였으며, 약 40 ppt 부터 약 5 ppt 까지 농도가 변하는 것을 관찰하였다. 사용한 장비의 개략도를 그림 15 에 나타내었다. 이 장비는 balloon-borne 형태로서 400 mJ/pulse 의 Nd:YAG 레이저를 pumping source 로, 직경 30 cm 의 Cassegrain telescope 를 receiver 로 사용하고 있고, 아울러 성층권의 O₃ 측정에도 사용한 것으로 보고되었다. 지상에 설치한 LIDAR 로써 최초로 성층권 약 15-30 km 범위의

O_3 분포를 측정 한 것은 Uchino 등으로 이들은 16 ns, 50 mJ, XeCl excimer 레이저를 사용하였다^[65]. Receiver 로는 직경 50 cm 의 Newtonian telescope 를 사용하였다. 그후에도 그들은 장비를 개선하여 지상 4-12 km 의 대류권 영역에서도 사용하였는데, 이때는 308 nm 의 XeCl 레이저와 209.4 nm 의 KrF-Raman hybrid 레이저를 사용한 2 파장 LIDAR 법을 사용하였다. 이 영역에서 측정된 O_3 농도는 약 10^{12} cm^{-3} 정도로 나타났다.

NASA 에서 개발한 airborne DIAL system^[66,67] 은 대류권내의 여러 기체들의 공간 분포를 측정할 수 있게 고안되었다. 이 장비는 UV 영역에서 온도 및 O_3 이나 SO_2 의 농도를 측정할 수 있으며, 가시광 영역에서는 NO_2 의 농도를, 근적외선 영역에서는 H_2O 의 농도를 측정할 수 있다. 이 LIDAR 장비는 2 개의 Nd:YAG pumped dye laser 를 사용하고 있다. 하나는 on-wavelength 에서 다른 하나는 off-wavelength 에서 약 100 μs 시차를 두고 순차적으로 작동하게 되어 있다. Dye laser 출력빔은 quartz 로 된 직경 40 cm 의 optics 를 통해 방출되며, 전체 장비는 비행기에 탑재되어 있다. Optics 는 steering 장치에 의해 비행기의 위쪽이나 아래쪽으로 선택하여 향할 수 있게 꾸며져 있다. Receiver 는 직경 36 cm 의 Cassegrain telescope 와 PM tube 로 구성되었다. 이 장비의 사진과 장치구성도를 그림 16 에 나타내었다.

이 장비를 사용하여 대류권과 성층권 사이 권계면 근처에서 O_3 를 측정 한 결과들 그림 17 에 나타내었고, ozonesonde 방법으로 측정 한 결과와 비교하였다. 두 측정 결과는 매우 잘 일치함을 보여주었다.

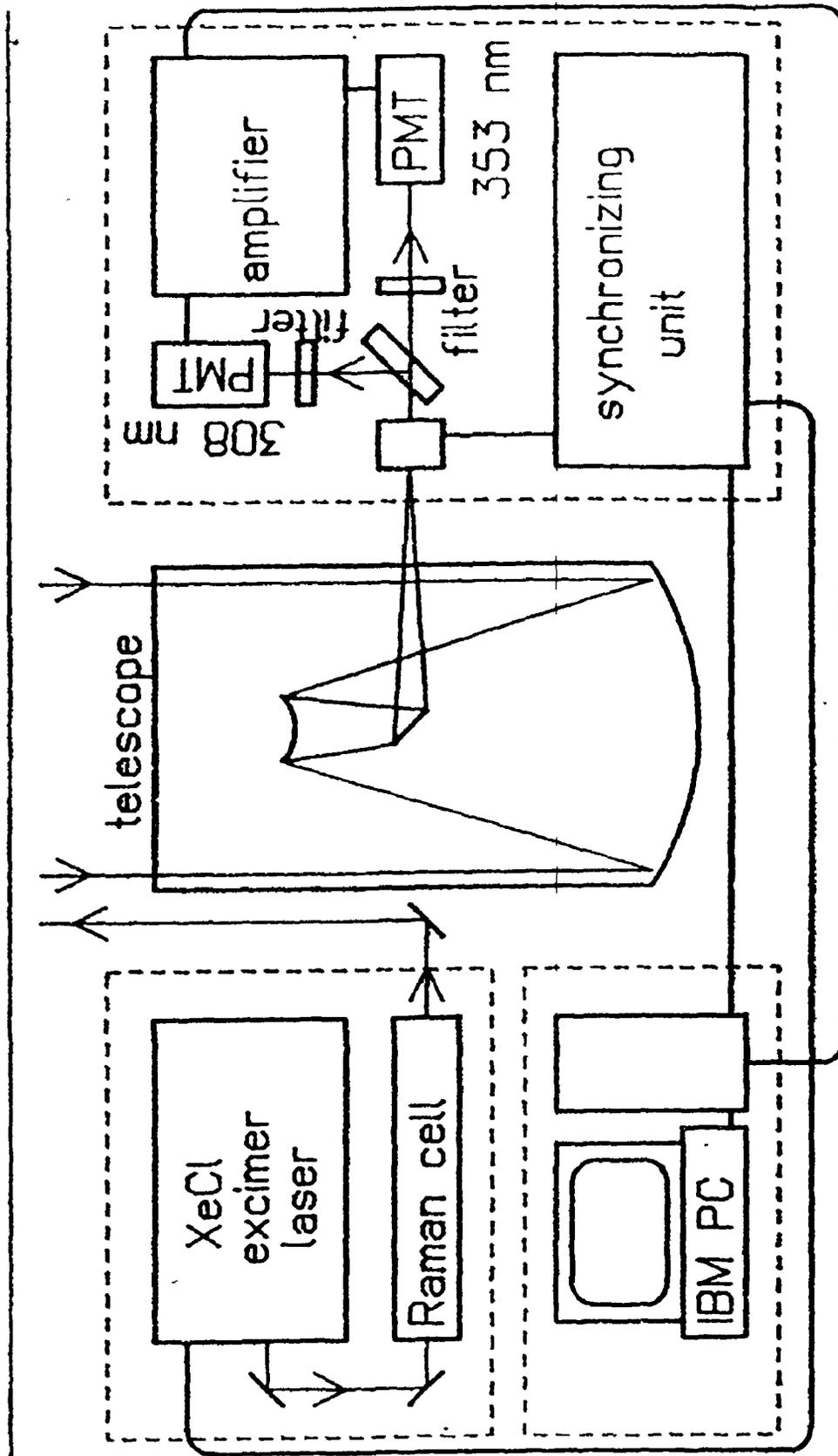


그림 14. Ozone LIDAR based on 100 W XeCl laser

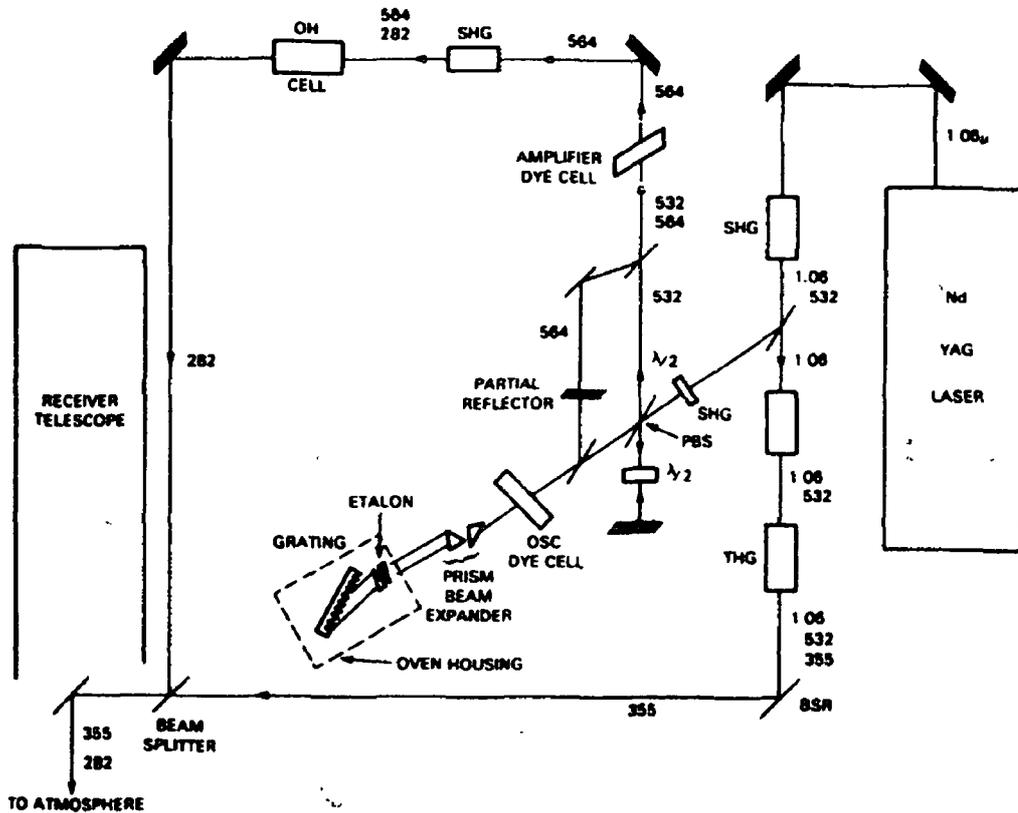
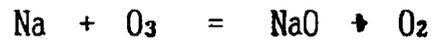


그림 15. The layout of the balloon-borne lidar system.

마. 극미량 Sodium 분포의 측정

고출력 dye laser 의 출현으로 대기권 상층부에서의 미량 성분 mapping 에 laser-induced (resonance) fluorescence 방법을 사용할 수 있게 되었다. Bowman 등은 대기권 상층부의 공기 밀도가 희박한 권역에서의 sodium 분포를 본 방법을 이용하여 지상에서 측정하였다[68]. Gibson 과 Sandford[69] 는 sodium 농도의 계절적 변화를 측정하였고, Hake 등은 운석의 지구 진입과 sodium 농도와의 관계를 연구하였다[70]. Hake 에

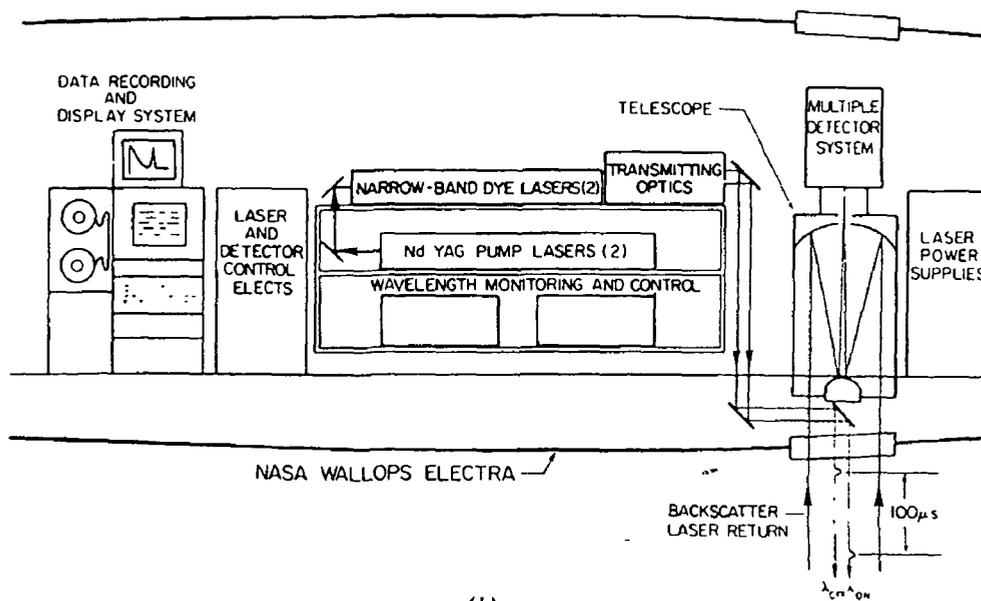
의하면 운석의 진입시 sodium 의 농도가 급격히 증가하는 것으로 밝혀졌으며, 이로인해 운석이 sodium 의 중요한 source 인 것으로 추정하고 있다. Hake 가 사용한 레이저는 two-stage (oscillator-amplifier) Rhodamine-6G dye laser 로서 589.0 nm 에서 0.5 J, 300 ns 의 출력 특성을 가지고 있다. Megie 와 Blamont^[71] 은 밤에 대기중의 sodium 농도의 변화를 측정하고 이를 다음과 같은 광화학적 반응으로 설명하면서 야간에는 이와같은 화학평형에 의해 sodium 의 농도 가 유지된다고 주장하였다. 그후에 더 진보된 장비를 사용하여 낮시간에도 sodium 의 농도를 측정할 수



있게 되었으며, 이와같은 대기중의 sodium 의 농도변화는 운석에 의한 영향과 낮시간에 지상에 있는 염분의 수직적인 이동에 영향을 받고 있음을 알게 되었다.



AIRBORNE DIAL SYSTEM SCHEMATIC



(b)

그림 16. The NASA DIAL system.

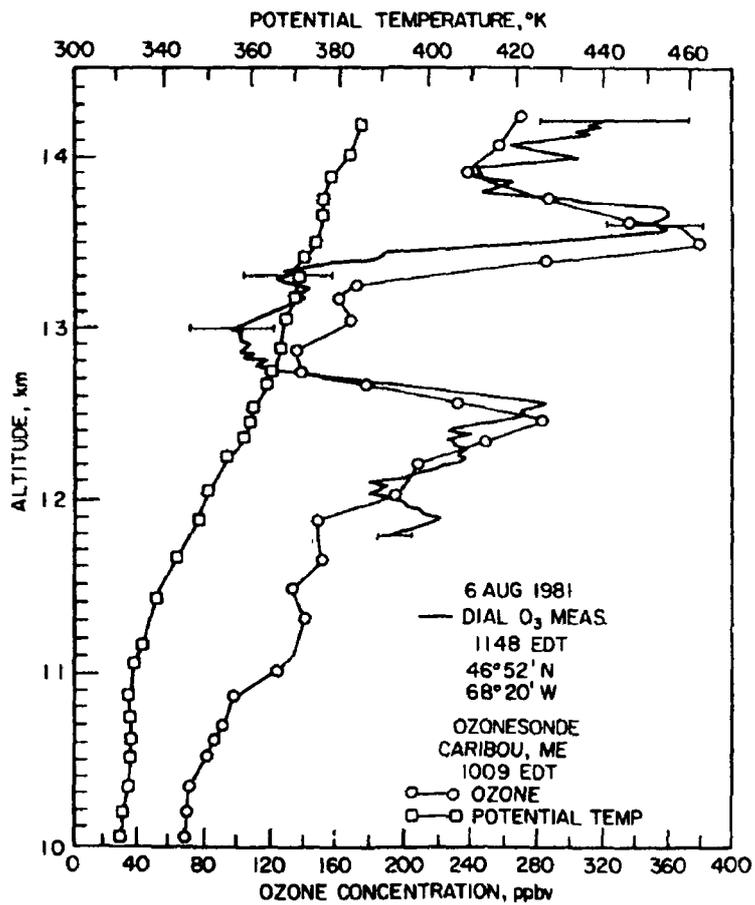


그림 17. Comparison of DIAL and ozonesonde measurements of ozone layers in the vicinity of the tropopause.

2. 환경감시에서의 활용

대기공해가 인체의 건강에 미치는 영향은 다방면으로 많이 연구되어 있으며, 많은 나라에서 대기 오염물질의 최대 배출 허용치를 정해 규제해오고 있다. 본 장에서는 레이저를 사용하여 일반적인 공해 수준에 대한 정보를 얻는 방법과 사용 예에 대하여 기술하고자 한다.

원거리에 걸쳐 오염물질의 검출에 기체 레이저를 사용해 보고자하는 노력이 60년대 후반에 Hanst 와 Morreal 에 의해 행해졌다[72]. 이들은 CO₂ 레이저나 I₂ 레이저를 이용한 차등 흡수법을 사용하면 반사경을 설치했을 때 거리 1 km 범위에서 수 ppm 정도의 CO, NO, SO₂, O₃ 등의 농도를 측정할 수 있음을 보여주었다. 차등 흡수법은 측정 system 에 대한 절대적인 검정(calibration)이 필요치 않기 때문에 사용상에 매우 편리한 점이 있다. 다음 표 5 에는 CO₂ LIDAR 를 이용하여 측정이 가능한 각종 유해 화합물들을 나타내었다[73]. 이들은 대부분 CO₂ 레이저 파장 영역에서 강한 광흡수띠를 가지고 있는 물질들이다.

Hinkley[74] 는 반도체 레이저와 InSb 적외선 검출기를 사용하여 미국 St. Louis 시내 CO 농도를 1 km 에 걸쳐 분석한 결과를 발표하였을 뿐만아니라, Cambridge 시내에서는 공명 흡수측정법으로 질소산화물을 측정하였다. 그림 18 은 Cambridge 시내에서 교통 수단에 따른 질소산화물 농도 변화를 측정한 결과이다. 이러한 측정에서 반사경을 사용하면 감도를 50 배 정도 향상시킬 수 있으며, ppb 농도 수준까지 검출이 가능할 뿐만아니라[75] heterodyne[76] 검출기법을 사용하면 훨씬 검출 감도를 높일 수 있는 것으로 알려져 있다.

⌘ 5. Expected minor pollutants available for CO₂ LIDAR.

Substance	On res. line	Off res. line	Sensit. ppm * km
freon - 12 CF ₂ Cl ₂	9R28 10P32 10P34	10P12	0.07
freon - 11 CFCl ₃	9R28 9R24	9P, 10R	0.07
ethylene C ₂ H ₂	10P14	10P20 10P28 10P32	0.085
ammonia NH ₃	9R30 10R8 10R6	9R26 10R12 10R10	0.05
trichloro- ethylene C ₂ HCl ₃	10P20 10P18 10P30	9R20 10R30 10R18	0.2
chloroprene C ₄ H ₅ Cl	10R18	10P24	0.3
hydrazine N ₂ H ₄	10P22 10P32	9R26	0.45
methanol CH ₃ OH	9P32	10P28 10P30	0.12

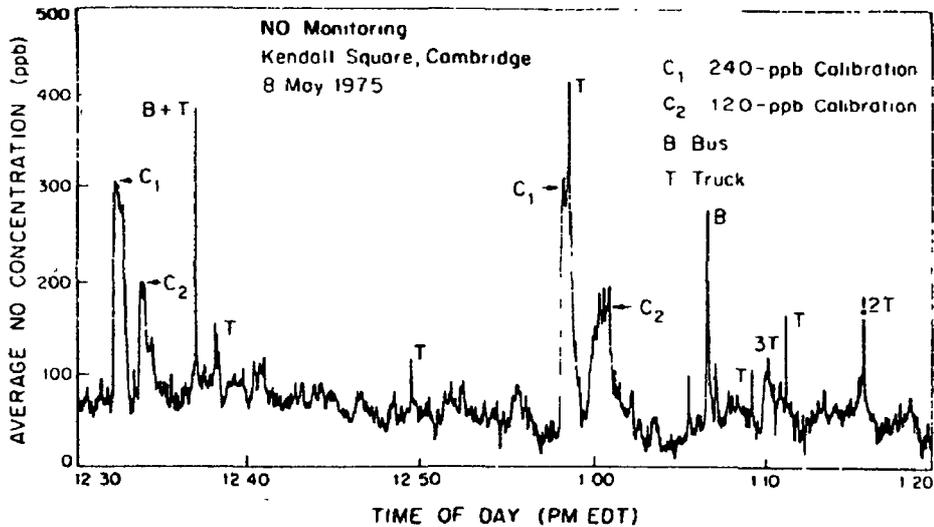


그림 18. Nitric oxide monitoring by resonance absorption.

Menzies 와 Shumate^[77] 는 CO 와 CO₂ 레이저를 사용하여 질소산화물과 오존, 그리고 ethylene 을 0.8-3.75 km 범위에서 차등 흡수법으로 측정하였다. 이때 사용한 레이저 파장은 5.2, 9.5, 10.5 μm 이고 heterodyne 신호 검출법을 사용하였다. 5-12 μm 영역에서 heterodyne 신호를 측정하면 일반적인 광검출 방법에 비해 수 orders 만큼이나 감도가 좋은 것으로 알려져 있다.

Ethylene 은 자동차등에서 배출되는 도시의 중요 공해물질 중의 하나이다. Murray^[16] 등은 주변 5 km 영역에서 1 J, 100 ns TEA CO₂ 레이저의 P(14) 와 P(16) line 을 사용한 레이저 scattering 방법으로

ethylene 의 농도를 측정하였다. 이때 사용한 receiver system 은 직경 31.75 cm 의 telescope 이며, 검출기는 detectivity $D^* = 1.1 \times 10^{10}$ cm $\text{Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ 인 HgCdTe 를 사용하였다. 이때 얻은 결과를 그림 19 에 나타내었다.

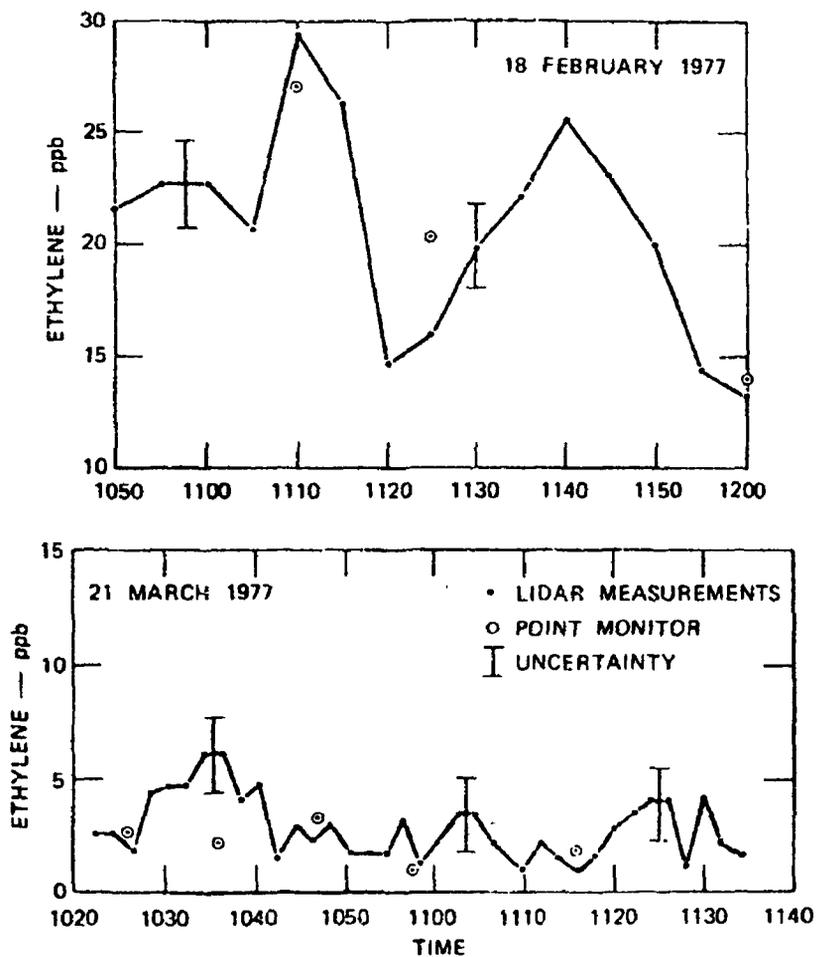


그림 19. LIDAR measured ethylene concentrations corrected for water vapor interference and compared with a point monitor.

Killinger 등은 TEA CO₂ 레이저를 사용하여 자동차에 의해 유발되는 CO 를 측정하였다^[78]. 이때는 CdGeAs₂ 결정체를 사용하여 CO₂ 레이저의 P(18) 파장을 frequency-doubling 시켜 4.65 μm 를 사용하였다. 이때의 출력은 1 mJ 이었고, 검출기는 InSb, telescope 는 직경 30 cm 인 Cassegrain type 을 사용하였다. 이 파장 대역은 CO 에 의한 흡수가 강하고 또한 다른 대기 성분에 의한 방해가 적기 때문에 매우 유리하다. 이 방법으로 낮 13 시간동안 거리 500 m 범위내에서의 CO 농도를 0.35-1.0 ppm 까지 측정하였다.

같은 장비를 사용하여 NO 의 교통 유발 영향이 측정되었다^[79]. 이때는 NO 의 흡수파장인 5.3 μm 가 사용되었으며, 1.4 km 영역에서 지형적 목표물에 의해 반사되어오는 빛을 측정하였고, 습도가 높은 날에도 사용이 가능함을 확인하였다. 이 장비를 이용하여 유독성 rocket 연료틀 0.5-5 km 에 걸쳐 100 ppb 까지 검출한 결과를 표 6 에 나타내었다^[80].

Nd:YAG 레이저를 pumping source 로 사용하여 optical parametric oscillator (OPO) 인 LiNbO₃ 를 조사시키면 1.4-4.2 μm 영역에서 약 20 mJ 이상의 고출력과 선폭 1.0 cm⁻¹ 정도의 적외선을 얻을 수 있다. Baumgartner 와 Byer^[81, 82] 는 이러한 레이저와 직경 41 cm 의 telescope, 그리고 InSb photovoltaic 검출기(at 77 K) 를 사용하여 4.0 μm 에서 SO₂ 를, 3.3 μm 와 1.66 μm 에서 CH₄ 를, 그리고 1.7 μm 에서 H₂O 를 측정하였다.

Alden 등은 LIDAR 를 이용하여 대기중의 수온을 측정하였다^[83]. 이들은 지형물을 이용하는 차등 흡수 측정법을 사용하였다. Nd:YAG 레이저를 광원으로 하는 dye 레이저를 frequency-doubling 시켜 각각 on-wavelength

와 off-wavelength 를 253.65 nm 와 253.68 nm 로 택하여 사용하였고, 직경 25 cm, f/4 Newtonian telescope 를 사용하였다. 반경 2 km 영역에서 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 측정할 수 있었다.

표 6. Absorption parameters for laser remote sensing of several hydrazine rocket fuels.

CO ₂ Laser Transition	Wavelength λ (μm)	Absorption Coefficients κ_A ($\text{cm}^{-1} \text{atm}^{-1}$)			Atmospheric Attenuation κ_r (km^{-1})
		Hydrazine	Interfering Species		
		N ₂ H ₄	NH ₃	C ₂ H ₄	
P(22)	10.611	4.77	0.045	1.09	0.1142
P(28)	10.575	2.06	0.36	1.30	0.0976
		Unsymmetrical Dimethylhydrazine	Interfering Species		
		(CH ₃) ₂ N ₂ H ₄	NH ₃	C ₂ H ₄	
P(30)	10.696	2.22	0.86	1.63	0.0907
R(10)	10.318	0.18	0.78	1.51	0.1142
		Monomethylhydrazine	Interfering Species		
		CH ₃ N ₂ H ₄	NH ₃	C ₂ H ₄	
R(30)	10.182	1.69	0.029	0.56	0.1137
R(18)	9.282	0.31	0.13	0.61	0.1418

3. 오염원 감시에서의 활용

지금까지 보아온 것 처럼 차등 흡수법은 다른 방법에 비해 유리한 점이 많다. 그럼에도 불구하고 이 방법의 복잡성과 신호 처리상의 어려움점으로 인해 앞으로도 많은 연구가 필요할 것으로 보인다. 오염원이 공간적 및 시간적으로 한정되어 있는 경우 즉, 오염원으로부터의 직접 배출을 실시간으로 감시하는 경우에는 다른 방법이 효율적으로 활용될 수 있다.

Laser-induced fluorescence 방법이 이러한 상황에 적합한 하나의 방법이다. 즉, SO_2 , NO_2 , I_2 , O_3 및 많은 탄화수소와 기타 aerosol 등의 공해물질 측정에 유용하다. 그러나 형광 파장의 폭이 매우 크고 대기중에서는 충돌에 의한 quenching 이 크며, 또한 backscattering 에 의한 영향이 크므로 원격 측정에는 한계가 있다.

Raman scattering 측정법은 이것이 매우 낮은 산란 단면적을 갖고 있기 때문에 원격 측정에 어려운 점을 가지고 있지만 그러나, 공해물질 배출원을 감시하는 데에 사용될 수 있는 몇가지 특징을 가지고 있다. 즉, (1) Raman backscattered radiation 은 각 측정대상 물질 별로 고유한 파장 천이(spectral shift)를 보여준다. (2) Raman scattered radiation 의 강도는 측정대상 물질의 농도에 비례하고 다른 분자들에 의한 방해가 없다. 따라서 대기중에 고루 존재하는 N_2 를 기준으로 하여 산란되는 빛의 강도를 상호 비교하면 별도의 검정 과정을 거치지 않아도 정량분석을 할 수 있다. (3) Raman shift 된 빛의 파장폭은 매우 좁기 때문에 solar background 나 또는 탄성산란에 의하여 되돌아오는 레이저 빛으로부터의 분리가 용이하다. (4) Raman process 는 매우 빠른 시간내에 일어나기 때문에 이러한 시간

특성도 background noise 를 줄이는데 사용할 수 있다. (5) 단지 하나의 파장의 여기 레이저가 필요하기 때문에 모든 종류의 공해물질에 대해서 동시에 Raman spectra 를 얻을 수 있으며, 이러한 multiplexing 효과를 이용할 수 있는 장점이 있다. (6) Backscattering 과정이 포함되기 때문에 시간적 · 공간적 분해능이 좋다는 특징이 그것이다.

그러나 주성분으로부터의 scattering 신호가 너무 강하면 사실상 미량 성분을 정량하기가 쉽지 않다. 이러한 문제점을 Inaba 와 Kobayasi^[10,84] 가 연구하였으며, 그림 20 에 나타내었는데, 이들은 매우 선폭이 좁은 광학 filter 를 사용함으로써 어느 정도 문제점을 해결할 수 있었다고 보고하였다.

Hirschfeld 등은 Raman scattering 을 이용하는 측정장치를 만들었는데, frequency-doubled, Q-switched, 2-J, 2 pps ruby 레이저와 직경 91.4 cm, f/6.8 인 Cassegrain telescope, polychromator 그리고 multiplex detection 이 가능하도록 photomultiplier array 로 구성하였다. 이 장치를 SO₂ 와 kerosene 이 배출되는 굴뚝에서 사용해본 결과 약 200 m 범위에서 대낮에 10 m 정도의 분해능으로 분석이 가능하였다^[85]. 그후에도 이 방법은 개선을 거듭하여 낮시간에도 수백 m 의 범위에서 많은 성분에 대하여 100 ppm 정도까지 측정이 가능하게 되었으며^[86], 석탄 화력 발전소 굴뚝에서 배출되는 SO₂ 를 측정한 결과도 발표된 바 있다^[87].

차등 흡수 및 산란(DAS) 측정법은 장비의 복잡성과 신호처리의 어려움에도 불구하고 낮이나 밤이나 공해물질 농도감시가 가능하고 또한 공해확산에 대한 map 구성이 가능하기 때문에 유용한 측정 수단이다. 선진국에서는 점증하는 산성비의 문제를 감시하기 위하여 이 방법을 많이

사용하고 있다. 독일에서는 이미 1974 년에 1 mJ, 300 ns, flashlamp pumped tunable dye laser 를 사용하여 455-470 nm 영역에서 화학공장 굴뚝에서 배출되는 NO₂ 농도를 750 m 거리에서 200 ppb 까지 측정 한 사례가 있으며, 이를 그림 21 에 나타내었다[24,25]. 이 장치는 1980 년에 정유공장에서도 활용하여 냉각탑 근처에서의 수증기 분포와 ethylene 의 확산도 측정한 바 있다[88].

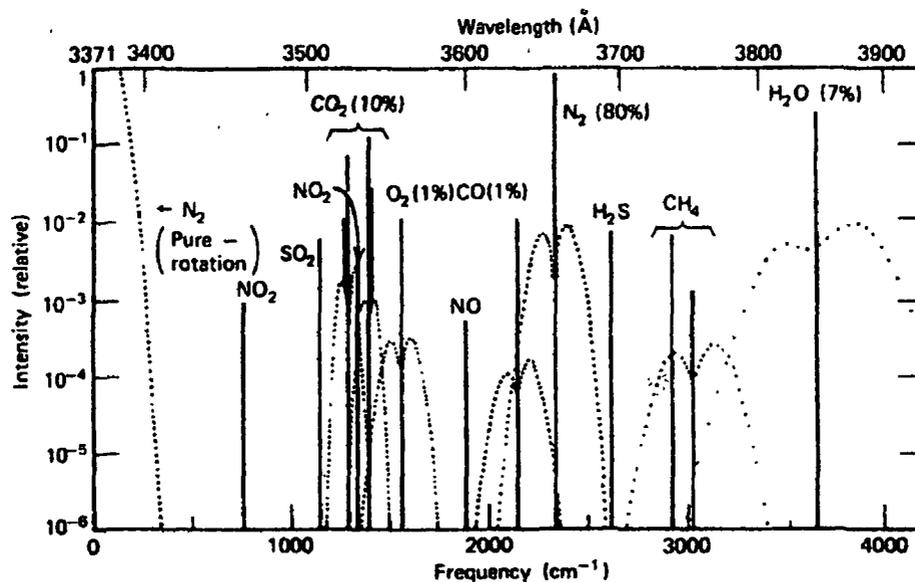


그림 20. Theoretical distribution of Raman volume backscattering coefficient due to a molecular mixture contained in a typical oil smoke as a function of Raman-shifted frequency.

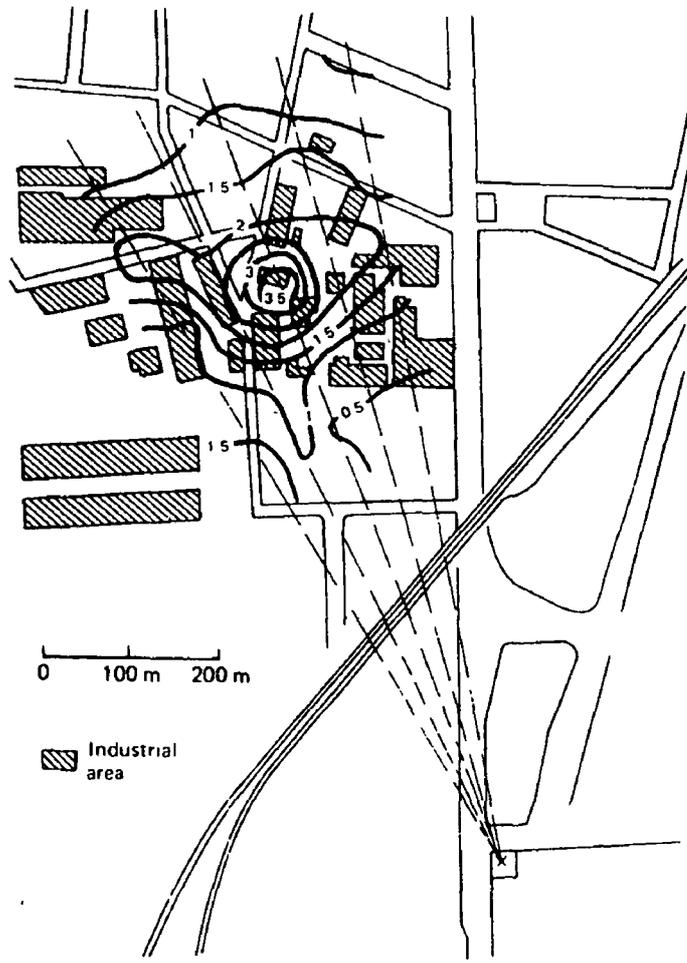


그림 21. NO₂ distribution over a chemical factory as derived from DAS measurements performed in the indicated directions at an altitude of about 45 m. The concentrations are given in ppm.

미국에서는 Electric Power Research Institute (EPRI) 를 중심으로 하여 주로 화석연료를 사용하는 utility 의 굴뚝에서 배출되는 SO₂ 나 NO₂ 의 방출 및 확산을 감시할 목적으로 이동식 mobile DIAL system 을 개발하였다. 이 장치는 SRI International, California 에서 제작하였는데 Nd:YAG pumped dye laser 2 개로 구성되었으며, 299.5 nm 와 300 nm 는 SO₂ 분석을 위하여, 그리고 448.1 nm 와 446.5 nm 는 NO₂ 분석을 위하여 사용하고 있다. 이 장비는 레이저 에너지 10 mJ, 직경 51 cm telescope 를 사용했을때 SO₂ 에 대하여 2 ppm meter 의 감도를 가지고 있으며, 약 3 km 의 영역에서 사용할 수 있는 것으로 보고되었다. 그림 22 는 이 장치를 장착한 van 과 내부 광학 배열을 보여주고 있다[89].

스웨덴의 Space Corporation 에서도 1979 년에 일상적인 환경감시와 연구를 목적으로 강력한 mobile LIDAR system 개발을 추진하였다. 여기서는 250 mJ, 7 ns, 10 pps Nd:YAG laser 를 frequency doubling 또는 tripling 하여 사용하였으며, 이때 각각 100 mJ 과 50 mJ 의 레이저 출력을 보였다. 이 레이저 출력을 dye laser 의 pumping energy 로 사용하였다. 299.30 nm 와 300.05 nm 는 SO₂ 분석을 위하여, 역시 448.1 nm 와 446.5 nm 는 NO₂ 분석을 위하여 사용하고 있다. Receiver system 으로는 직경 30 cm, f/3.3 의 Newtonian telescope, EMI 9817 photomultiplier, 그리고 신호 처리를 위하여 Biomation 8100 transient digitizer 를 사용하고 있다. 장비 구성의 개략도를 그림 23 에 나타내었다[27].

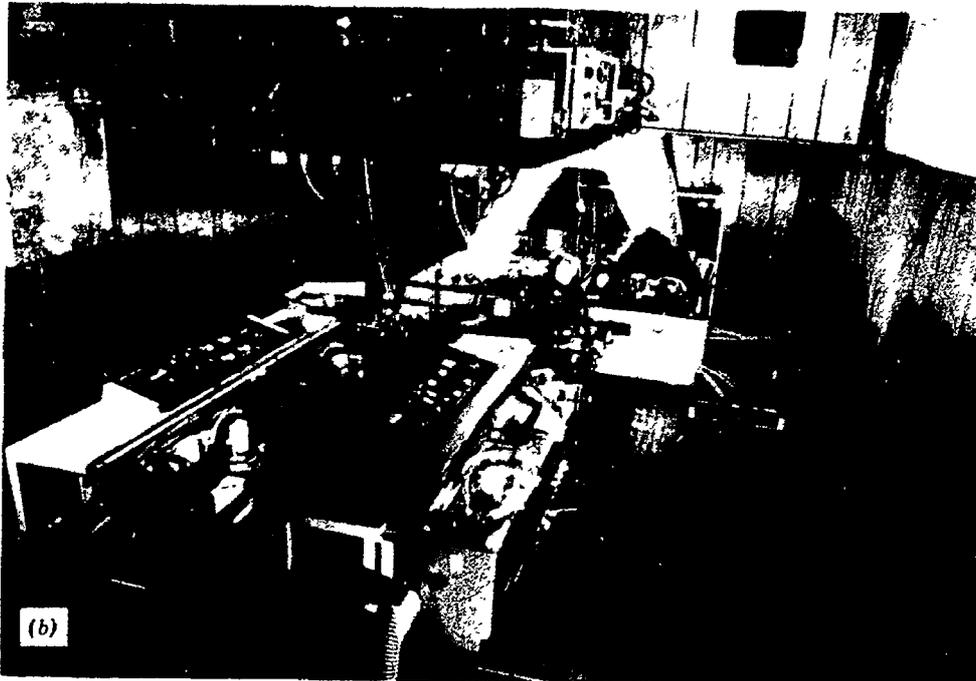
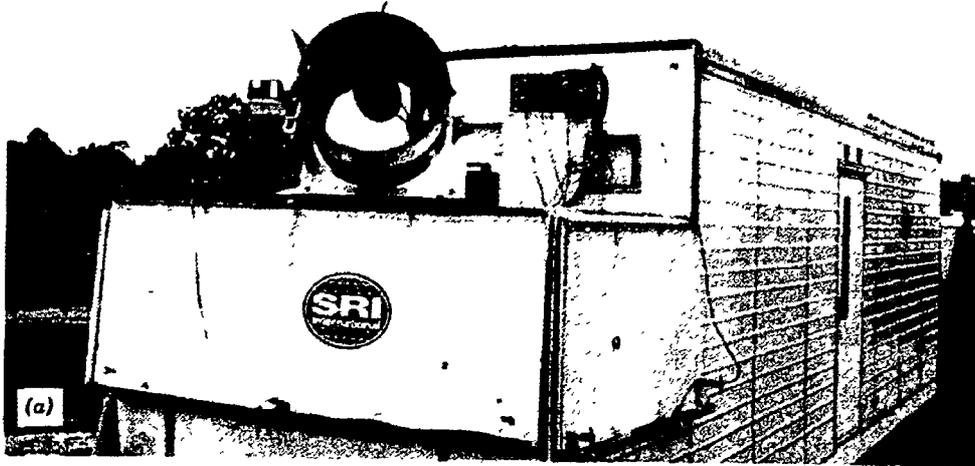


그림 22. SRI International mobile lidar (a) shows the van with receiver telescope, (b) reveals dual laser system and receiver electronics.

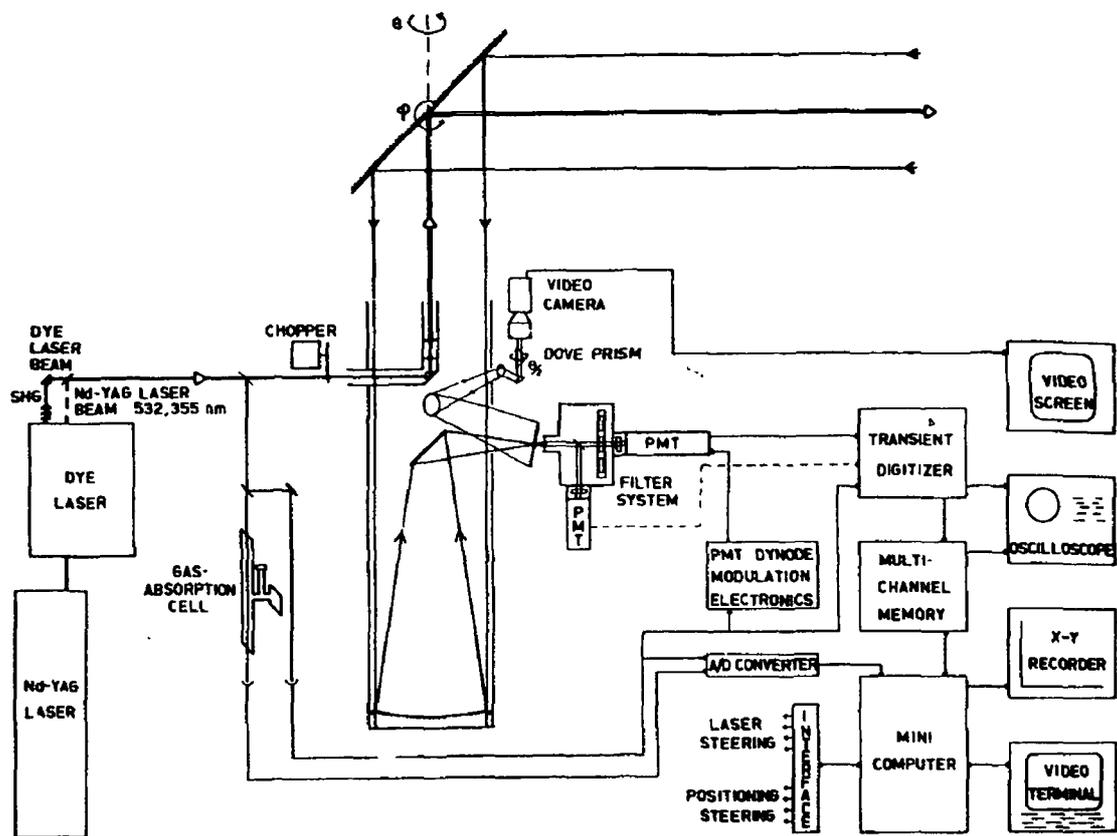


그림 23. Optical and electronic arrangement of a LIDAR system operated by National Swedish Environmental Protection Board.

4. 기타 영역에서의 활용

이밖에도 레이저를 이용한 원격 측정 방법은 다양한 분야에서 활용되고 있다. 예를들면, 바다에 유출된 기름성분을 N_2 레이저를 사용하여 그림 24와 같이 형광측정법으로 측정할 수 있다[90,91]. 또한 생태계의 변화에 중요한 역할을 하는 chlorophyll-a 의 농도 변화라든가[92], 바닷물의 수은

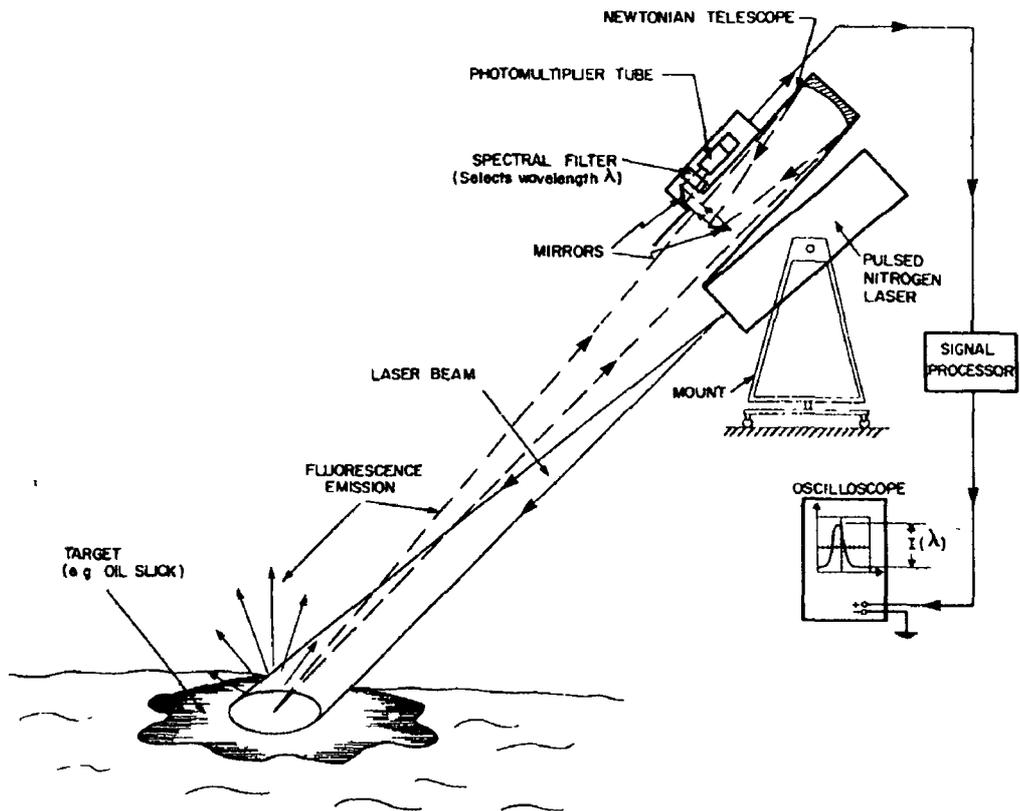


그림 24. Principle of operation of the laser fluorosensor.

분포등을 측정하는 데에도 레이저 원격 측정법이 활용되고 있다. 온도에 따라 H₂O 가 monomer 로 존재하는 비율과 polymer 로 존재하는 비율이 달라지기 때문에 이의 존재 비율을 통해 평형상수를 구하면 온도를 알 수 있다. Raman spectra 측정법으로 Labrador 해류와 Gulf 해류의 온도 분포를 측정한 결과도 발표되었다^[93]. 또한 소련 Kurchatov 원자력 연구소의 V.Yu. Baranov 박사가 '91 년 10 월초에 한국원자력연구소를 방문하였을 때 제공한 자료에 의하면 LIDAR 법으로 오존이나 다른

공해물질들의 측정 뿐만아니라 Doppler LIDAR 를 이용하여 바람의 방향과 속도도 측정할 수 있음을 역설한 바 있다. 그림 25 는 소련에서 제공한 이동식 Doppler LIDAR 의 풍속 측정 개념도이다. Doppler LIDAR 의 시초는 역시 미국 National Oceanic and Atmospheric Administration 소속의 Wave Propagation Lab.(WPL) 이라 볼 수 있는데, 이들은 1980 년대 초부터 펄스형 CO₂ 레이저를 사용하여 미국 대륙을 포함한 Canada 와 Hawaii 지역의 바람대역을 측정해 오고 있다. 이 방법을 사용하면 대류권에서의 공기 이동이나[94] 폭풍·번개등에 의한 공기의 흐름등을 관측할 수 있고, 또한 공해물질의 확산특성을 알게됨으로써 재해 예방에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 다시 있어서는 안될 일이지만 Chernobyl 원전 사고와 같은 사고가 일어났을 경우 이 방법으로 풍향·풍속을 정확히 원격 측정한다면 오염 피해로부터 많은 인명과 재산을 보호할 수 있을 것이다.

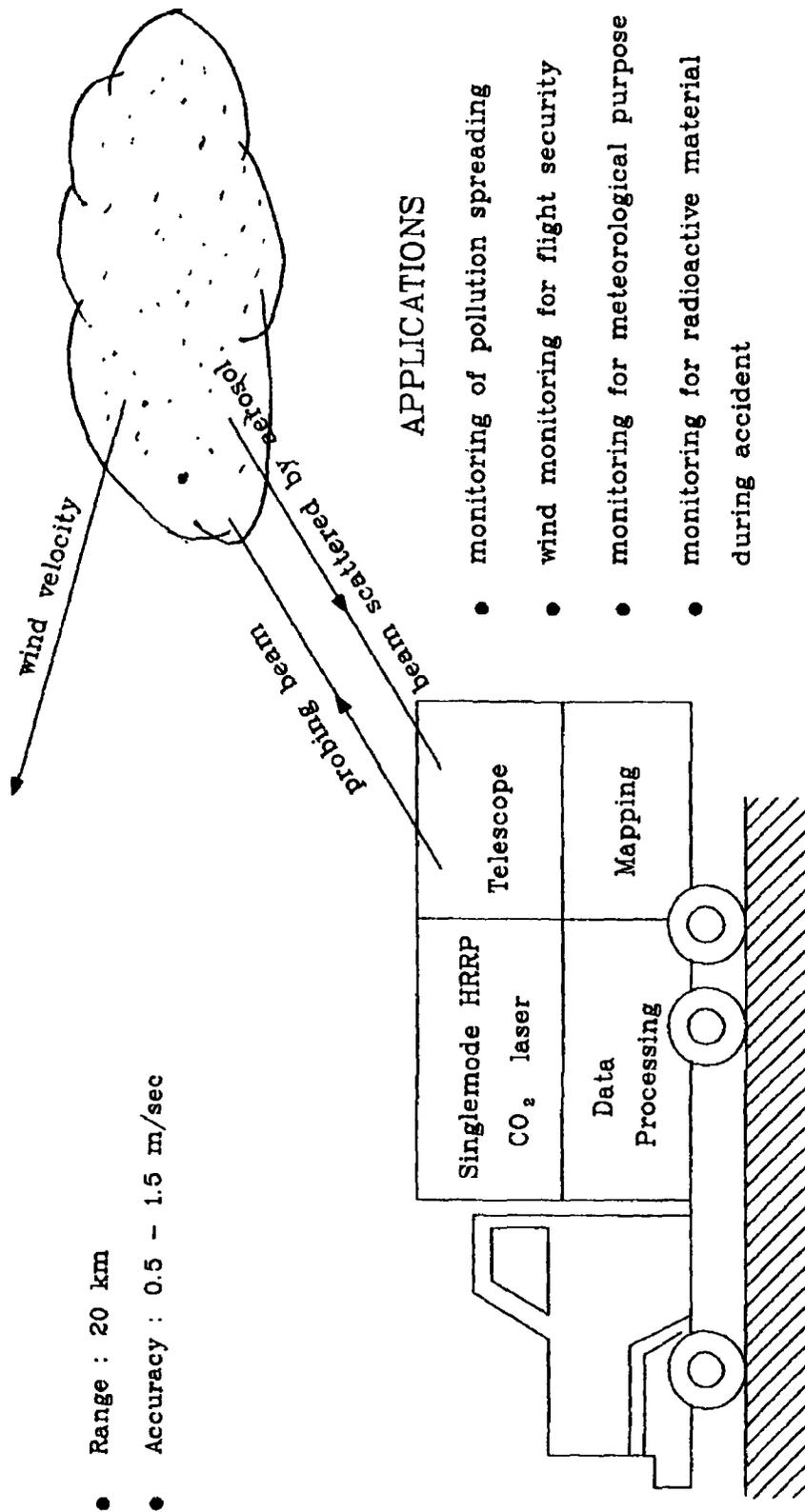


그림 25. Wind measurements by Doppler LIDAR

제 4 장 결 론

지금까지 검토한 LIDAR system 은 레이저가 개발된 이래 가장 첨단적인 레이저의 활용 분야 중의 하나라고 볼 수 있다. 레이저 자체의 고출력화 및 고도의 안정성이 중요하고 고반복율도 또한 중요하다. 아울러 미세 신호의 검출 기술과 자료 처리상의 고도의 기술 수준도 요구된다. 이와같은 첨단 기술을 완전히 소화해 내기 위해서는 장기적인 투자가 필요할 뿐만아니라 고급 인력과 기술의 뒷바침이 선행되어야 할 것이다.

그동안의 레이저 산업 발전과 이의 활용 영역이 급속히 증대되고 있는 실정에서 공해문제 해결에 레이저를 활용하는 연구는 매우 중요한 연구 분야로 대두되고 있다. 특히 선진국에서도 10 여년 전부터 이 분야의 연구가 활발히 진행중에 있으며, 따라서 국제간의 정보 교류도 용이하리라고 판단된다. 당 연구실은 지난 1984 년부터 레이저의 활용 연구를 수행해온 바 다음과 같은 연구 및 기술 성과를 확보하고 있다.

1. 레이저 및 광학 관련 분야

가. CO₂ 레이저 제작 : 광화학 반응 연구

- 10 MW 급 TEA 2 대

- 20 W 급 CW 1 대

나. N₂ 레이저 제작 : 레이저 유도 형광 측정법 연구

다. Nd:YAG 레이저 제작 : 레이저 가공기 개발

- 과기처 특정 사업 ('86 - ' 89)

- 레이저 발전시의 Nd:YAG Rod Thermal Lensing 효과 분석

◦ 레이저 발전 특성 개선

◦ 레이저 Pulse Shaping ; 펄스 모양의 변조 가능

라. Digital Interferometer 제작 : 서울광학에서 활용

마. Speckle Interferometry 기술 연구

2. 미세 신호 처리 분야

가. 광음향 측정법에 의한 분자의 적외선 광흡수 측정 기술

나. 적외선 형광 측정 기술

3. 원격 광전송 기술

가. 광섬유를 통한 미세 형광 신호 전달 기술

나. 광섬유를 통한 레이저 전송 기술

4. 분광학 분야

가. SF₆, CHF₃, CDF₃ 등의 적외선 다중 광흡수 및 분해 연구

- 동위원소 효과 분석

나. 광음향 측정법에 의한 CO₂ 레이저 흡수 분광학 연구

- CHF₃, C₂H₄, NH₃, SF₆, 등

다. 광분해 생성물에서 방출되는 적외선 형광 측정 연구

- 진동 여기된 HF 또는 DF 에서 방출되는 적외선 측정

라. Laser Induced Fluorimetry

- 용액중의 우라늄 및 희토류 형광 분석
- 유동 시료에서의 우라늄 형광 측정

이와같은 자체 기술력 및 장비를 확보하고 있으므로 앞으로 미세 신호의 전산 처리 기법과 수광 기구 및 광소자의 적절한 선택 능력을 배양해 가면 본 연구실을 중심으로 LIDAR 를 충분히 연구해 나갈 수 있으리라 판단하고 있으며, 이를 통하여 한층 진보된 수준에서의 레이저 활용이 기대된다.

현재의 국내 기술수준 및 동향으로 보아 레이저의 제작 사용에는 많은 문제점이 있을 것으로 판단되나, 상용 레이저를 구입하여 사용하면 다른 신호처리 분야나 광학분야는 당실의 기술로도 국제협력을 통해 충분히 개발이 가능할 것으로 판단하고 있다. 앞서 언급한 바와같이 LIDAR 의 활용기법은 여러가지가 있다. 그러나 어떤 방법을 사용하든 간에 문제는 미세 신호를 여하히 수집 처리하느냐에 있는 것으로 보인다. 따라서 우선은 기 보유하고 있거나 혹은 쉽게 제작이 가능한 CO₂ 레이저를 사용하는 DIAL LIDAR 법을 연구하여 기술을 충분히 습득한 후에 보다 활용성이 큰 dye laser DIAL 또는 DAS 방법 및 fluorescence LIDAR 기법으로 연구의 폭을 넓혀가는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 3 년 단위로 4 단계에 걸쳐 연구를 추진하였을 때의 분야별 달성 목표를 표 7 에 나타내었다.

표 7. 단계별 연구·기술 개발 목표

■ 최종목표

<ul style="list-style-type: none"> ○ 원자력 시설에서의 오염물질 유출 감시 체계 확립 ○ 공해물질 자동 감시 체계 확립
--

■ 단계별 목표

단 계 별 목 표	
1 단 계	<ul style="list-style-type: none"> ○ 광학계통의 선정 및 제작 ○ 미세 형광 신호 검출
2 단 계	<ul style="list-style-type: none"> ○ 집광기의 설계 및 제작 ○ 광신호 처리 자동화
3 단 계	<ul style="list-style-type: none"> ○ 광섬유에 의한 광신호 원격 전송 ○ 대기 및 수질 환경 특성에 따른 광전송 특성 평가
4 단 계	<ul style="list-style-type: none"> ○ 방사능 환경에서의 광신호 측정 ○ 원자력 시설에서의 환경 감시

소련 Kurchatov 원자력 연구소에서 제공한 자료에 의하면 LIDAR 법으로 오존이나 다른 공해물질들의 측정 뿐만아니라 Doppler LIDAR 를 이용하여 바람의 방향과 속도도 측정할 수 있음을 역설하고 있다. 이와같이 LIDAR

기술은 공해물질의 확산특성을 알게함으로써 재해 예방에 큰 역할을 할 수 있을 뿐만아니라 있어서는 안될 일이지만 Chernobyl 원전 사고와 같은 사고가 일어났을 경우 이 방법으로 풍향·풍속을 정확히 원격 측정한다면 오염 피해로부터 많은 인명과 재산을 보호할 수 있을 것이다.

끝으로 LIDAR 법의 기술개발이 완성되면 얻게되는 실질적인 효과를 정리해 보면 다음과 같다.

1. 종합적인 대기 환경오염 감시 체제를 확립.
2. 오염원의 실시간 감시 : 오염원 감시의 효율성 향상
3. 원격 조정에 의한 광대역 감시 : 종합적인 환경 평가 용이
4. 운전 자동화에 의한 경비 절감 : 경제성 향상

참 고 문 헌

1. P. Varanasi and F-K. Ko, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 17, 385(1977).
2. J.N. Pitts, Jr., Env. Sci. Tech., 11, 456(1977).
3. M.L. Wright, E.K. Proctor, L.S. Gasiorek and E.M. Liston, A Preliminary Study of Air-Pollution Measurement by Active Remote Sensing Techniques, NASA CR-132724, 1975.
4. D.D. Davis, W.S. Heaps, D. Philen, M.Rodgers, T. McGee, A. Nelson and A.J. Moriarty, Rev. Sci. Instrum., 50, 1505(1975).
5. J. Shewchun, B.K. Garside, E.A. Ballik, C.C.Y. Kwan, M.M. Elsherbiny, G. Holgenkamp and A. Kazandjian, Appl. Opt., 15, 340(1976).
6. C.P. Wang, Acta Astronaut., 1, 105(1974).
7. J.G. Hawley, Laser Focus, Mar., 60(1981).
8. R.M. Measures, W.R. Houston and M. Bristow, Can. Aeron. Space J., 19, 501(1973).
9. F.E. Hoge, R.N. Swift and E.B. Frederick, Appl. Opt., 19, 871(1980).
10. H. Inaba and T. Kobayasi, Opto-electronics, 4, 101(1972).
11. K. Asai and T. Igarashi, Opt. Quantum Elect., 7, 211(1975).
12. T. Henningsen, M. Garbuny and R.L. Byer, Appl. Phys. Lett., 24, 242(1974).

13. E.D. Hinkley and P.L. Kelly, Science, 17, 635(1971).
14. R.L. Byer and M. Garbuny, Appl. Opt., 12, 1496(1973).
15. W. Schnell and G. Fisher, Appl. Opt., 14, 2058(1975).
16. E.R. Murray and J.E. van der Laan, Appl. Opt., 17, 814(1978).
17. J. Altman and P. Pokrowsky, Appl. Opt., 19, 3449(1980).
18. R.M. Schotland, Proc. 4th Symposium on Remote Sensing of the Environment 12-14 April 1966, Univ. of Michigan, Ann Arbor, 273, 1966.
19. R.M. Measures and G. Pilon, Opto-electronics, 4, 141(1972).
20. R.L. Byer, Opt. Quantum Elect., 7, 147(1975).
21. W.B. Grant, R.D. Hake, jr., E.M. Liston, R.C. Robbins and E.K. Proctor, Jr., Appl. Phys. Lett., 24, 550(1974).
22. C. O'Shea and L.G. Dodge, Appl. Opt., 13, 1481(1974).
23. S.A. Ahmed, Appl. Opt., 12, 901(1973).
24. K.W. Rothe, U. Brinkman and H. Walter, Appl. Phys., 3, 115(1974).
25. K.W. Rothe, U. Brinkman and H. Walter, Appl. Phys., 4, 181(1974).
26. K. Fredriksson, B. Galle, K. Nystrom and S. Svanberg, Appl. Opt., 18, 2998(1979).
27. K. Fredriksson, B. Galle, K. Nystrom and S. Svanberg, Appl. Opt., 20, 4181(1981).
28. E.R. Murray, R.D. Hake, Jr., J.E. van der Laan and J.G. Hawley, Appl. Phys. Lett., 28, 542(1976).
29. D.J. Brassington, Appl. Opt., 21, 4411(1982).

30. R.M. Measures, *Appl. Opt.*, 16, 1092(1977).
31. R.M. Measures, *Laser Remote Sensing*, Wiley-Interscience, New York, 1984.
32. A.E.S. Green, *"The Middle Ultraviolet"*, Wiley, New York, 1966.
33. R.D. Hudson, Jr. and J.W. Hudson, *Proc. IEEE.*, 63, 104(1975).
34. M. Kerker, *"The Scattering of Light"*, Academic Press, New York, 1969.
35. G. Mie, *Ann. Physik*, 25, 377(1908).
36. B. Nilsson, *Appl. Opt.*, 18, 3457(1979).
37. P.W. Kruse, L.D. McGlauchlin and R.B. McQuistan, *"Element of Infrared Technology"*, Wiley, New York, 1963.
38. H. Kildal and R.L. Byer, *Proc. IEEE*, 59, 1644(1971).
39. J.D. Klett, *Appl. Opt.*, 20, 211(1981).
40. G.N. Plass, G.W. Kattawar and J.A. Guinn, Jr., *Appl. Opt.*, 15, 3161(1976).
41. R.L. Schwiesow and V.E. Derr, *J. Geophys. Res.*, 75, 1629(1970).
42. D.A. Leonard, *Nature*, 216, 142(1967).
43. J.A. Cooney, *Appl. Phys. Lett.*, 12, 40(1968).
44. M.J. Garvey and G.S. Kent, *Nature*, 248, 124(1974).
45. V. Ramanathan, *Science*, 240, 293(1988).
46. V. Ramaswamy and S.M. Freidenriech, *J. Geophys. Res.*, 96, 9133(1991).
47. R.D. Cess, *J. Geophys. Res.*, 95, 16601(1990).

48. D.O'C. Starr and S.H. Melfi, NASA Conference Publication, CP3120, NASA, Washington, D.C., 1991, 50 pp.
49. S.H. Melfi and D.N. Whiteman, Bull. Amer. Meteor. Soc., 66, 1288(1985).
50. S.H. Melfi, J. Appl. Meteor., 28, 789(1989).
51. S.H. Melfi, J.D. Lawrence, Jr., and M.P. McCormick, Appl. Phys. Lett., 15, 295(1969).
52. J.A. Cooney, J. Appl. Meteor., 9, 182(1970).
53. J.A. Cooney, J. Appl. Meteor., 10, 301(1971).
54. E.R. Murray, R.D. Hake, Jr., J.E. van der Laan and J.G. Hawley, Appl. Phys. Lett., 28, 542(1976).
55. E.V. Browell, T.D. Wilkerson and T.J. McIlrath, Appl. Opt., 18, 3474(1979).
56. V.V. Zuev, V.E. Zuev, Yu.S. Makushkin, V.N. Marichev and A.A. Mitsel, Appl. Opt., 22, 3742(1983).
57. G. Elterman, J. Geophys., 58, 519(1953).
58. G. Elterman, J. Geophys., 59, 351(1954).
59. M.C.W. Sandford, J. Atm. Terres. Phys., 29, 1657(1967).
60. J.A. Cooney, J. Appl. Meteor., 11, 108(1972).
61. J.A. Salzman, "Low Temperature Measurements by Rotational Raman Scattering", in Laser Raman Gas Diagnostics, M. Lapp and C.M. Penney, Eds. Plenum Press, New York, 179-188 pp., 1974.
62. K. Schofield, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 17, 13(1977).

63. T.J. McIlrath, *Opt. Eng.*, 19, 494(1980).
64. W.S. Heaps, T.J. McGee, R.D. Hudson and L.O. Caudill, *Appl. Opt.*, 21, 2265(1982).
65. O. Uchino, M. Maeda, J. Kohno, T. Shibata, C. Nagasawa and M. Hirono, *Appl. Phys. Lett.*, 33, 807(1978).
66. E.V. Browell, *Opt. Eng.*, 21, 128(1982).
67. E.V. Browell, A.F. Carter, S.T. Shipley, R.J. Allen, C.F. Butler, M.N. Mayo, J.H. Siviter, Jr., and W.M. Hall, *Appl. Opt.*, 22, 522(1983).
68. M.R. Bowman, A.J. Gibson and M.C.W. Sandford, *Nature*, 221, 456(1969).
69. A.J. Gibson and M.C.W. Sandford, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 33, 1675(1971).
70. R.D. Hake, Jr., D.E. Arnold, D.W. Jackson, W.E. Evans, B.P. Ficklin and R.A. Long, *Geophys. Res.*, 77, 6389(1972).
71. G. Megie and J.E. Blamont, *Planet. Space Sci.*, 25, 1093(1977).
72. P.L. Hanst and J.A. Morreal, *J. Air Poll. Control Assoc.*, 18, 754(1968).
73. from seminar material by Dr. V.Yu. Baranov held in Oct. '91 at KAERI.
74. E.D. Hinkley, *Opt. Quant. Electro.*, 8, 155(1976).
75. J. Reid, J. Schewchun, B.K. Garside and E.A. Ballik, *Appl. Opt.*, 17, 300(1978).

76. R.T. Menzies, *Opto-electronics*, 4, 178(1972).
77. R.T. Menzies and M.S. Shumate, *Appl. Opt.*, 15, 2080(1976).
78. D.K. Killinger, N. Menyuk and W.E. DeFeo, *Appl. Phys. Lett.*, 36, 402(1980).
79. N. Menyuk, D.K. Killinger and W.E. DeFeo, *Appl. Opt.*, 19, 3282(1980).
80. N. Menyuk, D.K. Killinger and W.E. DeFeo, *Appl. Opt.*, 21, 2275(1982).
81. R.A. Baumgartner and R.L. Byer, *Opt. Lett.*, 2, 163(1978).
82. R.A. Baumgartner and R.L. Byer, *Appl. Opt.*, 17, 3555(1978).
83. M. Alden, H. Edner and S. Svanberg, *Opt. Lett.*, 7, 221(1982).
84. H. Inaba and T. Kobayasi, *Nature*, 224, 170(1969).
85. T. Hirschfeld, E.R. Schildkraut, H. Tannenbaum and D. Tannenbaum, *Appl. Phys. Lett.*, 22, 38(1973).
86. H.P. DeLong, *Opt. Eng.*, 13, 5(1974).
87. S.H. Melfi, M.L. Brumfield and R.M. Storey, Jr., *Appl. Phys. Lett.*, 22, 402(1975).
88. K.W. Rothe, *Radio Electr. Eng.*, 50, 567(1980).
89. J.G. Hawley, *Laser Focus*, Mar., 60(1981).
90. R.M. Measures, J. Garlick, W.R. Houston and D.G. Stephenson, *Can. J. Remote Sensing*, 1, 95(1975).

91. R.A. O'Neil, L. Buje-Bijunas and D.M. Rayner, *Appl. Opt.*, 22, 48(1983).
92. H.H. Kim, *Appl. Opt.*, 12, 1454(1973).
93. D.A. Leonard, B. Caputo and F.E. Hoge, *Appl. Opt.*, 18, 1732(1979).
94. M.L. Chanin, *Geophys. Res.*, 16, 1273(1989).

서 지 정 보 양 식						
수행기관보고서번호	위탁기관. 보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드			
KAERI/AR-357/92						
제목 / 부제	레이저를 이용한 대기 환경관리 기술					
연구책임자 및 부서명	신 장 수 (전자광학연구실)					
연 구 자 및 부서명	이상목(전자광학연구실), 김철중(")					
발 행 지	대 전	발행기관	한국원자력연구소	발행일	1992. 8.	
페이지	79	P.	도표	유(0), 무()	크 기	26 cm
참고사항	'92 년도 기술현황분석보고					
비밀여부	공개(0), 대외비(), 급비밀		보고서 종류	기술현황분석보고서		
연구위탁기관			계 약 번 호			
초록 (300 단어 내외)	<p>현대 사회의 급격한 산업화와 더불어 야기된 환경문제를 해결하기 위한 선결 과제는 무엇보다도 먼저 오염정도의 정확하고 정밀한 측정기술의 확립이라 하겠다. 현재 오염물질의 측정방법으로 여러가지 장비와 기술이 사용되고 있으나 대개의 경우 시료처리 과정이 복잡하거나 인력이 많이 필요하여 매우 큰 측정오차를 유발하게 마련이며, 또한 1 회 측정에 걸리는 시간이 길어서 오염 감시에 한계가 있게 마련이다. 본 보고서에서는 이러한 근본적인 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 레이저를 사용하는 측정법을 제시하고, 레이저의 응용 방법과 선진국에서의 대기 환경 분야 활용 예를 종합 검토하였다.</p>					
주제명 키워드 (10 단어 내외)	대기오염, 레이저, LIDAR, Doppler LIDAR, 오염확산					

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code	
KAERI/AR-357/92					
Title / Subtitle	Laser Application for Atmospheric Remote Sensing				
Project Manager and Dept.	Shin, Jang Soo (Electro Optics Dept.)				
Researcher and Dept.	Lee, Sang Mock (Electro Optics Dept.) Kim, Cheol Jung (")				
Pub. Place	Daejeon	Pub. Org.	KAERI	Pub.Date	1992. 8.
Page	79 P.	Ill.and Tab.	Yes(0), No()	Size	26 cm
Note	State of the Art Report '92				
Classified	Open(0),Outside(),__Class		Report Type	State of the Art	
Sponsoring Org.			Contract No.		
Abstract (About 300 Words)	<p>One of the most important thing to solve the environmental pollution problems are to establish a measurement technique to detect he kind and the type of pollution timely, quantitatively and qualitatively with accuracy and precision. The conventional measurement techniques such as wet analysis methods and spectrophotometric methods are generally time-consuming and require many man-powers, so it is apt to induce relatively higher errors in analytical processes. The application of laser for environmental remote sensing is the most powerful candidate to overcome the above-mentioned drawbacks of the conventional methods. In this report, we propose the possibility of laser application for environmental sensing.</p>				
Subject Keywords (About 10 Words)	Air Pollution, Laser, LIDAR, Doppler LIDAR, Pollution Distribution				

레이저를 이용한 대기 환경관리 기술

1992年 8月 14日 印刷

1992年 8月 27日 發行

發行人 林 昌 生

發行處 韓國 原子力 研究所

大田直轄市 儒城區 德津洞 150

印刷所 新 友 社

믿는마음 지킨약속 다져지는 신뢰사회